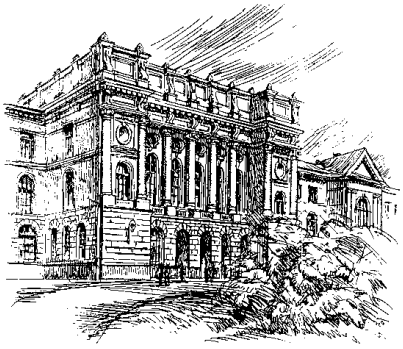
1(166)/2013



Научно-технические ведомости СПбГПУ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (председатель); Алферов Ж.И., академик РАН;
Костюк В.В., академик РАН; Лопота В.А., чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., академик РАН; Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН; Федоров М.П., академик РАН;
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.

РЕДАКЦИЯ

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

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

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

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

Содержание

Тезисы юбилейной речи ректора СПбГПУ А.И. Рудского по поводу 110-летия со дня начала занятий в Санкт-Петербургском политехническом институте 9

Железняков А.Б. *Космическая деятельность стран мира в 2012 году* 18

Энергетика

Арсеньев Д.Г., Малюгин В.И. *Санкт-Петербургский Политехнический готовит кадры для энергетики Вьетнама* 27

Фам Х.А., Рассохин В.А., Андреев К.Д. *Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама* . 32

Гармидер Д.Н., Фомин В.А. *Характеристики парогазовых установок для противоаварийного управления энергосистемой* 36

Захаров А.В., Шпензер Г.Г. *Критические режимы работы последних ступеней мощных паровых турбин с лопатками предельной длины* 41

Забелин Н.А., Раков Г.Л., Рассохин В.А., Себелев А.А., Смирнов М.В. *Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ* 45

Захаров В.М., Смирнов Н.Н., Лапатеев Д.А. *Снижение энергозатрат путем применения теплоотражающих экранов в окнах* 54

Лапшин К.Л. *Оптимизация проточных частей паровых турбин с применением «интегральных» сопловых лопаток* 61

Электротехника

Богуславский И.З., Данилевич Я.Б., Попов В.В., Рогачевский В.С. *Особенности расчета электромагнитных нагрузок машин двойного питания с учетом насыщения и высших гармоник* 67

Коровкин Н.В., Шишигин С.Л. *Расчетные методы в теории заземления* 74

Бочаров Ю.Н., Жук В.В. *Грозоупорность воздушных ЛЭП высокого напряжения с композитными опорами* 80

Высогорец С.П., Васильев А.П. *Оценка качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ* 84

Шклярский А.Я., Устинов Д.А., Сычев Ю.А. *Проблемы эксплуатации электрооборудования буровых установок* 93

Андреев И.А., Безбородов А.А. *Разработка методики идентификации дефектов изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин* 99

Шонин О.Б. *Наблюдатель напряжений на плавающих конденсаторах в схеме стабилизации сбалансированного режима четырехуровневого инвертора для высоковольтного электропривода* 106

Металлургия и материаловедение. Машиностроение

Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Орыщенко А.С., Петров С.Н., Фукс М.Д. *Влияние циклов «нагрев — охлаждение» на длительную прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2* 113

Золотов А.М., Паршиков Р.А., Боклаг Н. Ю., Паршин С.В., Трутнев Е.В. *Особенности деформирования заготовок при равноканальном угловом прессовании в S-образном канале* 121

Скотникова М.А., Миронова Е.В., Крылов Н.А., Соколов А.В. *Высокотемпературный распад твердых растворов при полиморфном $\alpha \leftrightarrow \beta$-превращении деформированных сплавов титана* 138

Лунев В.А., Шишов И.А., Глухов П.А., Беляев А.А. *Тепловые потери при прокатке толстого листа на стане 5000. Часть 1: Теплопотери на операциях, предшествующих прокатке* 146

Кольцова Т.С., Насибулин А.Г., Васильева Е.С., Егоров В.В. *Структура углеродных нановолокон, синтезированных на медном катализаторе* 153

Алексеев Г.А. *Определение механических свойств тонких покрытий* 159

Демидов А.И., Маркелов И.А. *Термодинамика взаимодействия магнетита и вюстита с монооксидом углерода с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры* 166

Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю. *Влияние упругости привода в системе топливоподачи дизелей на параметры впрыска топлива* 170

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

Башкарёв А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. *Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя* 175

Петриченко М.Р. *Экстремали, характеристики, свободные поверхности и «принцип минимума диссипации» для безнапорных потоков* 179

Григорьев А.В., Якунин А.И., Кузнецов Н.Б., Кондратьев В.Ф., Кортиков Н.Н. *Расчет нестационарного ротор-статорного взаимодействия в турбинной ступени методом гармонического баланса* 183

Максаров В.В. *Использование анизотропных свойств металла для изготовления виброустойчивого инструмента* 192

Зандер М. С., Семакина Е.Ю., Черников В.А. *Экспериментальные и численные исследования структуры 3D-потока в отсеке «турбинная ступень — осевой диффузор»* 197

Борисевич А.В., Волков А.Н., Гичев Ю.В., Дьяченко В.А., Петкова А.П. *Разработка и моделирование согласованного управления для стабилизации скорости и натяжения в процессе смотки аморфной ленты* 204

Боровков А.И., Грунин В.В., Рутман Ю.Л. *Исследование вертикального падения контейнера с отработавшим ядерным топливом* 210

Грязнов Н.А., Кочкарёв Д.А., Соснов Е.Н. *Лазерно-телевизионная триангуляционная система трехмерного позиционирования на базе высокоскоростной телекамеры* 215

Востров В.Н., Яблокова Н.А., Кононов П.А. *Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции рентгеновских лучей* 223

Земляков Е.В., Туоминен Я., Поздеева Е.Ю., Туричин Г.А., Комарова Е.А. *Формирование поверхностных слоев при лазерной наплавке с использованием мощных волоконных лазеров* 231

Сомонов В.В. *Влияние индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов* 237

Иванова О.А., Зубов В.И., Зубова А.Ф., Стрекопытова М.В. *Задача об устойчивости предельного цикла решения уравнения Абеля* 244

Брунман В.Е., Волков А.Н., Коняшин А.В., Петкова А.П., Смородов А.В. *Влияние применяемых материалов и алгоритмов управления на долговечность и энергоэффективность мембранных электролизеров* 248

Ташевский А.Г. *Модели аварийных ситуаций для обеспечения безопасности функционирования сложных технических систем* 256

Иванов А.Е., Юхнев А.Д., Сенчик К.Ю., Ушаков Ф.Г. *Перспективы создания переносного мехатронного кардиокомпрессора для закрытого массажа сердца* 264

Природопользование

Феофанов Ю.А., Ряховский М.С. *Результаты исследований по применению комбинированных сорбентов для мобильных установок водоподготовки* 269

Техносферная безопасность

Розов А.Л., Белянин В.А. *Методика управления территориальными подразделениями государственного пожарного надзора* 273

Гуменюк В.И., Доброборский Б.С., Федосовский М.Е. *Ротация контролирующего персонала как средство уменьшения влияния человеческого фактора на надежность энергетических объектов* 277

Савин С.Н. *Охрана труда и техника безопасности при проведении стендовых испытаний строительных конструкций* 283

Гуменюк В.И., Ломасов В.Н., Моторный А.В., Коробицын А.Р. *Технология плавления радиоактивного металла с целью перевода основной части радионуклидов в шлак* 286

Вопросы образования

Афанасьева И.Б., Бежанова А.И., Димент Л.И. *Формирование рефлексивных умений студентов в процессе обучения* 292

Попок И.А., Коберницкий В.Е. *Модель формирования у студентов военных кафедр навыков и умений воспитательной работы в подразделении* 300

Буймов А.Г. *Вероятностная интерпретация законов освоения и сохранения навыков в программах репетиционного типа* 306

Хроника событий

Кобчиков В.С, Ступак В.Б. *Профсоюзный комитет сотрудников СПбГПУ* 311

Кесаманлы М.Ф., Кесаманлы Ф.П. *Академик Георгий Николаевич Флёров (к столетию со дня рождения)* 314

Демидов А.И. *Михаил Александрович Павлов в Политехническом (к 150-летию со дня рождения)* 321

Сведения об авторах. Контактные данные 331

Аннотации. Ключевые слова 341

Contents

The abstracts of speech of Rector SPbSPU A.I. Rudskoy on the occasion of 110th anniversary of commencement of studies at the St.-Petersburg Polytechnic Institute 9

Zheleznyakov A.B. *Space activities of the world in 2012* 18

Energetics

Arseniev D.G., Malyugin V.I. *St-Petersburg Polytechnical training personnel for energy Vietnam* 27

Pham H.A., Rassokhin V.A., Andreev K.D. *Status and prospects of energy development Vietnam* 32

Garmider D.N., Fomin V.A. *Specifications for cycle plants the antiemergency power system control* 36

Zakharov A.V., Shpenzer G.G. *Critical operating modes of LPC stages with blades with overall length* 41

Zabelin N.A., Rakov G.L., Rassokhin V.A., Sebelev A.A., Smirnov M.V. *Researh of flow chatacteristics in low flow rate LPI turbine stages* 45

Zaharov V.M., Smirnov N.N., Lapateev D.A. *Reduction of energy consumption by applying heat reflective screens in windows* 54

Lapshin K.L. *Optimization of flow parts of steam turbines using «integral» nozzle blades* 61

Electrical engineering

Boguslawsky I.Z., Danilevich Ja.B., Popov V.V., Rogachewsky V.S. *Special feature of double — fed machines electromagnetic loads calculation with consideration of saturation and high time harmonics* 67

Korovkin N.V., Shishigin S.L. *Calculation methods in the grounding theory* 74

Bocharov Y.N., Zhuk V.V. *Lightning protection of high voltage overhead transmission line with composite towers* 80

Vysogorets S.P., Vasilyev A.P. *Quality assessment operating oil power transformers 35–110 kV* 84

Shklyarskiy A.Y., Ustinov D.A., Sychev Y.A. *Problems using electrical rigs* 93

Andreev I.A. Bezborodov A.A. *Developing the methodology of identification of defects of stator winding insulation of high voltage electrical machines* 99

Shonin O.B. *Voltage observer-based closed-loop balancing control of the four level flying capacitor frequency converter for mv elctric drive appliations* 106

Metallurgy and materials technology. Mechanical engineering

Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Orischenko A.S., Petrov S.N., Fuks M.D. *Influence of heating-cooling cycles on long-term strength of cast heat-resistant alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2* 113

Zolotov A.M., Parshikov R.A., Boklag N.Y., Parshin S.V., Trutnev E.V. *Deformation characteristics of blanks in channel angular pressing in S-type channels* 121

Skotnikova M.A., Mironova E.V., Krylov N.A., Sokolov A.V. *High-temperature disintegration of firm solutions at polymorphic $\alpha \leftrightarrow \beta$ transformation of the deformed alloys of the titan* 138

Lunev V.A., Shishov I.A., Glukhov P.A. Belyaev A.A. *The heat losses during plates rolling on the mill 5000.Part 1:. The heat losses during preceding operations* 146

Koltsova T.S., Nasibulin A.G., Vasilyeva E.S., Egorov V.V. *The structure of carbon nanofibers synthesized on the copper catalyst* 153

Alexeyev G.A. *Detecting mechanical properties of thin films* 159

Demidov A.I., Markelov I.A. *Thermodynamics of interaction of magnetite and wustite with carbon monoxide taking into account the changing of wustite composition with temperature* 166

Rusinov R.V., Dobretsov R.U. *Influence of the operating mechanism elasticity in diesel fuel supply system on the fuel injection parameters* 170

Mathematical мethods. Modeling. Experimental studies

Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Peshkov V.S. *Oscillatory motion of the plate compactor* 175

Petrichenko M.R. *Extremals, characteristics free surface and the «principle of minimum dissipation» for a free flow* 179

Grigoriev A.V., Vakunin A.I., Kuznechov N.B., Kondratiev V.F., Kortikov N.N. *Calculation of unsteady rotor-stator interaction in turbine stage harmonic balance* 183

Maksarov V.V. *Using anisotropic properties of metal tool for manufacture shakeproof* 192

Zander M.S., Semakina E.J., Chernikov V.A. *Experimental and numerical research of 3d-flow structure in the block «turbine stage — axial diffuser»* 197

Borisevich A.V., Volkov A.N., Gichev Yu.V., Dyachenko V.A., Petkova A.P. *Development and modeling of coherent management to stabilize the speed and tension in the process of winding amorphous ribbon* .. 204

Borovkov A.I., Grunin V.V., Rutman Y.L. *The description of the container with fulfilled nuclear fuel at vertical falling* 210

Gryaznov N.A., Kochkaryov D.A., Sosnov E.N. *Laser triangulation television three-dimensional positioning system-based high-speed camera* 215

Vostrov V.N., Jablokova N.A., Cononov P.V. *Study of residual stresses in the roll out of parts by x-ray* diffraction 223

Zemlyakov E.V., Tuominen J., Pozdeeva E.Yu., Turichin G.A., Komarova E.A. *Formation of surface layers during laser cladding using a powerful fiber laser* 231

Somonov V.V. *Effect of induction heating to prevent hot cracking during laser welding of aluminum alloys* 237

Ivanova O.A., Zubov V.I., Zubova A.F., Strecopitova M.V. *Problem of the stability of the limit cycle solutions of the Abel equation* 244

Brunman V.E., Volkov A.N., Konyashin A.V., Petkova A.P., Smorodov A.V. *Impact of the materials used and control algorithms for durability and energy efficiency of membrane electrolysers* 248

Tashevsky A.G. *Models for emergencies ensure the safe functioning of complex engineering systems* 256

Ivanov A.E., Yuhnev A.D., Senchik K.Yu., Ushakov F.G. *Prospects of creating portable mechatronic chest compression system for cardiocerebral resuscitation* 264

Nature management

Feofanov Y.A., Ryakhovskiy M.S. *The results of studies on choice of sorbents for the filter with a complex loading* 269

Technosphere safety

Rozov A.L., Belyanin V.A. *Method management territorial subdivision of state fire control* 273

Humeniuk V.I., Dobroborsky B.S., Fedosovsky M.E. *Rotation of the supervisory staff as a means of reducing the impact human factors on the reliability of the of power facilities* 277

Savin S.N. *Labour protection and safety engineering in carrying out of bench tests of building structures* . 281

Humeniuk V.I., Lomasov V.N., Motornyi A.V., Korobitsyn A.R. *Radioactive metal melting techniques in order to transfer the main part in the slag radionuclides* 286

Educational issues

Afanasyeva I.B., Bezhanova A.I., Diment L.I. *Formation of students reflexive skills in training* 292

Popok I.A., Kobernitsky V.E. *Model form the students of military departments of skills and abilities of educational work in subdivision* 300

Buimov A.G. *The probabilistic interpretation of the laws of development and conservation skills through training programs with repetitions* 306

Chronicle of events

Kobchikov V.S., Stupak V.B. *Union committee of employees SPbSPU* 311

Kesamanly M.F., Kesamanly F.P. *Academician Georgy Flerov (on the centenary of his birth)* 314

Demidov A.I. *Mikhail Aleksandrovich Pavlov at the polytechnic (the 150th anniversary of his birth)* 321

About the authors. Contact information 331

Abstracts. Keywords 349

ТЕЗИСЫ ЮБИЛЕЙНОЙ РЕЧИ РЕКТОРА СПбГПУ А.И. РУДСКОГО ПО ПОВОДУ 110-ЛЕТИЯ СО ДНЯ НАЧАЛА ЗАНЯТИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

Политехнический университет, как известно, имеет не одну, а две даты своего основания. Первая нам всем хорошо известна — 19 февраля 1899 года. В этот день Николай II одобрил проект о создании Санкт-Петербургского политехнического института. Вторая дата — начало октября 1902 года.

В день начала занятий в Политехническом институте в Белом зале в центральной нише был выставлен парадный портрет Николая II кисти Ильи Ефимовича Репина, а на стене возле окна висела старинная икона.

1-го октября 1902 года в Актовом зале собралось более 300 человек, среди которых присутствовал и управляющий министерством финансов Петр Михайлович Романов, прибывший в Политехнический институт по поручению министра финансов Сергея Юльевича Витте, который находился в это время в деловой поездке на Дальнем Востоке.

В частности, П.М.Романов сказал: «Ныне здание института настолько готово, что представляется возможным со 2 октября начать в нем занятия. Объявляю по поручению отсутствующего министра финансов Санкт-Петербургский политехнический институт открытым».

Итак, первый учебный год в Политехническом институте официально начался 2-го октября 1902 года. В этот день первая лекция по теоретической механике была прочитана профессором Иваном Всеволодовичем Мещерским. К сожалению, фотографии этой лекции не сохранились. Первой была запечатлена на снимках лекция по общей химии Алексея Алексеевича Волкова.

Вспомним, что по замыслу С.Ю. Витте Политехнический институт должен был содержать в себе различные отделения человеческих знаний и иметь организацию университета, способ-

Портрет Николая II кисти И.Е. Репина

На лекции по химии профессора А.А. Волкова

Директор института
князь Андрей Григорьевич Гагарин

ную «наиболее развивать молодых людей, давая им общечеловеческие знания» для «соприкосновения с товарищами, занимающимися всевозможными специальностями».

В состав Политехнического института входили четыре отделения: экономическое, металлургическое с электрохимическим подотделом, электромеханическое и кораблестроительное. Учебный план Института был разработан особой комиссией под председательством генерала Николая Павловича Петрова и при участии профессоров Александра Сергеевича Посникова, Дмитрия Ивановича Менделеева, Николая Александровича Меншуткина, Виктора Львовича Кирпичёва и директора, князя Андрея Григорьевича Гагарина.

Деканами отделений были назначены: Александр Сергеевич Посников — экономическое отделение; Николай Александрович Меншуткин — металлургическое отделение; Михаил Андреевич Шателен — электромеханическое отделение; Константин Петрович Боклевский — кораблестроительное отделение.

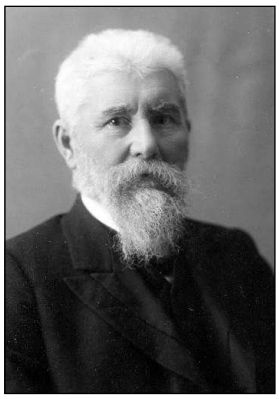
Первый прием был ограничен 270 студентами, из которых половина была принята на экономическое отделение.

С 1907 года число поступавших в Политехнический институт увеличилось до 1295 человек и до самой революции 1917 года почти не подвергалось изменению.

В 2012 году на все формы обучения в наш университет, включая филиалы, было принято 6526 студентов.

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

Совместная, и на первое время обязательная, жизнь в общежитиях сильно сплотила студентов.



Александр Сергеевич
Посников

Николай Александрович
Меншуткин

Михаил Андреевич
Шателен

Константин Петрович
Боклевский

В коридоре Главного здания

Сословный, общественный и национальный состав учащихся был довольно пестрый, но с первых же лет жизни между студентами установились отношения, основанные на взаимном уважении и принципе равенства. Постепенно даже выработался некий неписаный кодекс поведения и чести студентов-политехников.

Сегодня, продолжая студенческие традиции предшественников, мы всячески содействуем активной общественной деятельности наших-студентов. Студенческие научные соревнования, театры, студенческий клуб и, конечно, спорт переживает реальное развитие, происходящее в наши дни.

Надо признать, что студентам первых двух выпусков Политехнического института, 1907 и 1908 годов, после его окончания устроиться на работу было сложно, так как никто из работода-

1 сентября 2012 года

телей не знал, что представляют собой воспитанники Политехнического института. Но уже через два года они получили такую высокую оценку, что все последующие выпуски Политехнического института в дореволюционной России пользовались повышенным спросом.

Многие выпускники очень быстро поднялись по ступеням государственной и частной службы до самых высоких постов и должностей (например, Борис Александрович Бахметьев — замминистра торговли и промышленности; Михаил Исидорович Фридман — замминистра финансов; Михаил Иванович Туган-Барановский — министр финансов Украинской Центральной Рады; Вячеслав Михайлович Молотов, учившийся в вузе под своей настоящей фамилией — Скрябин — министр иностранных дел СССР).

В период НЭПа именно выпускники экономического отделения восстановили систему денежного обращения государства, разрушенную во время революции и гражданской войны. Среди их имен можно назвать Сергея Антоновича Смирнова, Леонида Наумовича Юровского, Станислава Густавовича Струмилина, Сергея Владимировича Бернштейна-Когана... По этому поводу знаменитый экономист профессор Владимир Эдуардович Дэн вспоминал*: «В какой бы комиссариат или управление я ни зашел бы, всюду я встречал наших политехников, и всюду они мне оказывали полное содействие»*.

Что касается технических специальностей, то металлургическое отделение в Политехническом институте было уникальным. Именно на нем впервые в России была проведена специализация преподавания цикла горнозаводских наук: горное дело было отделено от металлургического, и учащиеся Политехнического института после его окончания впервые в России стали «инженерами-металлургами», а не «горными инженерами». Металлургическое отделение стало готовить инженеров не только для промышленности, но и для научно-исследовательской работы в области металлургии.

Владимир Эдуардович Дэн

На электромеханическом отделении, в отличие от Электротехнического института, в котором занимались преимущественно слабыми токами (телефоны и телеграфы), в Политехническом особое внимание стали уделять проектированию электрических генераторов, электровозов, передаче токов высокого напряжения на дальние расстояния.

В начале XX века мир судостроения находился еще в периоде перехода от деревянных кораблей к стальным. Поэтому в Политехническом институте на кораблестроительном отделении большое внимание уделялось теоретической подготовке, связанной с конструкцией плавучего средства. Особое внимание на этом отделении уделялось предмету «Сопротивление материалов», так как вопрос, из какого металла лучше всего строить корпус судна, был изучен еще очень слабо. Уже в 1911 году петербургские газеты писали: «Если из других институтов выходят узкие специалисты, то из Политехникума — наиболее разносторонне образованные люди».

Мы все отлично понимаем, что за этим стояла большая, многолетняя, кропотливая работа всего профессорско-преподавательского состава Политехнического института.

Уже в первые годы основания Института большое внимание уделялось языковой подготовке. Многие студенты-политехники в стенах вуза изучали немецкий, французский и английский языки, так как многие рекомендованные книги не были переведены на русский язык. Так, например, основной учебник электромеханического отделения «Теоретические основы электротехники» на русском языке вышел только в 1916 году.

Поэтому изучение иностранных языков выгодно отличало питомцев Института от всех других высших технических заведений России.

Как известно, многие выпускники-политехники, оказавшись после революции 1917 года за границей, с большой теплотой вспоминали своих преподавателей, которые дали им не только первоклассное техническое или экономическое образование, но и гуманитарное. Владение языками и гуманитарные знания спасли многим жизнь и не дали умереть от голода. Даже за границей, в тяжелые годы мирового экономического кризиса ни один выпускник Политехнического института не остался без работы. Вот что написал в Париже по поводу 2 октября 1952 года один из первых выпускников Политехнического института Евгений Александрович Вечорин, главный организатор юбилея «50 лет с начала занятий в Санкт-Петербургском политехническом институте»:«Собравшиеся сейчас здесь, на чужбине, мы всеми мыслями тянемся к далекой родине. И чувствуем себя в неоплатном долгу перед страной, которая затратила такие огромные культурные и материальные средства на образование каждого из нас. Не будь злосчастной войны и связанного с этим лихолетья, мы сегодня присутствовали бы в белых стенах нашей Alma Mater на большом торжестве и празднике Русской Культуры, в среде многих тысяч бывших и настоящих преподавателей и воспитанников, объединенных любовью к нашему храму науки и гордые сознанием нашего служения Великой России».

Дорогие друзья, коллеги! В юбилейной речи принято говорить об итогах, делиться планами на будущее. Но сегодня я хотел бы, прежде всего, обратиться к исторической памяти и от лица потомков принести слова безмерной благодарности предшествующим поколениям ученых и преподавателей Политехнического, нашим выпускникам, которые создали всемирную славу не только нашему университету, но и всей отечественной науке и культуре.

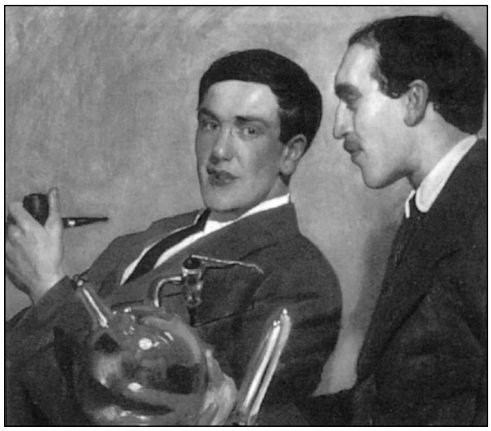
Пусть сегодня их имена и заслуги будут названы под сводами этого великолепного зала, наполнив наши сердца чувствами огромной признательности и заслуженной гордости за нашу Alma Mater и наше Отечество!

С 1906 года одним из первых сотрудников института был Абрам Федорович Иоффе, создатель научной школы, воспитавший многих выдающихся советских физиков. Среди них: Анатолий Петрович Александров, Исаак Константинович Кикоин, Игорь Васильевич Курчатов, Матвей Петрович Бронштейн, Борис Павлович Константинов, Яков Ильич Френкель и, конечно же, лауреаты Нобелевской премии — Петр Леонидович Капица и Николай Николаевич Семенов, которых запечатлел на своей картине знаменитый русский художник Борис Кустодиев.

Абрам Федорович Иоффе

Юлий Борисович Харитон совместно с выпускником физико-механического факультета Политехнического института Яковом Борисовичем Зельдовичем впервые в мире осуществил расчет цепной реакции деления урана.

На протяжении ряда лет Ю.Б. Харитон, будучи одним из разработчиков проекта по созда-



П.Л. Капица и Н.Н. Семенов.
Портрет кисти Бориса Кустодиева

Ю.Б. Харитон

Я.Б. Зельдович

нию атомной бомбы, руководил ядерно-оружейной программой Советского Союза, создавая его ядерный щит.

Уже с первых дней своего существования политехники обогатили не только российскую систему образования, но и мировую. Например, задачник Мещерского по теоретической механике был переведен на английский язык и с большим успехом использовался во многих университетах Соединенных Штатов Америки для подготовки инженерных кадров. Задачники сотрудников Политехнического института по теоретической механике и сопротивлению материалов использовались во Франции, Австралии, США, Японии и Латинской Америке.

Ученые-политехники быстро завоевали научное призвание во всем мире. Легендарный план ГОЭЛРО (для молодого поколения, сидящего в этом зале, я напомню: ГОЭЛРО — Государственная комиссия по электрификации России — орган, созданный 21 февраля 1920 года для разработки проекта электрификации России) был выполнен под руководством профессора Михаила Андреевича Шателена. В комиссию также вошли ученые-политехники Александр Викторович Вульф, Александр Александрович Горев, Михаил Давидович Каменский, Владимир Августович Кинд, Николай Николаевич Пономарев и др.

Строительство гидроэлектростанций и других гидротехнических сооружений стало своеобразной базой для формирования ряда школ: например, участие в возведении промышленных и других сооружений привело к созданию научной школы академика Бориса Григорьевича Галёркина, разработавшей важнейшие проблемы статики сооружений, теории упругости и ее практических приложений, а также школы академика Николая Николаевича Павловского, выполнившей крупные инженерные расчеты движения грунтовых вод и др.

В период зарождения советского энергомашиностроения основоположниками отечественного паро- и гидротурбостроения стали члены-корреспонденты АН СССР Александр Александрович Радциг и Иван Николаевич Вознесенский; у истоков советского электромашиностроения стояли профессор Вацлав Александрович Толвинский, академик Михаил Полиевктович Костенко, член-корреспондент АН СССР Иван Августович Одинг и другие выдающиеся ученые института. Мировой известностью пользуются труды академика Михаила Александровича Павлова — основоположника теории доменного процесса и строительства сверхмощных доменных печей, академика Александра Александровича Байкова — автора общей теории металлургических процессов, члена-корреспондента АН СССР Павла Павловича Федотьева — создателя физико-химических основ производства алюминия и др.

Крупную роль в развитии отечественного паровозостроения в 20-е годы прошлого века сыграл профессор института Александр Сергеевич Раевский — талантливый конструктор Путиловского завода, автор ряда проектов серий уникальных паровозов, много лет выпускавшихся в больших количествах в нашей стране.

Организованный в 1922 году профессором Дмитрием Николаевичем Дьяковым факультет индустриального земледелия был превращен в дальнейшем в Институт механизации и электрификации сельского хозяйства.

В связи с новыми задачами, вставшими перед отечественным машиностроением к началу 30-х годов, уже в 1931 году в Институте по инициативе профессоров Хрисанфа Федоровича Кетова, Сергея Владимировича Вяхирева и Николая Иосафовича Колчина была организована первая в Советском Союзе кафедра машин-автоматов и полуавтоматов для подготовки специалистов в новой области — разработки научных основ автоматизации технологических процессов.

Заметный вклад в историю как отечественной, так и мировой экономической науки внесли Петр Бернгардович Струве, Иван Иванович Иванюков, Александр Александрович Чупров, Владимир Николаевич Твердохлебов и многие другие.

С первых дней Великой Отечественной войны вся научная и производственная работа института была перестроена и подчинена призыву: «Все — для фронта, все — для победы!».

Виднейшие ученые вуза — академики Александр Александрович Байков, Борис Григорьевич Галёркин, Абрам Федорович Иоффе, Николай Николаевич Семёнов, Николай Николаевич Давиденков — возглавили научно-технический комитет, организованный при Ленинградском городском Совете депутатов трудящихся.

Ряд профессоров и доцентов вошли в состав городской комиссии по научно-исследовательским работам. В институте был образован комитет по оборонным работам под председательством профессора Михаил Андреевич Шателена. Комитет определил тематику исследований, координировал деятельность ученых, лабораторий, оказывал им необходимую помощь.

На нужды обороны страны переключились все лаборатории ЛПИ. Так, лаборатория автоматики и телемеханики по заказу Военно-морского флота приступила к изготовлению специальных прерывателей, а также опытных замыкателей для Военно-воздушных сил. По заданию штаба противовоздушной обороны Ленинграда при институте была создана городская лаборатория, в которой под руководством профессоров Сергея Петровича Гвоздова и Владимира Петровича Ильинского разрабатывались микроаналитическая и микрофизикохимическая методики исследования боевых отравляющих веществ. В той же лаборатории была разработана технология производства осушителей воздуха в газоубежищах на основе древесных опилок и торфа, а также изготовлялись и испытывались новые образцы химических фильтров для противогазов.

Кафедра аналитической химии наладила производство люминофоров (светящаяся краска).

Лаборатории радиофизики и общей электротехники совместно изготовили физиотерапевтические и световые ванны для госпиталей. Кроме того, лаборатория радиофизики разработала способ стерилизации перевязочных материалов с помощью токов ультравысокой частоты.

Лаборатория аэродинамики сконструировала установку для дегазации улиц на случай их заражения отравляющими веществами.

Лаборатория текстильных машин по просьбе госпиталей наладила производство марли и бязи.

Лаборатория печей и огнеупоров по заданию Автобронетанкового управления фронта разработала и изготовила обогревательные печи для тракторов, работающих при низких температурах.

Лаборатории общей электротехники и электроизмерительной техники создали приспособление для защиты глаз от мелких осколков.

Лаборатории сплавов и металлургии цветных металлов сделали установки для получения кислорода и снабжали им госпитали города, освоили выпуск сплава калия и натрия для запалов к бутылкам с горючей смесью, кремней для зажигалок без дефицитного цезия.

Лаборатория гидротехники предложила способ быстровозводимых земляных насыпей для оборонительных сооружений.

Кафедра утилизации водной энергии выполнила работу по защите гидростанций от воздушных нападений.

Только этот краткий перечень свидетельствует о том, как много сделали сотрудники института для нужд фронта.

К этому следует добавить, что ученые внесли много ценных предложений по совершенствованию и внедрению вооружений для Красной Армии.

Так, профессор Иван Августович Одинг разработал вездеходную мину, профессор Леон Семенович Фрейман — устройство для защиты

летчика от вредного действия перегрузок, профессор Яков Ильич Френкель — точный способ наводки по движущимся целям.

Под руководством члена-корреспондента АН СССР Павла Павловича Кобеко было налажено производство изоляционного материала «эскапон». Он же совместно с доцентом Аркадием Романовичем Шульманом провел исследования физических свойств льда, которые были использованы при строительстве «Дороги жизни».

Научный сотрудник Георгий Николаевич Никольский предложил схему безгироскопной авиационной вертикали для слепого полета и автоматического пилотирования.

В стенах института разрабатывалась технология мощных зажигательных патронов, сигнально-осветительных и дымовых шашек из местного сырья, велась расшифровка трофейных боеприпасов.

Ученые института оказывали большую помощь промышленным предприятиям. Профессоры Иван Николаевич Вознесенский и Хрисанф Федорович Кетов, доцент Артемий Федорович Лесохин были направлены для работы на Кировский завод; профессор Иван Августович Одинг, доцент Дмитрий Васильевич Ефремов — на «Электросилу», профессор Юрий Владимирович Баймаков — на «Красный Выборжец» и т. д.

Вот несколько примеров помощи промышленным предприятиям Ленинграда, которую оказали ученые института. Профессоры М.Г. Евангулов и М.П. Славин консультировали заводы по вопросу освоения производства новых цветных металлов.

Бригада ученых ЛПИ под руководством профессора Владимира Георгиевича Зубчанинова разработала рецепт нового огнеупорного материала, в котором испытывали острую нужду металлургические цеха ленинградских заводов.

Здесь самое время упомянуть выдающихся выпускников Политехнического института — создателя лучшего танка Второй мировой войны — Т-34 — Михаила Ильича Кошкина, а также авиаконструкторов мирового уровня Олега Константиновича Антонова и Николая Николаевича Поликарпова, сыгравших одну из ключевых ролей в разгроме фашистской Германии.

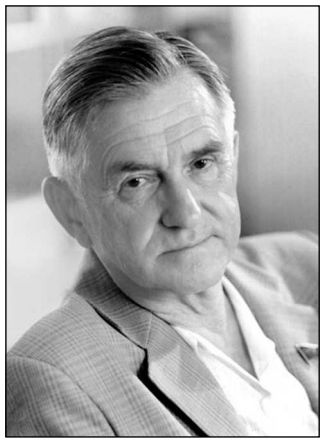
15 политехников были удостоены звания Героя Советского Союза, некоторые из них — посмертно.

Особое место в истории нашего вуза занимают 60–70 годы.

В этой связи невозможно не упомянуть Тараса Николаевича Соколова — руководителя Опытно-конструкторского бюро при ЛПИ (ОКБ «Импульс») и главного конструктора автоматизированной системы управления Ракетными войсками стратегического назначения (1961–1979), создателя уникальной системы измерения траекторных параметров искусственного спутника Земли и пилотируемых аппаратов. Им разработана оригинальная элементная база, отличающаяся исключительной надежностью (база послужила основой создания цифровых вычислительных машин «Кварц», «Темп» и др.).

Под руководством основателя и первого директора ЦНИИ РТК Е.И. Юревича впервые в нашей стране были созданы интегральные роботы с элементами искусственного интеллекта

М.И. Кошкин



О.К. Антонов

Н.Н. Поликарпов

Космический корабль «Буран»

Т.Н. Соколов

и промышленные роботы широкого применения, манипуляторы для космического корабля «Буран» и десятки типов мобильных роботов для работы в экстремальных условиях.

125 политехников были удостоены званий Героя Социалистического Труда, причем 9 из них — дважды, а 6 — трижды.

Наш университет создавался в конце XIX — начале XX веков в идеальных условиях: быстрое возведение всех его основных зданий, причем зданий специально для него спроектированных, приобретение самого лучшего оборудования того времени, приглашение в качестве преподавателей как известных, так и молодых талантливых русских ученых.

Но он не стал «замком из слоновой кости», отделившимся от остальной страны за высоким интеллектуальным забором. Судьба Политехнического всегда была связана с судьбой нашего государства.Поэтому небо над нашим университетом далеко не всегда было безоблачным.

Первая мировая и Гражданская войны, индустриализация и репрессии конца тридцатых, Великая Отечественная и восстановление народного хозяйства — вместе со страной мы прошли непростой путь.

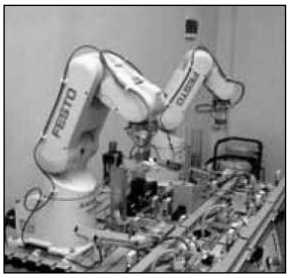
Наш университет был Санкт-Петербургским, Петроградским политехническим, Индустриальным институтом, Ленинградским политехническим институтом, Санкт-Петербургским техническим университетом, носил имена Императора Петра Великого и М.И. Калинина. Наш вуз разделяли на части и вновь воссоединяли, хотя и не полностью. Мы никогда не сдавались и шли вперед.

Сегодня, уже в статусе национального исследовательского университета, мы продолжаем и развиваем начатое нашими предшественниками.

Мы вновь строим, приобретаем уникальное оборудование, к нам приезжают выдающиеся ученые, мы вновь совершенствуем структуру университета.

Мы знаем, что наши замечательные предшественники стяжали славу отечественной науки величайшим талантом, трудом, подвигом и терпением.

Наша задача сегодня — быть достойными их светлой памяти, двигать вперед отечественные науку и образование, не посрамить высокого звания Политеховца.



Современные разработки политехников

УДК 629.78

А.Б. Железняков

КОСМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СТРАН МИРА в 2012 году

Неоднозначное впечатление оставил после себя ушедший в историю очередной «космический» год.

С одной стороны, в летопись освоения космического пространства было вписано немало ярких страниц. Это и продолжение работы на борту Международной космической станции (МКС), и прибытие на Марс марсохода «Кьюриосити» (Curiosity), и пролет китайского зонда «Чанъэ-2» мимо астероида Таутатис, и северокорейский спутник. Обо всех этих и других свершениях речь пойдет ниже.

С другой стороны, есть некий «привкус» неудовлетворенности от несбывшихся надежд, от нереализованных планов, от сохраняющейся неопределенности в выборе будущих направлений космических исследований.

Вот таким «странным» был очередной космический год, кстати, 55-й год космической эры. Правда, эта знаменательная дата была отмечена весьма скромно. Что, впрочем, нисколько не умаляет ее значение.

Но вначале, конечно, стоит вспомнить о достижениях минувшего года.

Основные события года

Продолжение работы на борту МКС

Весь 2012 год продолжалась активная работа на борту МКС. Сменявшие друг друга экипажи поддерживали работоспособность станции, проводили разнообразные исследования и эксперименты, занимались внекорабельной деятельностью, разгружали и загружали грузовые корабли.

Конечно, можно считать эту деятельность рутинной, ведь тем же космонавты занимались и в 2011 году. Но не надо забывать, что МКС функционирует в пилотируемом режиме непрерывно уже более 12 лет. Только этот факт заставляет отнести продолжение ее работы к несомненным достижением года.

А если вспомнить о научной программе, о тех исследованиях, которые ведутся на МКС, о тех экспериментах, часто уникальных, которые проводят космонавты, то ее вклад в космонавтику возрастает во много раз.

Полет китайского пилотируемого корабля «Шеньчжоу-9»

Девять лет назад Китай стал третьей державой, способной отправлять людей в космос. За эти годы было осуществлено четыре пилотируемых полета, каждый из которых был очередным шагом китайцев в деле освоения космоса. Не была исключением и миссия, состоявшаяся летом 2012 года.

Она примечательна по двум причинам.

Во-первых, впервые в ней принимала участие женщина — летчица Лю Ян. «Китайская Терешкова» отправилась на орбиту ровно через 49 лет (день в день) после первой в мире женщины-космонавта.

Во-вторых, в ходе этого полета китайцы смогли освоить технологию ручной стыковки двух космических аппаратов. Через двое суток после старта «Шеньчжоу-9» был состыкован с орбитальным модулем «Тяньгун-1». Правда, в автоматическом режиме. Космонавты перешли в научную лабораторию и в течение пяти дней работали там. Затем они возвратились в корабль, отстыковались и вновь состыковались с модулем. Теперь уже вручную.

А потом были еще пять дней напряженной работы в «Тяньгун-1», окончательная расстыковка и успешная посадка.

На 2013 год запланирован полет «Шеньчжоу-10» с тремя космонавтами (возможно,

и в этот экипаж войдет представительница прекрасного пола), которые продолжат эксперименты с модулем «Тяньгун-1» и, может быть, с модулем «Тяньгун-2», если он будет к тому времени готов.

К 2020 году Китай намерен построить на околоземной орбите собственную орбитальную станцию. Если к тому времени не будет принято решение о продолжении работ на борту МКС, а Россия не создаст собственный «орбитальный дом», то может так случиться, что китайский комплекс будет единственным форпостом землян на околоземной орбите.

Но мне кажется, что этого не произойдет. Либо МКС будет летать и дальше, либо Россия отправит свой сегмент в самостоятельный полет.

Начало коммерческой эксплуатации транспортных кораблей «Дрэгон»

Частная космонавтика уверенно завоевывает все новые и новые позиции в космосе. Безусловным лидером в этом направлении является американская компания SpaceX со своим носителем «Фалкон-9» (Falcon-9) и грузовым кораблем «Дрэгон» (Dragon).

В 2012 году состоялись два полета этого корабля. Оба прошли в рамках эксплуатации МКС.

Летом минувшего года «Дрэгон» впервые состыковался со станцией. Это была сертификационная миссия. Проверялись системы сближения и стыковки, работоспособность систем навигации и связи, навыки персонала, элементы взаимодействия Центра управления полетом (ЦУП) компании SpaceX с ЦУПами в г. Хьюстон (шт. Техас, США) и г. Королёв (Московская обл., Россия).

Полет прошел успешно, и было принято решение о начале коммерческой эксплуатации корабля. В октябре он в очередной раз отправился на орбиту уже с грузами для экипажа МКС. На обратном пути «Дрэгон» «прихватил» результаты экспериментов, которые требовали доставки их на Землю.

В целом и эта миссия прошла успешно, если не считать сбой в работе одного из двигателей первой ступени на участке выведения да потерю попутного груза.

На 2013 год запланированы очередные полеты «Дрэгона» к МКС. Американское аэрокосмическое ведомство оплатило уже более десятка таких экспедиций в ближайшие несколько лет.

Кроме того, на 2013 год запланированы и первые испытательные полеты грузового корабля «Сигнус» (Cygnus) американской компании Orbital Sciences Corporation. С помощью частников НАСА намерено полностью обеспечить грузопоток между Землей и МКС.

А частники в перспективе хотят переделать свои грузовые корабли в пилотируемые и возить на них и экипажи МКС, и туристов. Судя по тому, что им уже удалось сделать, можно предположить, что и эти свои планы они воплотят в жизнь

Прибытие на Марс американского ровера «Кьюриосити»

6 августа 2012 года на Марсе в кратере Гейла совершил посадку американский космический аппарат «Кьриосити». Спустя 16 дней ровер начал движение по поверхности Красной планеты.

Эта миссия интересна во многих отношениях начиная с процесса посадки аппарата: впервые была использована технология «небесного крана», что позволило весьма точно опустить ровер в ту точку, которая была выбрана изначально.

Принцип действия «небесного крана» довольно прост, хотя техническое воплощение сложнее, чем, например, надувные амортизаторы. После спуска посадочной ступени в атмосфере под парашютом на высоте чуть менее двух километров включались тормозные ракетные двигатели, и спускаемый аппарат замедлял свое падение. На высоте приблизительно 20 метров от поверхности задействовался «небесный кран», который с восьмиметровой высоты на нейлоновых тросах спускал «Кьюриосити» на грунт. При этом энергия соприкосновения с поверхностью была столь мала, что шасси посадочного блока полностью поглотили силу удара.

Сам ровер «Кьюриосити» значительно больше своих предшественников — «Спирит» (Spirit) и «Оппортьюнити» (Opportunity). Его масса составляет девять центнеров без одного килограмма, в том числе 80 килограммов научных приборов, предназначенных для изучения марсианской атмосферы, астрономических наблюдений, измерения уровней радиации, химического анализа грунта и т. д.

Пока ровер преодолел по марсианской поверхности не такое уж и большое расстояние — менее километра. Да и результаты его деятельности станут известны не очень скоро — собранные данные требуют тщательного изучения и анализа, на что может уйти несколько лет.

Однако кое-что «интересненькое» «Кьюриосити» уже нашел. Так, 3 декабря было сообщено об обнаружении на Марсе органических соединений. Правда, возможно, что они прилетели на Красную планету вместе с ровером. Но есть надежда, что они имеют «местное» происхождение.

И хотя органика не позволяет говорить о наличии на Марсе жизни (органика для этого — условие необходимое, но не достаточное, тем более что неизвестно, есть она там или нет), но заставит нас продолжить изучение Красной планеты. И новые открытия могут оказаться грандиознее тех, что уже сделаны, а может быть, грандиознее, чем мы можем себе представить.

Работа зонда «Доун» в поясе астероидов

Американский межпланетный зонд «Доун» (Dawn) отправился в «дальнюю дорогу» осенью 2007 года. Его первой целью стал астероид (4) Веста из Большого пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера, куда аппарат прибыл осенью 2011 года. Большая часть минувшего года была посвящена изучению этой малой планеты с орбиты искусственного спутника.

Находясь близ (4) Весты, «Доун» не только отснял всю поверхность астероида, причем с отменным качеством, но и провел анализ состава поверхности планеты, а также осуществил замеры интенсивности космического излучения. По мнению специалистов, эта информация поможет лучше изучить ранние этапы формирования Солнечной системы.

В августе 2012 года «Доун» покинул окрестности (4) Весты и перешел на траекторию полета к следующему «пункту назначения» — астероиду (1) Церера. Этой малой планеты зонд должен достигнуть в начале 2015 года.

Конечно, за годы полета может всякое случиться, но будем надеяться, что и эта задача будет «Доуном» выполнена. Уж очень хочется взглянуть вблизи еще на один внеземной пейзаж.

Зонд «Вояджер-1» приблизился к границе Солнечной системы

Миссия межпланетного (правильнее сказать — межзвездного) зонда «Вояджер-1» длится уже 35 лет. И, будем надеяться, еще далека от своего завершения.

В настоящее время зонд находится на удалении в 123 астрономические единицы (около 18,4 миллиардов километров) от Солнца. Это где-то на задворках Солнечной системы.

14 июня 2012 года аппарат вышел на границу межзвездного пространства. Его датчики зафиксировали резкий рост уровня галактических космических лучей — высокоэнергетических заряженных частиц межзвездного происхождения. Кроме того, было зафиксировано резкое снижение количества заряженных частиц, исходящих от Солнца. Это заставило предположить, что «Вояджер-1» приблизился к границе Солнечной системы, хотя все еще находился внутри гелиосферы.

А в конце августа минувшего года датчики аппарата зафиксировали резкое снижение регистрируемых частиц солнечного ветра. В отличие от предыдущих подобных случаев, в этот раз тенденция к снижению сохраняется (по состоянию на конец 2012 года). Это может означать, что «Вояджер-1» оказался в межзвездном пространстве.

По расчетам специалистов, свою работоспособность «Вояджер-1» будет сохранять приблизительно до 2025 года, когда «истощатся» радиоизотопные термоэлектрические генераторы. Затем он замолчит, но продолжит свой путь к звездам.

Вступление Северной Кореи в «Большой космический клуб»

В 2012 году пополнился список космических держав — 12 декабря Северная Корея стала десятым членом «Большого космического клуба», присоединившись к России, США, Франции, Японии, Китаю, Великобритании, Индии, Израилю и Ирану.

Это была, как минимум, пятая попытка КНДР запустить свой собственный спутник, но лишь первая успешная. Все остальные пуски, в том числе и в апреле 2012 года, заканчивались авариями носителей на участке выведения.

Хотя сами северокорейцы заявили о запуске своего первого спутника еще в 1998 году, но тогда этот «спутник» никто не увидел и не услышал. Как и второй, «стартовавший» несколько лет спустя. А вот тот, который стартовал в декабре 2012 года, средства контроля зарегистрировали, и никаких сомнений в том, что КНДР «сделала это», уже не было.

И не так уж важно, что спутник, вероятнее всего, практически сразу после старта вышел из строя. Гораздо весомее сам факт, что он вышел на орбиту.

Запуск Северной Кореей спутника вызвал осуждение всего мира. В провокации Пхеньян обвинили все, кому не лень. Полагают, что под личиной космического пуска было проведено испытание межконтинентальной баллистической ракеты.

В принципе такой вариант исключить нельзя. Но более вероятно, что корейцы испытывали именно космический носитель.

Слишком это сложно — создавать сразу и носитель, и боевую ракету. Для этого необходимы весьма совершенные ракетные технологии, которыми КНДР пока вряд ли обладает.

Запуск спутника в самой Северной Корее был встречен с огромной радостью. В Пхеньяне на митинг, посвященный этому событию, пришли сотни тысяч граждан КНДР. Причем большинство пришли туда не «по призыву партии», а по велению души. Как это было и у нас в стране 55 лет назад.

Пролет межпланетного зонда «Чанъэ-2» мимо астероида Таутатис

13 декабря 2012 года китайский межпланетный зонд «Чанъэ-2» совершил пролет мимо астероида (4179) Таутатис, который сутками ранее миновал Землю. В момент максимального сближения космический аппарат и небесное тело разделяли 3,2 километра. Камерами «Чанъэ-2» сделаны великолепные снимки малой планеты с большим разрешением.

Миссия «Чанъэ-2» во многом уникальна. Аппарат был запущен в октябре 2010 года. Его основной задачей была съемка лунной поверхности с селеноцентрической орбиты.

После того, как это было успешно сделано, а ресурс аппарата позволял использовать его и в дальнейшем, было решено поместить его в точку Лагранжа L_2. Туда зонд прибыл 25 августа 2011 года и несколько месяцев проводил наблюдения и все той же Луны, и Земли, и межпланетного пространства.

А весной 2012 года было принято решение о еще одном продлении миссии. Новой целью для «Чанъэ-2» был определен астероид (4179) Таутатис, К нему космический аппарат устремился в мае того же года.

Астероид (4179) Таутатис размером 5,4 километра относится к группе Аполлона и довольно часто сближается с Землей. Китайский зонд «перехватил» его во время очередного рандеву.

«Гравитационная» миссия зондов GRAIL

Накануне нового, 2012-го года (в Москве это были уже первые часы наступившего года) на селеноцентрическую орбиту был выведен американский научно-исследовательский зонд GRAIL-A (Gravity Recovery and Interior Laboratory), вскоре переименованный в «Эбб» (Ebb), что в переводе на русский значит «отлив». Спустя сутки к нему присоединился его брат-близнец GRAIL-B, получивший собственное имя «Флоу» (Flow) — «прилив».

Первоначально планировалось, что спутники проработают на лунной орбите три месяца. Однако по истечении этого срока NASA решило продлить их миссию.

Зонды проработали на селеноцентрической орбите почти год. Большую часть данных, ими собранных, еще предстоит проанализировать. Но уже сейчас можно говорить об успехе миссии. В частности, с помощью «Эбба» и «Флоу» удалось значительно повысить точность карт лунной гравитации, что и было главной задачей полета. Это поможет при подготовке будущих высадок на спутнике Земли пилотируемых аппаратов.

А завершилась миссия 17 декабря, когда двигатели зондов были включены на торможение и они сошли с орбиты, упав на Луну близ кратера Голдшмидт на северном полюсе естественного спутника Земли. Перед своей гибелью они еще раз послужили науке — поднятое при падении облако лунного грунта было проанализировано с помощью спектрометров орбитального зонда LRO (лунный орбитальный разведчик — Lunar Reconnaissance Orbiter). Первые результаты проведенных измерений станут известны весной 2013 года.

Программа «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы»

За три дня до наступления нового года председатель правительства РФ Дмитрий Медведев подписал распоряжение, которым утвердил государственную программу «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы».

Целью принятой программы является обеспечение гарантированного доступа и необходимого присутствия России в космосе в интересах науки и социально-экономической сферы при сохранении ведущих позиций Российской Федерации в пилотируемых полетах и безусловном выполнении международных обязательств в области космической деятельности.

Программа предусматривает следующие основные задачи:

развертывание и поддержание необходимого для решения целевых задач состава орбитальных группировок отечественных космических аппаратов научного и социально-экономического назначения, включая российский сегмент Международной космической станции;

модернизацию космодромов Плесецк и Байконур, создание на территории России нового космодрома «Восточный»;

создание перспективных и модернизацию имеющихся средств выведения космических аппаратов;

создание научно-технического и технологического задела для разработки перспективных образцов ракетно-космической техники;

обеспечение международного сотрудничества в области использования космического пространства в мирных целях;

создание условий для расширения предоставляемых услуг с использованием результатов космической деятельности в интересах развития Российской Федерации и ее регионов.

Предполагается, что в этот период на нужды отечественной космонавтики будет выделено 2,1 триллиона рублей. Деньги колоссальные. Хочется надеяться, что истрачены они будут с пользой и уже в ближайшее время в России появятся и новые ракеты, и новые космические корабли, и новые наземные средства. И новых рубежей мы достигнем.

Вот такой «топ-лист» минувшего космического года.

Пилотируемые полеты

В 2012 году были запущены пять кораблей с космонавтами на борту. Четырьмя стартами «отметилась» Россия, одним — Китай. Все состоявшиеся полеты были плановыми.

Уже не первый год Россия исправно доставляет на борт Международной космической станции экипажи очередных длительных экспедиций, обеспечивая непрерывное функционирование «орбитального дома». Так было в минувшем году, так будет и в наступающем году. «Помощники» и «сменщики» российского «Союза» пока только в планах.

Полет китайского космического корабля состоялся по программе строительства национальной орбитальной станции. Сам комплекс будет готов к 2020 году, а на «Шеньчжоу-9» отрабатывались очередные необходимые для его создания технологии — ручная стыковка, переход из корабля в лабораторный модуль, работа в модуле и так далее.

Конечно, эти технологии уже не новы — Россия и Америка освоили их почти полвека назад. Но для Китая-то все это в новинку.

В цифрах же 2012-й год выглядит так:

На околоземной орбите побывал 21 космонавт — на 13 человек меньше, чем годом раньше. Перестали летать многоместные «Шаттлы», а «трудяге» «Союзу» обеспечить былой пассажиропоток не под силу.

Из работавших в 2012 году на орбите космонавтов девять имели российское гражданство, шестеро — американское, трое — китайское, по одному — голландское, японское и канадское.

В 2012 году в космосе побывали пять «новичков»: трое россиян и двое китайцев. Вновь, как и годом ранее, среди тех, кто впервые направлялся на орбиту, не было американцев.

Среди тех, кто летал в 2012 году, были всего две женщины: американка Суннита Уильямс и китаянка Лю Ян. Это значительно меньше, чем в предыдущие годы.

На 2013 год запланирован полет только американки Карен Найберг (Karen Nyberg). Есть вероятность, но очень маленькая, что и полет китайского корабля «Шеньчжоу-10» пройдет с участием женщины. Но здесь, как говорится, уж «как карты лягут».

Шесть космонавтов — россияне Антон Шкаплеров, Анатолий Иванишин и Олег Кононенко, американцы Даниэль Бербэнк (Daniel Burbank) и Дональд Петтит (Donald Pettite), голландец Андре Койперс (Andre Kuipers) — отправились на орбиту еще в 2011 году, а возвратились на Землю весной 2012 года. Еще шестеро — россияне Олег Новицкий, Евгений Тарелкин и Роман Романенко, американцы Кевин Форд (Kevin Ford) и Томас Машберн (Thomas Marshburn), канадец Крис Хэдфилд (Chris Hadfield) — встретили наступление 2013 года на околоземной орбите. Их возвращение на Землю запланировано на следующую весну.

Общий «налет» в 2012 году составил 1936,5 чел.-дн. (5,3 чел.-лет). Это на 107,3 чел.-дн. меньше (– 5,5 %), чем в 2011 году. Снижение несущественное, но уже происходит второй год подряд. Если бы не китайцы, было бы еще меньше.

А всего за период с 1961 по 2012 год включительно земляне пробыли в космосе 112,5 чел.-лет.

По состоянию на 1 января 2013 года в орбитальных космических полетах приняли участие 527 человек из 35 стран. Из числа летавших в космос — 471 мужчин и 56 женщин.

В 2012 году было выполнено 5 выходов в открытый космос — ровно вдвое меньше, чем в предыдущий год. Если бы не внеплановая работа за бортом МКС Сунниты Уильямс и Акихико Хосиде 1 ноября, внекорабельная деятельность ограничилась бы четырьмя «прогулками за борт».

В минувшем году в открытом космосе работали 6 человек (в 2011 году — 11 человек, в 2010 году — 14, в 2009 году — 21, в 2008 году — 20).

Американка Суннита Уильямс и японец Акихико Хосиде по три раза покидали борт станции. Четверо россиян «отметились» одним выходом.

Кстати, Суннита Уильямс установила мировые рекорды среди женщин и по общему количеству выходов (теперь на ее счету их семь), и по общей продолжительности пребывания в открытом космосе — 50 часов 40 минут.

Общая продолжительность пребывания космонавтов в открытом космосе в 2012 году составила 2 дня 18 часов 58 минут. По сравнению с предыдущим годом — уменьшение в два раза.

Все совершенные выходы в открытый космос проводились по программе работ на борту МКС.

Запуски космических аппаратов

В минувшем году в различных странах мира стартовали 76 ракет-носителей, целью которых был вывод на околоземную орбиту полезной нагрузки различного характера. 74 пуска были успешными, один — частично-успешным, а один, в КНДР, завершился аварией.

Число запущенных в 2012 году носителей по сравнению с предыдущим годом уменьшилось на 8 единиц (на 9,53 %). После практически стабильного ежегодного роста, который наблюдался в предыдущие семь лет (с небольшими флюктуациями), это первое снижение количества запусков.

Однако не стоит на этом заострять внимание. В конце концов, активность на космических просторах определяется не количеством запущенных ракет, а теми результатами, которые были получены во время состоявшихся миссий.

Уровень аварийности РН при космических запусках в 2012 году составил 1,31 %, что является лучшим показателем за несколько последних лет.

Как уже было сказано, при подсчетах не учитываются аварии в Иране, подтверждения которым нет. Иначе цифры были бы иными. Но не шокирующими воображение.

Правда, стоит обратить внимание, что аварии произошли в тех странах, которые совсем недавно вступили в «Большой космический клуб» — Иране и Северной Корее.

Впрочем, для любой космической державы характерны неудачи на ранних этапах их космической деятельности. Это пришлось испытать и отечественной космонавтике, и американской, и китайской. Да и у всех остальных стран в первые годы освоения космического пространства число удачных пусков часто бывало равно числу аварий.

А вот у ведущих космических держав уровень аварийности в 2012 году оказался нулевым — все ракеты, запущенные в России, США, Китае, Японии, Индии, Европе, достигли космоса.

Как и все последние годы больше всего запусков выполнила Россия — 24 пуска (31,58 %).

С учетом пусков по программам Sea Launch и ««Союз» в Куру» это число увеличивается до 29 (38,15 %).

По сравнению с 2011 годом пусковая активность России существенно снизилась (на 8 пусков, то есть на 25 %). При учете пусков по двум вышеупомянутым программам цифры чуть-чуть лучше — уменьшение на 6 пусков, то есть на 17,15 %.

По сравнению с предыдущим годом уменьшился уровень аварийности. Все стартовавшие российские носители успешно вывели космические аппараты на орбиту. Правда, дважды подводили разгонные блоки «Бриз-М» (в августе и в декабре). Но тенденция положительна и обнадеживает.

Но вновь упало число пусков отечественных РН, осуществленных в рамках национальной программы. В 2012 году их было всего четыре. Кроме того, во время трех пусков по коммерческим программам на орбиту, кроме зарубежных спутников, выводились и российские космические аппараты.

Восемь российских пусков состоялись по программе МКС.

Все прочие старты, в том числе с плавучей платформы Odyssey и из Куру, осуществлялись по коммерческим контрактам.

На втором месте по числу запущенных ракет прочно обосновался Китай. В 2012 году, как и годом раньше, в Поднебесной было запущено 19 ракет. Причем все старты были успешными.

Кстати, по итогам первого полугодия Китай впервые в истории занял первое место по пусковой деятельности. Правда, во втором полугодии «все встало на свои места», и в лидеры выбилась Россия. Однако хоть и временно, но лидировали китайцы.

Увеличилось в Китае число пусков по коммерческим контрактам. В 2012 году китайскими носителями были запущены люксембургский, венесуэльский и турецкий спутники. Но основное место Китай по-прежнему уделяет национальной космической программе.

США второй год подряд занимают третью строчку в пусковой активности — 13 стартов (уменьшение по сравнению с 2011 годом на 27,8 %, но, судя по всему, не особо расстраиваются. Все свои нужды они удовлетворяют с помощью «коммерсантов». Да и потенциал у американцев никуда не делся — при необходимости они могут резко усилить свою пусковую активность.

А помочь в этом им могут частники. В 2012 году было два запуска носителя «Фалкон-9» компании SpaceX. В ближайшие годы к ней присоединятся другие компании. Тогда и статистика у американцев улучшится.

Говоря о пусковой деятельности стран мира, стоит отметить также и увеличение количества запусков, которые относятся на счет консорциума Arianespace.

На рынок коммерческих запусков возвращается компания Sea Launch. В минувшем году с морской стартовой платформы Odyssey состоялись три старта — ровно в три раза больше, чем в 2011 году. В абсолютных числах, конечно, прирост не столь значителен, всего + 2, но относительные величины «завораживают».

В результате пусков РН в 2012 году на околоземную орбиту были выведены 135 космических аппаратов. Это на 4 спутника больше, чем в 2011 году.

В это число включены и шесть небольших спутников, которые были запущены с МКС.

Один спутник — первый экземпляр северокорейского космического аппарата «Кванменсон-3» — был утерян в результате аварии. При дальнейшем анализе этот КА также учитывается в общих подсчетах.

Лидерство по этому показателю по-прежнему за Россией. Что и естественно — больше всего запускаем ракет, больше всего выводим спутников на орбиту. Но по сравнению с рядом предыдущих лет лидерство неявное.

С российским показателем сравнимо число космических аппаратов, которые запустили США, Китай и европейцы. Даже если учесть спутники, которые были запущены в рамках проектов Sea Launch и ««Союз» в Куру», подавляющего превосходства, как в 2011 году, не получается.

У других стран количество запущенных спутников исчисляется единицами. Каким-либо образом анализировать их показатели особого смысла не имеет.

Если же говорить о национальной принадлежности выведенных на орбиту космических аппаратов, то картина будет немного отличаться от показателей пусковой деятельности.

По числу принадлежащих им космических аппаратов лидерство, как и все последние годы, за США. Но отрыв от Китая и России незначителен. Хотя Россия впервые по интенсивности пополнения своей спутниковой группировки «ушла» на третье место, пропустив вперед Китай.

При запусках КА в 2012-м году были использованы ракеты-носители 19 типов.

В целом картина использования РН различных типов осталась прежней. В лидерах — российские «Союзы» и «Протоны». В списке «крепких середнячков» — китайские носители семейства «Чанчжэн» («Великий поход»), американские «Атласы» (Atlas) и «Дельты» (Delta), а также европейские «Арианы» (Ariane).

Из важных моментов, относящихся к носителям, надо отметить начало летных испытаний европейской ракеты-носителя «Вега» (Vega) и первый успешный пуск северокорейской ракеты «Ынха-3». Все прочие носители летали и раньше.

И еще одно замечание. По-прежнему в перечне ракет-носителей отсутствует российская «Ангара», начала летных испытаний которой ждут уже давно. А «воз пока и ныне там», т. е. как не было «Ангары», так и нет.

В качестве стартовых площадок в 2012 году было использовано 14 космодромов. Новым в этом ряду можно считать только северокорейский космодром Сохэ, с которого были запущены две ракеты. Но ракетные пуски с него проводились и ранее.

По-прежнему мировым лидером по числу пусков остается арендованный Россией космодром Байконур в Казахстане — 21 пуск. Но его «доля» продолжает неуклонно снижаться. Если в 2010 году 32,43 % всех пусков в мире происходило с Байконура, то в 2011 году эта «доля» снизилась до 28,57 %, а в 2012 году — до 27,63 %.

Но, все равно, это в два раза больше, чем у «ближайших преследователей», космодромов Канаверал, Сичан и Куру. Кстати, пусковая активность на последнем год от года неуклонно возрастает. Это связано с тем, что консорциум Arianespace теперь располагает полной линейкой РН: тяжелой Ariane-5, средней — «Союз-СТ», легкой — Vega. Несомненно это приведет к росту заказов на пусковые услуги и, следовательно, к росту загруженности космодрома Куру.

Неплохие перспективы и у морской стартовой платформы Odyssey. Но это только в том случае, если маркетинговая политика компании Sea Launch будет достаточно эффективной и обеспечит компанию заказами на пусковые услуги. Тогда можно будет говорить (ориентировочно) о шести пусках в год.

На межпланетных трассах

В 2012 году к другим планетам новых автоматических зондов и, тем более, пилотируемых кораблей земляне не отправили. Но продолжали активно эксплуатировать те аппараты, которые были запущены в былые годы.

Самыми яркими достижениями стало прибытие на Марс марсохода «Кьюриосити» и работа зондов «Чанъэ-2», «Доун», «Вояджер-1» и GRAIL. Об этом подробно было рассказано в первой части обзора, поэтому не буду повторяться.

Из других свершений...

В конце минувшего года кружащий по орбите вокруг Меркурия американский зонд Messenger обнаружил там лед. Весьма примечательное открытие, свидетельствующее, что вода в Солнечной системе — не редкость.

Другой американский зонд, «Кассини» (Cassini), уже девятый год работает в планетарной системе Сатурна. Его деятельность плодотворна и многогранна. Из последних сообщений: на Титане, крупнейшем спутнике окольцованного гиганта, обнаружена метановая река.

Кружат вокруг Марса американские межпланетные зонды «Марс Одиссей» (Mars Odyssey) и MRO, а также их европейский собрат «Марс Экспресс» (Mars Express). На поверхности Красной планеты пополнение — как уже было сказано, прибыл марсоход «Кьюриосити», присоединившийся к своему коллеге «Оппортьюнити» (Opportunity).

На орбите вокруг Венеры работает европейский «Венера Экспресс» (Venus-Express). В минувшем году его миссию вновь продлили.

Другой европейский межпланетный зонд «Розетта» (Rossetta), летящий к комете 67P / Чуримова — Герасименко, в 2012 году прошел самую удаленную от Солнца точку своей орбиты.

На гелиоцентрической орбите продолжают трудиться спутники STEREO, а на селеноцентрической орбите — зонд LRO.

«Медленно, но верно» летят «Нью-Горизонс» (New Horizons) — к Плутону, «Джуно» (Juno) — к Юпитеру, а «Пионеры» и «Вояджеры» — к звездам. Счастливого им пути!

Немало проектов исследования других планет находятся в стадии подготовки. Некоторые из них будут запущены в 2013 году, другие позже.

Для нас наибольший интерес представляет миссия «Экзо Марс» (ExoMars), готовящаяся Европейским космическим агентством при участии Роскосмоса. Во второй половине 2012 года между двумя космическими агентствами была достигнута договоренность о сотрудничестве. После неудачи с «Фобос-Грунтом» для нас это единственная возможность в ближайшие годы попасть на Красную планету.

Заключение

А теперь о том, чего можно ожидать от наступающего нового года.

В первую очередь, естественно, надеемся, что наступающий год не принесет нам новых проблем, а все планы будут реализованы «качественно и в срок». Это относится не только к отечественной космонавтике, но и к программам освоения космоса других стран.

Если конкретно, то ряд запланированных миссий кажутся автору весьма интересными и перспективными с точки зрения развития космонавтики.

Это и запуск в сторону Марса американского зонда MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN), задачей которого станет изучение эволюции (то есть потери) атмосферы Марса, и сам его полет.

Это и запуск китайского лунного зонда «Чанъэ-3». Впервые в Китае запланированы мягкая посадка на поверхность Луны и доставка лунохода. Если полет будет успешным, то китайцы намерены перейти к реализации следующего пункта своей лунной программы — доставке лунного грунта на Землю.

Это и полет российского биологического спутника «Бион-М» № 1. Подобные миссии в последние годы стали довольно редким явлением. И не только в России, но и в других странах. Посему к ним повышенное внимание.

Это и новые полеты по программе МКС — российских пилотируемых «Союзов» с очередными экипажами длительных экспедиций и коммерческие рейсы американских «грузовиков» «Дрэгон» и «Сигнус».

Это и полет китайского пилотируемого корабля «Шеньчжоу-10» с тремя космонавтами на борту.

Это и первый пуск новой японской ракеты-носителя «Эпсилон», о возможностях которой мало что известно.

Это и новые космические старты в Индии, Израиле, Иране, Северной Корее.

Это и предстоящее появление 11-й космической державы — Южной Кореи. Если, конечно, запланированный на конец января 2013 года пуск ракеты-носителя KSLV-1 окажется успешным*.

И многое-многое другое, что найдет свое отражение в обзоре за 2013 год.

Поэтому, как обычно: «До встречи через год».

* 30 января 2013 года с космодрома Наро осуществлен успешный пуск ракеты-носителя KSLV-1, созданной южнокорейскими инженерами с помощью российских специалистов. Таким образом, через полтора месяца после Северной Кореи и Южная Корея вступила в клуб космических держав, став его 11-м членом

УДК 378.1:621

Д.Г. Арсеньев, В.И. Малюгин

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ГОТОВИТ КАДРЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

Одна из ключевых тенденций развития мировой атомной энергетики — экспорт ядерных технологий в страны, не владеющие ими. В первую очередь это касается бурно развивающегося региона Юго-Восточной Азии [1–3], в частности Социалистической Республики Вьетнам, одного из лидеров по темпам экономического развития. Развитие экономики Вьетнама в последние годы сопровождается ростом потребности в электроэнергии. Существующая ежегодная потребность Вьетнама в генерирующих энергетических мощностях составляет 20–25 тыс. МВт и возрастает каждый год на 10–15 % [4]. По прогнозам специалистов, Вьетнам окажется в серьезной ситуации дефицита электрической мощности (каждый год этот дефицит составляет около 800–1300 МВт).

Решение проблемы энергетической безопасности руководство Вьетнама видит в развитии наукоемких технологий, прежде всего в развитии атомной электроэнергетики [5, 6]. Сформирована стратегия развития атомной электроэнергетики, управления атомными электростанциями и их эффективной эксплуатации. Подписан закон об атомной энергетике и нормативные документы об основных направлениях развития электроэнергетики Вьетнама до 2030 года [7]. При этом предполагается возрастающая роль вьетнамских предприятий и специалистов при проектировании, строительстве, монтаже, эксплуатации и обслуживании АЭС. Планируется сдать первый энергоблок АЭС в 2020 году, а к 2030 году построить 14 ядерных реакторов чтобы покрыть по крайней мере 10 % мощностей от предполагаемого общего спроса на 112 ГВт. К участию в программе развития вьетнамской атомной энергетики привлечен ряд стран, в том числе и Российская Федерация. Президентами России и Вьетнама в 2010 году подписано межправительственное соглашение о российском участии в строительстве первой вьетнамской АЭС [8].

Одним из условий реализации энергетической программы является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих практическим опытом в области атомной энергетики. В настоящее время наблюдается их дефицит. В связи с этим правительство Вьетнама планирует каждый год подготовку 240 специалистов в сфере атомной электроэнергетики. К 2020 году будет подготовлено 2400 специалистов, 350 бакалавров и магистров по различным направлениям атомной энергетики [9]. Открываются профильные кафедры в вузах Вьетнама, планируется выделение средств из государственного бюджета не только на обучение специалистов, но и на создание учебно-тренировочных центров по атомной электроэнергетике.

Ежегодно вьетнамские студенты направляются в зарубежные университеты, прежде всего в Россию (около 200 студентов) как страну, имеющую современные безопасные технологии атомной электроэнергетики.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, получивший в 2010 году статус Научно-исследовательского университета, рассматривает Социалистическую Республику Вьетнам как стратегического партнера. С 1959 года в Ленинградском политехническом институте началась подготовка вьетнамских специалистов, а с 1979 года — научно-техническое сотрудничество.

В рамках рабочей программы сотрудничества осуществлялись исследования и разработки

в области энергетики и гидроэнергетики, выделялись финансовые средства для оснащения лабораторий Хошиминского политехнического института — одного из ведущих вузов Вьетнама с сильной научно-технической и учебной базой.

За 50 лет сотрудничества Политехнический университет подготовил более 500 высококвалифицированных специалистов по инженерным и экономическим специальностям, занимающих сегодня высокие посты в различных областях науки, промышленности и бизнеса своей страны. В СПбГПУ защищены 2 докторских диссертации, 43 вьетнамских выпускника закончили аспирантуру и защитили кандидатские диссертации, десятки специалистов прошли стажировку. Ежегодно более 70 вьетнамских граждан обучаются в Политехническом университете по программам бакалавриата, магистратуры и аспирантуры.

Работа СПбГПУ по подготовке кадров для вьетнамской промышленности была оценена на правительственном уровне. В 2008 году СПбГПУ посетила официальная правительственная делегация СРВ во главе с президентом страны товарищем Нгуен Минь Чиетом, и университету была вручена Почетная грамота СРВ за особые заслуги в деле подготовки специалистов для СРВ. В 2009 году делегация СПбГПУ была принята Президентом Вьетнама в Ханое. В ходе встречи обсуждались задачи и перспективы российско-вьетнамского сотрудничества в образовании, науке, подготовке квалифицированных кадров.

Область сотрудничества с Социалистической Республикой Вьетнам расширяется. По решению президентов Вьетнама и России реализуется проект создания вьетнамо-российского технологического университета в г. Ханой, причем СПбГПУ является базовым вузом по подготовке вьетнамских специалистов в области «Управление и информатика в технических системах». Был разработан и передан вьетнамской стороне учебно-методический комплекс, в течение года 12 преподавателей СПбГПУ читали лекции и проводили практические занятия со студентами и преподавателями университета (рис. 1), создана учебно-научная лаборатория по курсу «Микроконтроллеры и микропроцессоры в системах управления», 8 вьетнамских преподавателей прошли стажировку в СПбГПУ.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — один из ведущих технических вузов России, в котором существуют программы высшего и дополнительного образования, охватывающие различные направле-

Рис. 1. Преподаватели СПбГПУ в университете им. Ле Куи Дона в Ханое

ния в области проектирования, строительства и эксплуатации объектов ядерной энергетики.

Для реализации учебного процесса приглашаются специалисты из ведущей проектной организации в области атомной энергетики России — «Атомэнергопроекта», специалисты в области конструирования и монтажа энергетического оборудования для атомных станций из ОАО «Силовые машины», ОАО «Ижорские заводы», ученые ведущих научно-исследовательских институтов, в числе которых Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова, Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И.И. Ползунова. Практические занятия, семинары и лабораторные работы проводятся на специализированных стендах СПбГПУ и института ядерной энергетики (филиал СПбГПУ при Ленинградской атомной электростанции, г. Сосновый Бор).

Накоплен большой опыт в разработке и поддержании образовательных программ в области ядерной энергетики и энергетического строительства. В направлении дополнительного образования идет активная разработка программ повышения квалификации в области проектирования и строительства технически сложных, особо опасных и уникальных объектов [10], в том числе и атомных электростанций. Программа переподготовки «Строительство и проектирование энергетических объектов» была разработана для сопровождения строительства АЭС «Белене» в Болгарии. СПбГПУ является членом болгарской ассоциации «Bulatom».

Ученые институтов энергетики и транспортных систем, инженерно-строительного и ряда других активно работают в научно-исследовательских, проектных и строительных работах на атомных станциях России и зарубежных стран.

В ноябре 2012 года в Ханое проходила международная конференция «Подготовка кадров для атомной отрасли Вьетнама: опыт и перспективы». Ее организаторами с вьетнамской стороны стали Министерство образования и подготовки кадров Вьетнама, госкорпорация Росатом, Ханойский университет науки и технологии, Российский центр науки и культуры «Россотрудничество» (рис. 2).

К конференции была приурочена выставка российских вузов «Российское высшее образование в области ядерной энергетики» (рис. 3).

Эти события широко освещались на центральном телевидении и в прессе СРВ. В выставке

Рис. 2. Доклад проректора СПбГПУ профессора Д.Г. Арсеньева на конференции «Подготовка кадров для атомной отрасли Вьетнама: опыт и перспективы».

На фото в центре (справа налево): советник Посольства РФ во Вьетнаме, замминистра Министерства образования и подготовки кадров СРВ тов. Буй Ван Га, директор РЦНК А.Ю. Лавренев, руководитель проекта по межвузовскому взаимодействию Корпоративной академии ГК «Росатом» А.Д. Пономаренко

Рис. 3. Стенд СПбГПУ на выставке «Российское высшее образование в области ядерной энергетики» в Российском центре науки и культуры в Ханое

и конференции приняли участие университеты, входящие в консорциум «Опорные вузы Росатома» и готовящие специалистов в области ядерной энергетики. Состоялись встречи и обсуждение перспектив сотрудничества представителей российских вузов и ведущих вузов Вьетнама в области атомной энергетики. Принято решение о создании совместных программ подготовки специалистов (рис. 4).

По итогам конференции и выставки были достигнуты соглашения между российскими вузами и корпорацией «Росатом» об участии в под-

Рис. 4. В лаборатории ядерной физики Ханойского политехнического университета

готовке специалистов для атомной отрасли Вьетнама. Предполагаются как программы высшего образования (преимущественно магистратура), так и повышение квалификации вьетнамских специалистов. В настоящее время в СПбГПУ готовятся программы пяти курсов на английском языке для подготовки вьетнамских специалистов.

Таким образом, можно сделать вывод, что участие российских вузов в реализации масштабной программы создания атомной индустрии Вьетнама будет способствовать повышению имиджа российского образования и укреплению связей между нашими государствами, а развитие международного сотрудничества СПбГПУ с вьетнамскими партнерами внесет реальный вклад в решение геополитических и экономических задач. Следует также отметить, что сотрудничество университетов и научных центров Вьетнама и России находит серьезную поддержку со стороны правительств СРВ и РФ и может опираться на большую армию специалистов и руководителей, получивших образование в России. Развитие отношений с Вьетнамом в области образовательной и научной деятельности востребованно и перспективно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ключанская, С.А.** Перспективы сотрудничества России и стран Юго-Восточной Азии в стратегических областях [Текст] / С.А. Ключанская // Индекс безопасности.— 2011. Т. 17, № 2.— С. 55–85.

2. **Sudarsono, B.** South-East Asian prospects for nuclear power [Текст] / B. Sudarsono, D. Weisser // International Journal of Global Energy.— 2008. Vol. 30, Issue 1–4.— P. 249–263.

3. **Tashimo, M.** Role of nuclear energy in environment, economy, and energy issues of the 21st century— Growing energy demand in Asia and role of nuclear [Текст] / M. Tashimo, K. Matsui // Progress in Nuclear Energy.— 2008. Vol. 50, Issue 2–6.— P. 103–108.

4. Национальная стратегия по развитию атомной отрасли экономики Вьетнама до 2030 года [Текст] / Утверждена постановлением Правительства Вьетнама от 17.06.2010 г.

5. Закон об атомной энергетике Социалистической Республики Вьетнам [Текст] / 01.01.2009.

6. **Митенков, Ф.М.** Реакторы на быстрых нейтронах и их роль в становлении «большой» атомной энергетики [Текст] / Ф.М. Митенков // Экономические стратегии.– 2004. № 8.— С. 42–46.

7. Закон об атомной энергетике Социалистической Республики Вьетнам [Текст] / 01.01.2009.

8. Соглашение между Правительством РФ и Правительством СРВ о сотрудничестве в сооружении атомной электростанции на территории СРВ [Текст] / 31.10.10.

9. Подготовка и развитие специалистов по атомной электроэнергетике на период до 2020 г. [Текст] / Утверждено постановлением Правительства Вьетнама от 18.08.2010 г. № 1558.

10. **Арсеньев, Д.Г.** Международное сотрудничество в строительном образовании и науке [Текст] / Д.Г. Арсеньев, Н.И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений.— 2012. № 2.— С. 1–5.

УДК 620.9:597

Х.А. Фам, В.А. Рассохин, К.Д. Андреев

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

Современное состояние энергетики

Вьетнам обладает значительными возможностями для развития электроэнергетики, располагая крупными запасами нефти, газа, угля и гидроэнергетических ресурсов. Вьетнам хорошо обеспечен ресурсами топливных полезных ископаемых — запасы нефти в стране составляют 600 млн т, природного газа — 620 млрд м^3, угля — 150 млн т. За последние 10 лет доказанные запасы нефти и газа выросли в три раза [1].

Мощность вырабатываемой электроэнергии возросла с 2161,7 МВт в 1991 году до 21250 МВт в 2010-м [2]. Основные производители электрической энергии — гидроэлектростанции (ГЭС), тепловые электростанции с паротурбинными блоками, работающими на угле, и с комбинированными газопаротурбинными установками (все — ТЭС) (рис. 1). Небольшой дефицит электрической энергии покрывается за счет импорта.

Гидроэлектростации. В развитии современной экономической ситуации во Вьетнаме ключевую роль играет энергетика, в первую очередь — гидроэнергетика. Гидроэнергетический потенциал Вьетнама оценивается в 84 ТВт/год, что немногим меньше суммарного потребления электроэнергии в стране (99,5 млрд кВт·ч в 2010 году). На ГЭС приходится около 30 % установленных мощностей и около 40 % объема производства электроэнергии в стране. Реализуются крупные проекты по строительству ГЭС: Шон-ла (2400 МВт, ввод в 2013-м), Срепок-3 и Срепок-4 [3].

На территории Вьетнама действуют большое количество малых ГЭС. По состоянию на 2010 год в стране насчитывалось 500 ГЭС мощностью 0,1–10 МВт (суммарная мощность 1400–1800 МВт), 2500 ГЭС мощностью 5–100 кВт (суммарная мощность 100–150 МВт). На разной стадии реализации находится более 300 проектов малых ГЭС суммарной мощностью 3,44 ГВт [1].

Крупнейший в Юго-Восточной Азии гидроузел «Хоабинь» включает в себя уникальную подземную гидроэлектростанцию мощностью 1920 МВт с восемью гидроагрегатами мощностью по 240 МВт, вырабатывающую 8,16 млрд кВт·ч электроэнергии в год. Гидроэлектростанция занимает важное место в экономическом развитии страны, обеспечивая около трети всей потребности Вьетнама в электроэнергии. Кроме того, ГЭС «Хоабинь» играет главную роль в регулировании уровня воды в реках на севере страны, решает такие задачи, как ликвидация паводков, орошение северных сельскохозяйственных районов, водоснабжение. Кроме ГЭС «Хоабинь» на территории Вьетнама действуют еще несколько крупных ГЭС: «Лай Чау» (1200 МВт); «Яли» (720 МВт); «Чиан» (420 МВт); «Даи Нинх» (300 МВт) [2, 3].

Ветряные электростанции. В сфере ветроэнергетики на территории Вьетнама есть один действующий объект — ветропарк в провинции Бинх Тхуан. Он состоит из 20 ветрогенераторов суммарной мощностью 1,5 МВт. На разных этапах реализации находятся еще 42 проекта ветряных электростанций мощностью от 6 до 150 МВт [1].

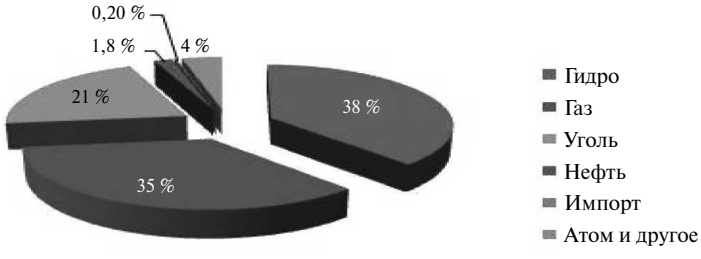


Рис. 1. Источники электроэнергии во Вьетнаме (2010 г.)

Тепловые электростанции (рис. 2). Уголь — основной вид энергетического сырья во Вьетнаме. За 2000–2011 годы добыча угля во Вьетнаме выросла в четыре раза и достигла 44,5 млн т, а потребление — 21,6 млн т. Экспорт угля (24,4 млн т в 2011 году) направлен преимущественно в КНР. Большая часть угля внутри страны используется в электроэнергетике. Планируется существенно нарастить потребление угля (к 2020 году — до 67 млн т только в электроэнергетике), что уже к 2015 году превратит Вьетнам в его нетто-импортера [1]. Общая мощность угольных электростанций (УЭС) во Вьетнаме достигла в 2010 году 4500 МВт. По состоянию на 2010 год в стране насчитывалось 11 угольных электростанций: «Фа Лай» (1040 МВт), «Уонг Би» (400МВт), «Нинх Бинх» (300 МВт) [3].

Из-за высокого внутреннего спроса на электроэнергию Вьетнам планирует построить 13 крупных угольных электростанций в течение семи лет: «Винь Тан» (1200 МВт), «Дайен Хай)» (1200 МВт), «Хаи Фонг» (4×600 МВт). Общая мощность новых электростанций составит около 13000 МВт [3].

Комбинированные газопаротурбинные установки (КГПТУ) получили развитие в ряде областей промышленности мира, особенно в электроэнергетике и в судовой энергетике. В последние годы газотурбинные и газопаровые установки (ГТУ и ГПУ) заняли важное место в электроэнергетике. Вследствие того, что доля газа в топливном балансе мира высока (более 60 %), внедрение высокоэффективных газопаровых технологий является общепризнанной стратегией развития тепловой энергетики [4]. Многие страны применяют КГПТУ с утилизационными котлами для новых электростанций, работающих на природном газе. Сейчас их КПД уже достиг 52–54 %, а в ближайшей перспективе возрастет до 58–60 %. Например, созданы морские КГПТУ на базе газотурбинных двигателей второго поколения (Россия) и четвертого поколения (США). Новая ГТУ V94.3 фирмы Siemens мощностью 240 МВт при частоте в сети 50 Гц имеет КПД 38 %. Использование уходящих газов ГТУ с температурой 562 °С и расходом 610 кг/с обеспечит работу КГПТУ с паротурбинной установкой трех давлений и промперегревом на начальные параметры пара 10,5 МПа/550 °С с КПД на уровне 58 % [5].

Добыча природного газа во Вьетнаме растет быстрыми темпами и полностью идет на внутреннее потребление. За 2000–2011 годы добыча выросла в 7 раз и достигла 8,9 млрд м^3. Основная часть газа используется в электроэнергетике: в 2010-м ТЭС на газе обеспечили 50 % производства электроэнергии и 34 % установленных мощностей.

Именно природный газ служит основным видом топлива для комбинированных электростанций с турбоустановками утилизационного типа.

В табл. 1 указаны действующие комбинированные электрические станции Вьетнама на базе газотурбинных установок производства компаний Siemens и General Electric, характеристики которых приведены в табл. 2.

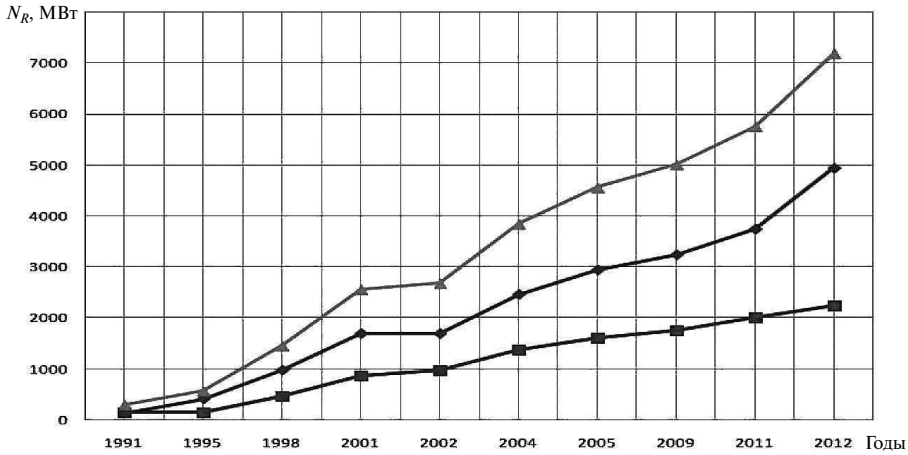


Рис. 2. Установленная электрическая мощность ТЭС во Вьетнаме
(—ГТУ; — ПТУ; — суммарное)

Таблица 1

Действующие комбинированные электростанции Вьетнама [1]

Название станции	Эффективная мощность, МВт			Используемое топливо	
	ГТУ	ПТУ	Всего	Природный газ	Дизтопливо
Ба Риа	2×23,4 6×37,5	1×58 1×59,1	388,9	+	–
Фу Ми 1	3×240	1×390	1090	+	+
Фу Ми 2.1	2×144	1×160	448	+	+
Фу Ми 2.1МР	2×138	1×160	436	+	+
Фу Ми 4	2×145	1×160	450	+	+
Фу Ми 2.2	2×240	1×235	715	+	+
Фу Ми 3	2×240	1×236,8	716,8	+	+
Нхон Чах 1	2×150	1×150	450	+	+
Нхон Чах 2	1×250 1×250	1×250	750	+	+
Ка Мау 1	2×292	1×116	750	+	+
Ка Мау 2	2×292	1×116	750	+	+
Тху Дык	1×16 1×10 1×34 1×34	1×33 1×60 1×60	247	+	–
Всего	4947,8	2243,9	7191,7	+	+

Таблица 2

Основные характеристики ГТУ, работающих на комбинированных электростанциях

Наименование станции	Модель	Мощность, МВт	КПД, %	Температура газа при входе в ГТУ, °С	Температура газа при выходе из турбин, °С	Степень повышения давления	Топливо (газообразное/жидкое)
Фу Ми 1	M701F	270	38,2	1350	538	17	Газ/ж
Фу Ми 2.1	V94.2	157	34,4	1075	544	11,8	Газ/ж
Фу Ми 4	GT13E2	165	35,7	1343	524	15	Газ/ж
Нхон Чах	GT26	289,1	39,1	1234	615	33,4	Газ/ж
Ка Мау	SGT5–4000F	286,6	39,5	1315	577	17,9	Газ/ж

Перспективы развития энергетики Вьетнама

Для выработки электрической энергии предлагают использовать как альтернативные источники для покрытия пиковых нагрузок при электрификации отдаленных районов страны, так и традиционные, но новые для Вьетнама, источники для выработки базовой нагрузки.

Институт «Гидропроект» занимается оказанием консультационных услуг по подготовке рабочих чертежей для гидроузла «Шон-ла» [2]. ГЭС строится на реке Да во Вьетнаме. В состав основных сооружений гидроузла входят гравитационная плотина из укатанного бетона высотой 138 м, водосливная двухъярусная плотина, имеющая шесть поверхностных пролетов и 12 донных отверстий, здание ГЭС приплотинного типа с отводящим каналом и КРУЭ 550 кВ. Ввод первого агрегата — в конце 2010 года. Это крупнейшая ГЭС в Юго-Восточной Азии, ее проектная мощность составляет 2400 МВт (при уровне воды 215 метров), а производительность в среднем 10,2 млрд кВт·ч в год. Кроме этого Вьетнам планирует построить 19 ГЭС общей мощностью 4200 МВт.

Правительство Вьетнама одобрило строительство первой в стране геотермальной электростанции мощностью 25 МВт. Она будет расположена в районе Дакрон провинции Куангчи. Hot Dry Rock (HDR/ Расширенные геотермальные системы/ EGS) будут использоваться для извлечения тепла из подземной скалы [3].

Также одобрено строительство первой в стране солнечной электростанции мощностью 5 МВт в районе Дык Хоа провинции Лонг Ан [1].

Городское руководство города Хошимин рассматривает план строительства новой ветроэлектростанции. Природный заповедник Кан Гио в пригороде Хошимина должен стать новым центром альтернативной энергетики Вьетнама. Застройщик планирует установить 125 турбин суммарной мощностью 200 МВт на участке побережья Кан Гио площадью 2000 гектаров. Ветроэлектростанция начнет вырабатывать энергию в 2014-м году. Средняя скорость ветра в Кан Гио составляет 6,5–7 метров в секунду. Это — идеальные условия для работы ветроэлектростанции. Инвестор самостоятельно построит линии электропередач, которые соединят новую электростанцию с национальной энергетической сетью Вьетнама [2].

В 2009 году Национальное собрание Социалистической Республики Вьетнам приняло резолюцию о строительстве атомной электростанции (два энергоблока установленной мощностью 1000 МВт каждый) в провинции Ниньтхуан [1]. Начало сооружения АЭС запланировано на 2014 год, ввод первого энергоблока в эксплуатацию — 2020 год. АЭС «Ниньтхуан-1» (два энергоблока с реакторными установками ВВЭР-1000) будет сооружаться по проекту АЭС поколения III+. Проект усовершенствован с учетом российских и международных стандартов и рекомендаций МАГАТЭ, а реакторы типа ВВЭР по праву считаются одними из самых надежных и безопасных в мире.

Необходимыми условиями для сокращения доли импортируемой электрической энергии и удовлетворения возрастающих потребностей в ней экономики Вьетнама являются также совершенствование и модернизация работающих и вновь возводимых ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вьетнамское энергетическое агентство [Электрон. ресурс] // Режим доступа: http://www.ievn.com.vn

2. Research report Vietnam's power sector [Электрон. ресурс] // Режим доступа: http://www.phugiasc.vn

3. General electric company of Vietnam [Электрон. ресурс] // Режим доступа: http://www.icon.evn.com.vn

4. **Серебряников, Н.И.** Энергетическая газотурбинная установка мощностью 180 МВт [Текст] / Н.И. Серебряников, А.С. Лебедев, Д.Д. Сулимов, А.А. Романов // Теплоэнергетика.— 2001. № 5.— С. 8–11.

5. **Трухний, А.Д.** Исследование работы ПГУ утилизационного типа при частичных нагрузках [Текст] / А.Д. Трухний // Теплоэнергетика.— 1999. № 1.— С. 27.

УДК 621.311

Д.Н. Гармидер, В.А. Фомин

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

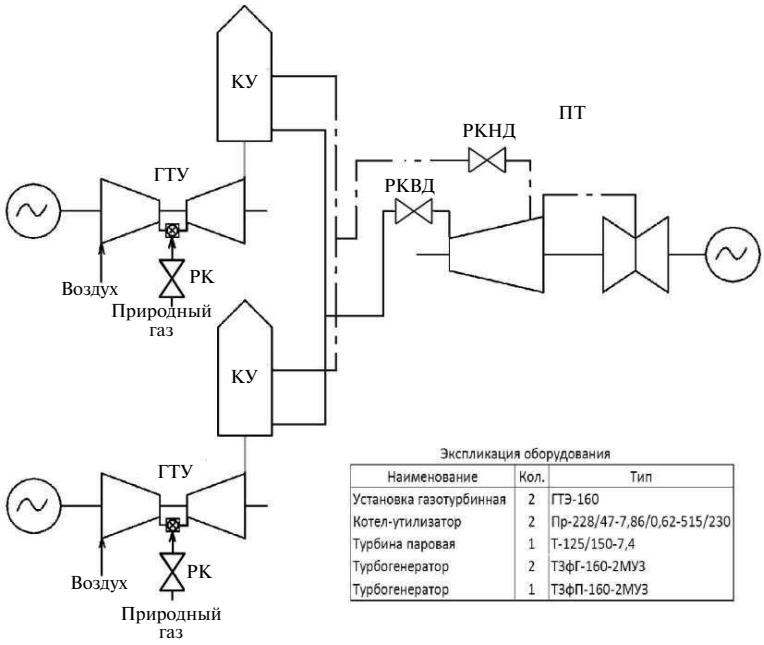
Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2020 года» развитие электроэнергетики в европейской части России происходит за счет реализации ПГУ — установок парогазового цикла (строительство новых ПГУ и техническое перевооружение действующих ТЭС с замещением паросиловых установок на парогазовые). Примером тому может послужить планируемый ввод в эксплуатацию в конце 2012 года парогазового энергоблока ПГУ-450Т на Правобережной ТЭЦ-5 ОАО ТГК-1 в Санкт-Петербурге.

В результате технического перевооружения в структуре энергосистем европейской части России возрастает доля парогазовых энергоблоков, и становится актуальным вопрос их участия в противоаварийном управлении генерирующей мощностью. В различных режимных ситуациях для предотвращения аварий в энергосистеме может потребоваться импульсная разгрузка турбин с последующим восстановлением или ограничением мощности.

Разработана динамическая модель энергоблока, которая позволяет графически отобразить динамику переходных процессов в аварийных режимах при различных возмущениях. В ней каждый элемент установки представлен уравнениями, характеризующими его поведение при переходных процессах.

Расчетная схема энергоблока представлена на рис. 1 [1]. Энергоблок построен по схеме «дубль-блок» и включает в себя две газотурбинные установки (ГТУ) ГТЭ-160 с котлами-утилизаторами типа П-90 и одну паровую турбину (ПТ) типа Т-150. Котлы-утилизаторы — двухконтурные. Паровая турбина двухцилиндровая, рассчитана на прием пара двух давлений.

В качестве основного исследуемого режима работы был принят режим зимнего максимума нагрузки энергоблока. Структура тепловой схемы ПГУ может быть изменена. Например, одна ГТУ может быть отключена и мощность ПТ и энергоблока в целом снижена до 50 % от номинальной. Паровая турбина может работать как



Экспликация оборудования

Наименование	Кол.	Тип
Установка газотурбинная	2	ГТЭ-160
Котел-утилизатор	2	Пр-228/47-7,86/0,62-515/230
Турбина паровая	1	Т-125/150-7,4
Турбогенератор	2	ТЗфГ-160-2МУЗ
Турбогенератор	1	ТЗфП-160-2МУЗ

Рис. 1. Расчетная схема энергоблока

в конденсационном, так и в теплофикационном режимах.

Математическая модель ПГУ разработана на базе уравнений динамики ее основного оборудования.

Для описания переходных процессов в ГТУ использованы уравнения ротора, мощности и автоматической системы регулирования (АСР) [4].

Котел-утилизатор рассмотрен как обогреваемый объем с пароводяным теплоносителем, к которому подводится теплота выхлопных газов ГТУ. Паровая турбина разбита на четыре отсека, границами которых являются камеры подвода пара высокого и низкого давлений и камеры отборов пара на теплофикацию. Расходы пара через отсеки описаны уравнением Стодолы — Флюгеля; промежуточные камеры рассмотрены как необогреваемые объемы.

На рис. 2 представлена схема типового контура АСР [2, 3]. Данная схема справедлива как для управления регулирующими клапанами пара высокого и низкого давлений паровой турбины, так и для управления регулирующими клапанами природного газа газовых турбин.

На вход электрогидравлического преобразователя (ЭГП) поступают два электрических сигнала: φ/δ от пропорционального регулятора скорости (РС) и x от противоаварийной автоматики энергосистемы. Выходной гидравлический сигнал ЭГП $\xi_{эгп}$ управляет положением μ сервомотора регулирующего клапана (СРК), который соответствует также и положению самого регулирующего клапана (РК).

В итоге получена система нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений для относительных переменных параметров, характеризующих режимы ПГУ при переходных процессах. Для решения данных уравнений и построения графиков переходных процессов использована программная система MathCAD.

Импульсная разгрузка турбины представляет собой быстрое уменьшение мощности турбины за счет кратковременного прикрытия регулирующих клапанов и применяется для компенсации избыточной кинетической энергии роторов агрегатов на начальной стадии переходного процесса. Кратковременная разгрузка турбины осуществляется путем подачи на ЭГП импульса прямоугольной формы от регуляторов энергосистемы. Параметры импульса характе-

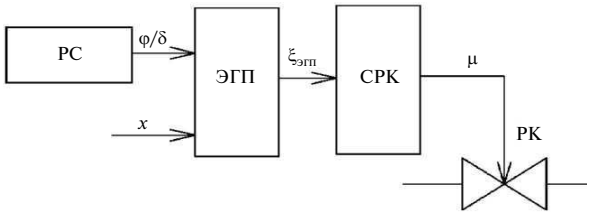


Рис. 2. Схема типового контура АСР турбин

ризуются следующими величинами: амплитудой (глубиной), которая измеряется в единицах неравномерности (сигнал амплитудой в одну неравномерность соответствует снижению нагрузки турбины на 100 %), и продолжительностью. Импульсная характеристика объекта управления представляет собой его реакцию на импульсное воздействие.

На рис. 3 представлены импульсные характеристики турбины ГТЭ-160 при подаче на ЭГП сигнала амплитудой в две неравномерности и продолжительностью 0,1 с. На рис. 3, *а* изображены импульсные характеристики системы регулирования турбины, на рис. 3, *б* — процесс изменения мощности. Через 0,12 с после подачи воздействия мощность турбины снижается на 52 %.

На рис. 4 представлены импульсные характеристики турбины Т-150 в конденсационном режиме при подаче сигнала импульсной разгрузки на ее регулирующие клапаны. На рис. 4, *а* показаны графики процессов относительных изменений расходов пара через отсеки турбины. Процессы изменения этих параметров в каждом из отсеков схожи друг с другом. На рис. 4, *б* — изменение мощности турбины. Через 0,12 с мощность турбины уменьшается на 60 %.

На рис. 5 изображены переходные процессы в паровой турбине в теплофикационном режиме. Как видно, расходы через последние отсеки турбины изменяются значительно меньше, чем в конденсационном режиме. Связано это с тем, что давление пара в проточной части турбины снижается быстрее, чем давление пара в сетевых подогревателях, поэтому поток пара в подогреватель сначала уменьшается до нуля, а затем пар из подогревателя поступает в турбину. Поступающий в турбину пар снижает скорость и глубину разгрузки отсека, следующего за отбором. В результате турбина разгружается только на 53 %.

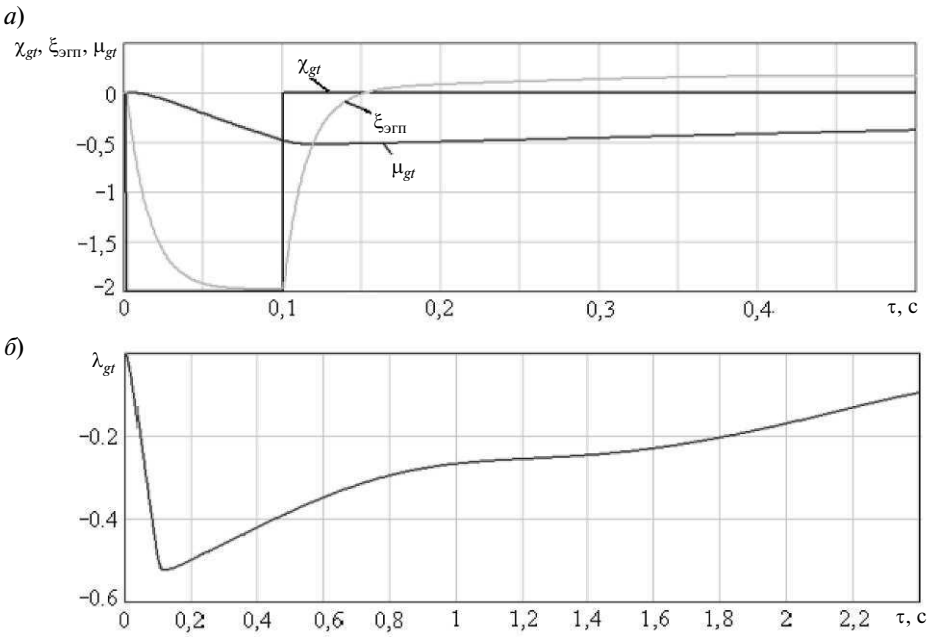


Рис. 3. Импульсные характеристики ГТЭ-160:

χ_{gt} — управляющий импульс; $\xi_{эгп}$ — сигнал ЭГП; μ_{gt} — перемещение сервомотора регулирующего клапана; λ_{gt} — изменение мощности турбины

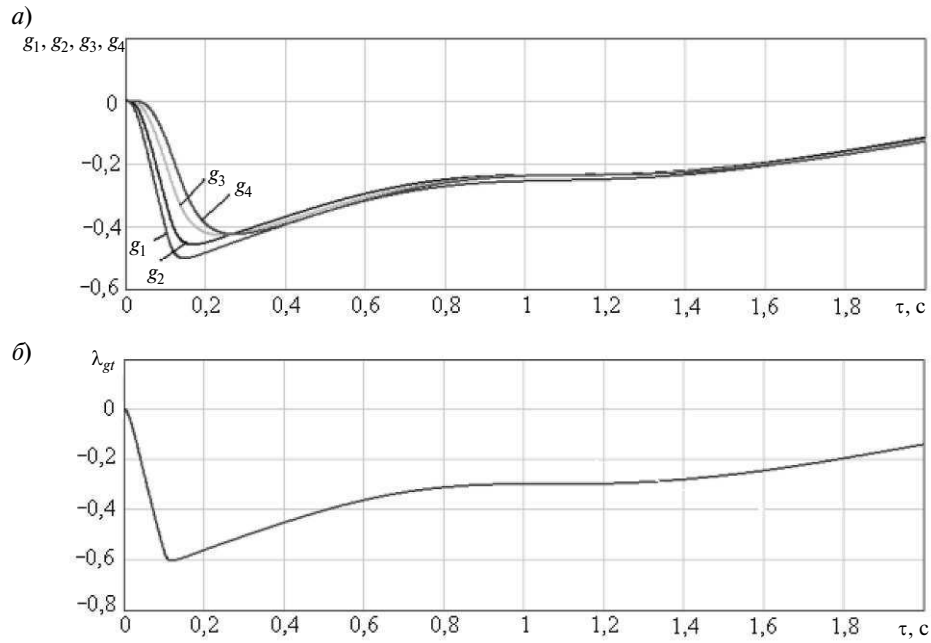


Рис. 4. Импульсные характеристики Т-125 в конденсационном режиме:

g_1–g_4 — изменения расходов пара через отсеки турбины; λ_{pt} — изменение мощности турбины

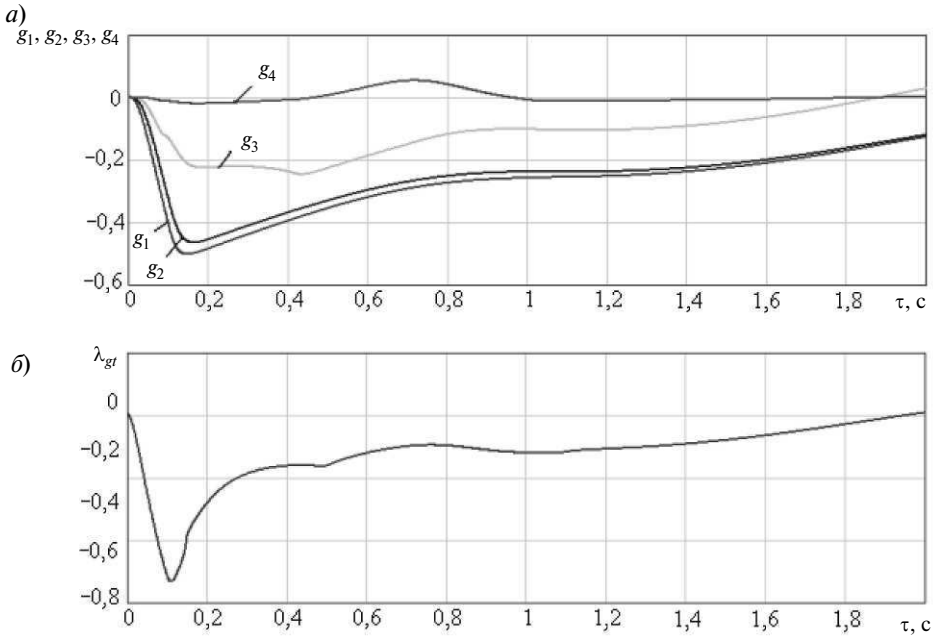


Рис. 5. Импульсные характеристики Т-125 в теплофикационном режиме:
g_1–g_4 — изменения расходов пара через отсеки турбины; λ_{pt} — изменение мощности турбины

Результаты расчетов импульсных характеристик турбин обобщены для различных параметров (А —амплитуда, $T_и$ — длительность импульса) входных импульсов от регуляторов энергосистемы и представлены на импульсных диаграммах (рис.6).

На рис. 7 показаны импульсные диаграммы для энергоблока в целом при одновременной разгрузке всех турбин для схемы с одной и двумя газовыми турбинами.

Импульсные диаграммы показывают, что глубина разгрузки турбин и всего энергоблока зависит от амплитуды и длительности входного импульса. Амплитуда импульса влияет на скорость закрытия окон золотника СРК: чем больше импульс, тем быстрее закрывается РК. Уве-

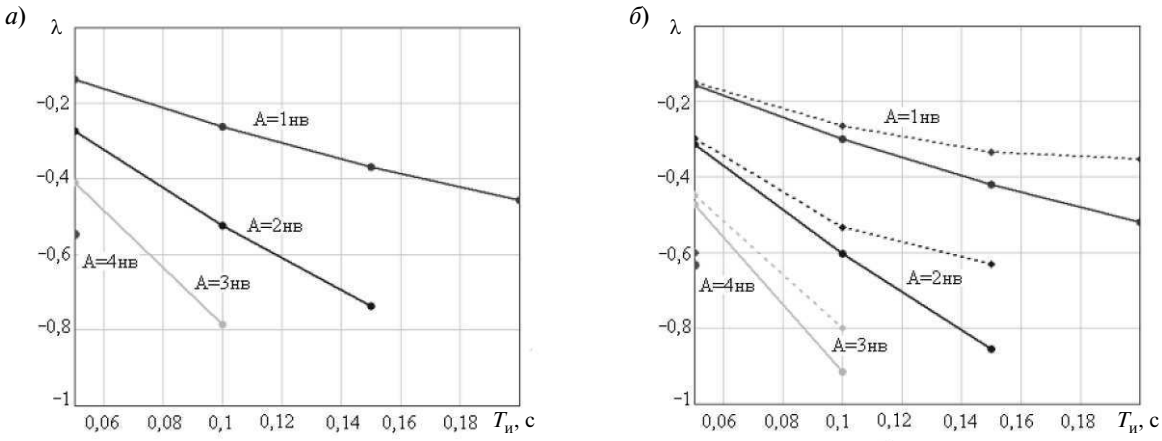


Рис. 6. Импульсные диаграммы турбин ГТЭ-160 (*а*) и Т-125/150-7, 4 (*б*):
—— конденсационный режим, --- теплофикационный режим

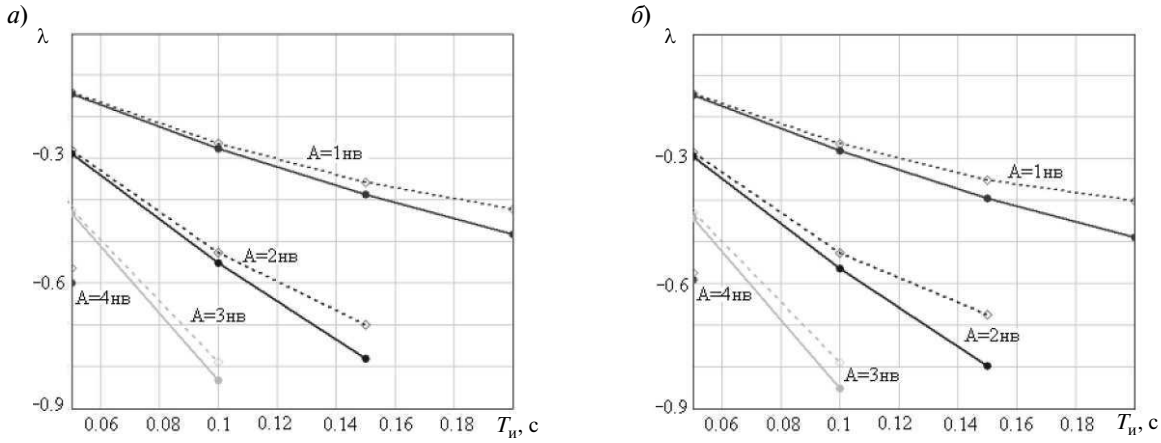


Рис. 7. Импульсные диаграммы ПГУ с двумя (*а*) и одной (*б*) ГТ:
—— конденсационный режим, --- теплофикационный режим

личение степени разгрузки агрегата зависит от длительности импульса.

На импульсных диаграммах ПГУ (см. рис. 7) показано, что максимальная глубина разгрузки энергоблока составляет 85,2 и 83,2 % в конденсационных режимах с одной и двумя работающими ГТ и 78,8 % — в теплофикационных режимах при импульсном воздействии с амплитудой, равной трем неравномерностям (3 нв), продолжительностью 0,1 с. При использовании более длительного сигнала с той же амплитудой получается неустойчивый переходный процесс разгрузки ПГУ, вследствие чего происходит аварийный останов энергоблока с закрытием стопорных клапанов. С уменьшением амплитуды управляющего воздействия увеличивается зона устойчивости.

В результате выполненных исследований разработана система нелинейных уравнений и получена математическая модель динамики парогазового энергоблока, используя которую можно наглядно изобразить переходные процессы изменения параметров ПГУ в аварийных ситуациях.

Путем обобщения результатов расчетов режимов импульсной разгрузки отдельных турбин и всего энергоблока получены импульсные диаграммы ПГУ, которые показывают, что быстродействие систем регулирования турбин ПГУ-450Т позволяет экстренно управлять вырабатываемой мощностью энергоблока для ликвидации системных аварий.

Выбором амплитуды управляющего сигнала можно добиться необходимой скорости разгрузки. С помощью полученных импульсных диаграмм энергоблока ПГУ-450Т можно, варьируя длительность импульса, определить параметры необходимой глубины разгрузки энергоблока с выполнением условий устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **014–150–076-ТХ.001.** ТЭЦ-5 АО «Ленэнерго».— Расширение, II очередь. Главный корпус. Схема тепловая принципиальная ПГУ-450Т блока № 2 [Текст] / ОАО «Севзап НТЦ», филиал СевзапВНИПИэнергопром-Севзапэнергомонтажпроект.— СПб., 2010.

2. **РЭ 01 3170109.** Руководство по эксплуатации. Газотурбинная установка ГТЭ-160 [Текст].

3. **РЭ 8610004 0101.** Турбина Т-125/150–7,4. Система регулирования. Руководство по эксплуатации [Текст].

4. **Кириллов, И.И.** Регулирование паровых и газовых турбин. Примерные расчеты и задания [Текст] / И.И. Кириллов, В.А. Иванов.— СПб.: Машиностроение, 1966.

УДК 621.165

А.В. Захаров, Г.Г. Шпензер

КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ЛОПАТКАМИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ

В плане надежности работы цилиндров низкого давления (ЦНД) мощных паровых турбин определяющей является последняя ступень. Отечественные последние ступени большой веерности достаточно экономичны и надежны. Однако каждый следующий шаг по переходу к более высоким показателям последних лопаток дается со значительными трудностями. Так переход к ступеням с длиной рабочих лопаток $l_2 = 1200$ мм привел к необходимости повышения корневой степени реактивности ρ'_m. Дальнейшее повышение длины лопаток связано с еще большими трудностями, причем не только в аэродинамическом плане, но и по соображениям эрозионной надежности, так как с ростом l_2 на периферии рабочего колеса может резко возрасти и эрозионный износ РЛ.

Наличие влажности в последней ступени ЦНД, к сожалению, вызывает не только эрозию, но и эффекты конденсационной нестационарности, обнаруженные в СПбГПУ под руководством профессора И.И. Кириллова еще в 80-х годах прошлого века. Вопросы, связанные с конденсационной нестационарностью, заставляют по особому взглянуть на формирование отсека ступеней ЦНД и прежде всего отсека из двух последних ступеней, где наличие влажной фазы влияет определяющим образом на надежность их работы.

В отечественном турбостроении накоплен значительный экспериментальный материал по работе влажнопаровых отсеков ЦНД, позволяющий при его анализе по новому взглянуть на задачи, стоящие перед отечественным турбостроением на следующем этапе его качественного развития, прежде всего в связи с необходимостью роста длин рабочих лопаток. Основное внимание при начатом анализе следует уделять последним ступеням с коэффициентом веерности $\frac{d}{l_2} = 2{,}5–2{,}9$ (d — средний диаметр рабочего колеса), относя эти ступени к первому интересующему нас классу.

В таких ступенях при работе турбин на частичных режимах наблюдаются мощные срывные явления. Причем этот класс ступеней работает в области влажного пара. Отрывы могут возникать под влиянием большого числа факторов. Часть из факторов может сильнейшим образом сказываться на характеристиках потоков. Эффект же влияния других факторов сравнительно слаб, и им можно пренебречь. Наша задача — изыскать наиболее важные факторы, влияющие на развитие отрывных течений в ступенях влажного пара.

Во влажнопаровом потоке следует отметить положение линии Вильсона. Как правило, в области до линии Вильсона оказывается на номинальном режиме предпоследняя ступень, а за линией Вильсона — последняя в отсеке ступеней ЦНД.

Предпоследняя ступень находится в зоне начальной конденсации со всеми присущими ей явлениями (сильная коррозия, колебания параметров потока в зоне интенсивной конденсации). Для этой ступени характерны значительное переохлаждение потока и связанное с этим увеличение потерь энергии. В предпоследней ступени формируется структура потока, натекающего на последнюю ступень. Надо иметь в виду, что свобода проектирования предпоследней ступени жестко ограничена условиями работы последней ступени.

Еще раз подчеркнем, что влажность потока ЦНД играет существенную роль в развитии пульсационных течений. Из многочисленных опытов известно, что даже в неподвижных решетках, а тем более в турбинах, всегда наблюдаются пульсации потока. Причем при испытаниях на воздушных стендах это обычно небольшие пульсации полного давления, с амплитудой не превышающей 1–2 %. При таких пульсациях

потери энергии в ступени могут быть определены обычными методами расчета. Во влажнопаровых потоках колебания на порядок больше, чем в ступенях, работающих на перегретом паре. Поэтому процессы, протекающие в последнем отсеке ЦНД, работающем на перегретом и на влажном паре, существенно между собой различаются. Различие особенно проявляется в сверхкритических потоках, обычных для мощных турбин. В связи с этим возникают большие потери энергии.

В случае изменения режима по $\overline{G\upsilon}$ (объемный пропуск пара) главные нарушения в структуре потока происходят из-за отклонения степени реактивности во всех сечениях ступени, причем основные нарушения в потоке происходят в последнем рабочем колесе и — в меньшей степени — в направляющем аппарате. В предпоследней ступени в диапазоне $\overline{G\upsilon} = 0{,}5–1{,}0$ влияние $\overline{G\upsilon}$ обычно сказывается слабо. Во всех остальных ступенях ЦНД в указанном диапазоне по $\overline{G\upsilon}$ за счет изменения противодавления структура потока практически не меняется.

Последняя ступень при работе на влажном паре находится в зоне повышенных пульсаций давления. Эти пульсации могут резко возрастать, если течение близко к отрывному, а тем более в зоне локальных отрывов. Так, например, на режимах, близких к номинальным ($\overline{G\upsilon} = 0{,}95$), в последней ступени турбины К-300–240 ХТЗ за рабочим колесом были обнаружены [1] пульсации полного давления до 20 %. Иной характер наблюдался при испытаниях на воздухе (рис. 1). Как видно, при испытаниях на паре пульсации при $\overline{G\upsilon} = 1{,}0$ и $\overline{G\upsilon} = 0{,}3$ были в два-три раза больше, чем на воздухе. Отметим также, что на малых режимах ($\overline{G\upsilon} = 0{,}4$ и $\overline{G\upsilon} = 0{,}13$) довольно сильные всплески пульсаций наблюдались и в периферийной зоне.

В области больших пульсаций и неблагоприятных условий формирования меридиональных обводов наблюдаются срывные явления различной интенсивности — от локальных срывов до интенсивного отрыва потока в корневой зоне и даже до возникновения радиальной неустойчивости, когда поток почти радиально устремляется от корня к периферии.

При изучении аэродинамики потока и прочности лопаток последней ступени важно знать обстоятельства образования зон отрывов. Анализ результатов экспериментальных исследований отечественных и зарубежных фирм в широком диапазоне нагрузок последних ступеней выявил четыре критические точки.

Первая точка — локальный отрыв потока в прикорневой зоне, порождаемый в основном углами атаки и пространственной перестройкой потока во всех предшествующих ступенях (рис. 2). В зоне отрыва $\frac{P_2}{P_2{}^*} \approx 1{,}0$, при этом расходная составляющая скорости близка к нулю. Локаль-

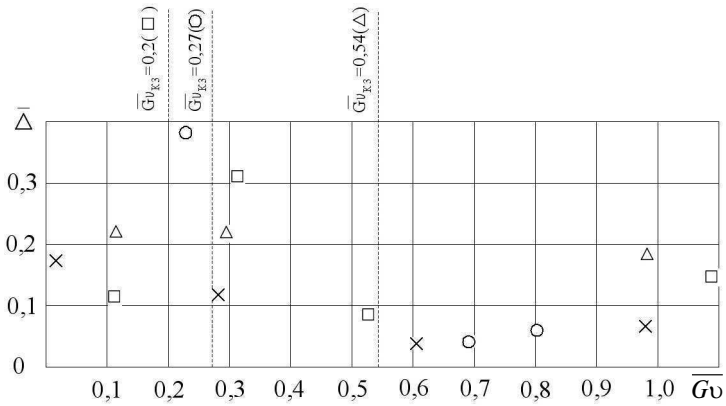


Рис. 1. Кризисные явления в последнем рабочем колесе (характеристики турбин приведены в таблице)

□ — К-300 ХТЗ (4-я ступень); Δ— К-300–240 ХТЗ (5-я ступень); O—К-500 ХТЗ; × — одиночная ступень ХПИ; d_1 = 2,58; Δ — пульсации полного давления

Основные характеристики турбинных ступеней

Название ступени турбины	Степень веерности $\frac{d}{l_2}$	Число ступеней в отсеке	Корневая степень реактивности ρ'_m	Объемный пропуск пара на холостом ходу $\overline{G\upsilon}_{K3}$
К-1000 ЛМЗ	2,8	5	0,48	0,2
К-300–240 ЛМЗ М 1:3	2,58	2	0,017	0,28
К-300 ХТЗ 4-я ступень	3,46	4	0,07	0,2
К-1200 ЛМЗ	2,5	5	0,463	0,25
К-300–240 ХТЗ 5-я ступень	2,43	5	–0,2	0,55
К-500 ХТЗ	2,86	5	0,125	0,27

ный отрыв намечается в корневом сечении. По мере снижения $\overline{G\upsilon}$ развивается корневой отрыв, взаимодействующий с локальным отрывом (см. на режиме *д* окрестности точки А).

Вторая точка — начало интенсивного отрыва потока в корневом сечении (см. рис. 2), при этом зонд полного давления не ориентируется в потоке. Однако при расходах $\overline{G\upsilon} < 0{,}6–0{,}7$ в широкой области, как правило, не наблюдалось существенных пульсаций и не было явно выраженного падения КПД по сравнению с расчетными оценками. При таких режимах ступень могла надежно и экономично работать без ограничения длительности. Но вместе с тем при уменьшении объемного расхода зона, охваченная пульсациями, возрастает. Эти пульсации, естественно, качественно меняются и быстро нарастают по мере приближения к переходу ступени к компрессорному режиму.

Третья критическая точка — $\overline{G\upsilon}_{K3}$ — (см. рис. 1) характеризует начало интенсивного перехода от турбинного режима к компрессорному. Она находится в зоне отрыва потока не только от торцевой поверхности, но и от профиля. Развитие этого отрыва сопровождается насосным режимом работы ступени. В этой условной точке отрывная зона по высоте лопатки может достичь больших размеров. В зоне левее от третьей

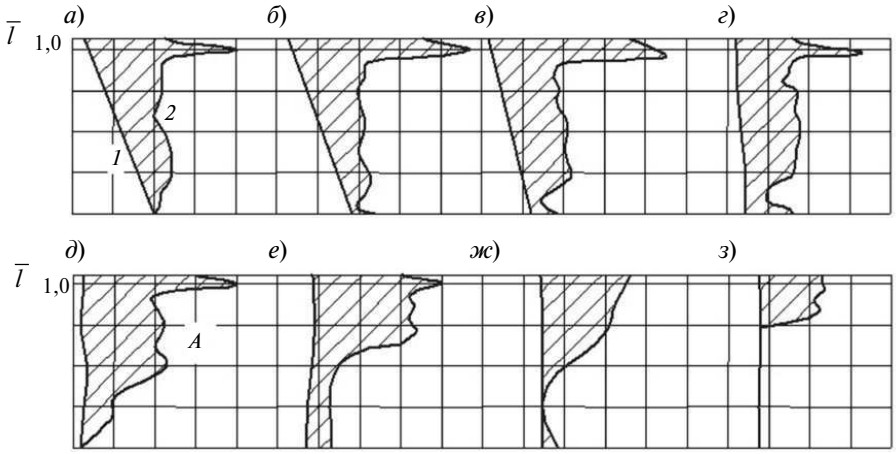


Рис. 2. Развитие корневого отрыва в последней ступени паровой турбины:

а — $\overline{G\upsilon} = 0{,}95$; $u/c_0 = 0{,}53$; *б* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}88$; $u/c_0 = 0{,}54$; *в* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}75$; $u/c_0 = 0{,}57$; *г* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}65$; $u/c_0 = 0{,}6$; *д* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}56$; $u/c_0 = 0{,}64$; *е* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}4$; $u/c_0 = 0{,}78$; *ж* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}3$; $u/c_0 = 0{,}95$; *з* — $\overline{G\upsilon} = 0{,}2$; $u/c_0 = 1{,}0$; *1* — статическое давление P_2; *2* — давление торможения P_2^*

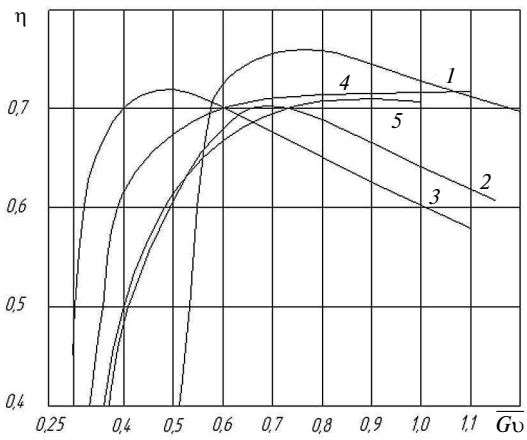


Рис. 3. Влияние объемных пропусков пара на КПД последних ступеней мощных паровых турбин:

1 — К-500 ХТЗ; *2* — К-1200 ЛЬЗ; *3* — К-1000 ЛМЗ; *4* — К-100–90 ЛМЗ; *5* — К-300–240 ЛМЗ, М 1:3

критической точки в корневой области развивается сильное радиальное течение (насосный эффект).

Четвертая точка условно отмечает кризис течения, вызванный взаимодействием радиальных и осевых течений в рабочем колесе, сопровождаемых сильными пульсациями в периферийной его части.

О чрезвычайно больших пульсациях при потере устойчивости потока в насосном режиме можно судить по кривизне левых ветвей характеристик ряда ступеней мощных турбин (рис. 3). Из диаграммы видно, что переход к насосному эффекту сопровождается резкими пульсациями и падением КПД, достигающим 30 % и более при изменении $\overline{G\upsilon}$ всего лишь на 0,1 %. В этой зоне ощущается естественная взаимосвязь амплитуд пульсаций с падением КПД ступени. На режиме близком к $\overline{G\upsilon}_{K3}$ ($\overline{G\upsilon} = 0{,}23$) модельная рабочая лопатка последней ступени турбины К-300, работая в режиме торможения около получаса, сломалась.

Заметим, что в области малых расходов ($\overline{G\upsilon} < 0{,}15–0{,}2$) даже сильные пульсации не опасны для лопаток, так как малы действующие силы. С повышением же границы $\overline{G\upsilon}$, характерной для третьей критической точки, в сторону больших объемных пропусков пара на режимах, близких к $\overline{G\upsilon}_{K3}$, пульсации могут вызвать поломки лопаток. В то же время при сильных пульсациях вблизи номинального режима, скажем 20 %, потери достигают такой же величины, как и при малых расходах. Этот тезис подтверждается рядом опытов ХТЗ—ХПИ, в результате которых была модернизирована последняя ступень К-300–240 ХТЗ.

На положение границы резкого падения КПД и повышение надежности работы последних ступеней ЦНД с лопатками предельной длины конструктор может влиять такими техническими средствами, как повышение степени реактивности в корневых сечениях ступени ρ'_m (снижение $\overline{G\upsilon}_{K3}$), что очевидно из рис. 3, совершенствованием меридиональных обводов и рядом других факторов, выявлению которых будут посвящены дальнейшие работы СПБГПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пономарев, В.Н.** Исследование последних ступеней мощных паровых турбин в диапазоне режимов от номинальной нагрузки до холостого хода [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Н. Пономарев— Харьков, 1977.— С. 43.

2. **Гаркуша, А.В.** Исследование и разработка проточной части низкого давления мощных паровых турбин [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук/ А.В. Гаркуша.— Харьков, 1980.— С. 43.

3. **Лагун, В.П.** Газодинамические исследования проточной части низкого давления мощных паровых турбин [Текст] / В.П. Лагун, Л.Л. Симон, Ю.З. Фрумкин // В кн.: Котельные и турбинные установки электрических блоков.— М.: Энергия, 1971.— С. 157–171.

4. **Лагун, В.П.** Газодинамические исследования проточной части натурного ЦНД турбины ВК-100–5 до и после модернизации [Текст] / В.П. Лагун, Л.Л. Симон.— Теплоэнергетика.— 1967. № 12.— С. 17–24.

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

6. **Самойлович, Г.С.** Переменные и переходные режимы в паровых турбинах [Текст] / Г.С. Самойлович, Б.М. Трояновский.— М.: Энергоиздат, 1982.— 494 с.: ил.

УДК 621.165

Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин,
А.А. Себелев, М.В. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЯХ КОНСТРУКЦИИ ЛПИ

Необходимость развития малой энергетики и технологий энергосбережения ставит перед промышленностью и наукой все более сложные и нестандартные задачи. Зачастую их решение в рамках принятых представлений дает неточный, а иногда и абсолютно неверный результат. Необходимо применять новые методики и подходы в инженерном анализе. Об опыте разработки и применения одной из таких методик и пойдет речь в данной статье.

Опыт, накопленный современной наукой в вопросах проектирования энергетических турбин, весьма велик. Внутренний КПД традиционных энергетических турбин зачастую достигает 90 %. Однако в области малых мощностей применение этого опыта оказывается неэффективным из-за небольших расходов рабочего тела, малых высот проточной части и, как следствие, высоких потерь и низкого КПД подобных ступеней (не более 40 %). Применение ступеней с парциальным подводом рабочего тела позволяет несколько уменьшить вторичные потери в проточной части, однако парциальность связана с потерями на трение и вентиляцию, и потому такие ступени также не показывают высокого КПД.

Один из возможных путей решения этой проблемы — реализация концепции малорасходных ступеней конструкции ЛПИ [1] (рис. 1).

Идея ступеней ЛПИ принадлежит профессору И.И. Кириллову, разработка и исследование высокоэффективных ступеней осуществлены под руководством профессора В.А. Рассохина.

Отличительные черты ступеней такого класса: малые углы выхода потока из соплового аппарата (СА) — α_1= 3–5°; малые углы входа в рабочее колесо (РК) — β_1= 8–14°; большие углы поворота потока в РК — Ω=151–164°; большой относительный шаг сопловых и рабочих лопаток (t/b больше 4 и 1,1 соответственно), трансзвуковые и сверхзвуковые скорости в СА и РК.

Поскольку такая ступень способна переработать значительный перепад энтальпий (до 330 кДж/кг и выше), общее количество ступеней в проектируемой установке снижается.

До последнего времени проектировочные расчеты ступеней ЛПИ проводились в одномерной постановке с формированием цилиндрических поверхностей косого среза сопла.

Аналитическое описание пространственной структуры потока в этих условиях — сложная и малоизученная в турбостроении задача. Малые углы α_1 приводят к нарушению естественного характера течения и к снижению внутреннего КПД ступени. Использование трехмерных газодинамических расчетов с помощью программного комплекса CFX позволяет повысить качество проектирования проточных частей (ПЧ) ступеней ЛПИ и обеспечить их конкурентоспособность.

Первая детально исследованная ступень — ступень ЛПИ диаметром 126 мм с углом выхода

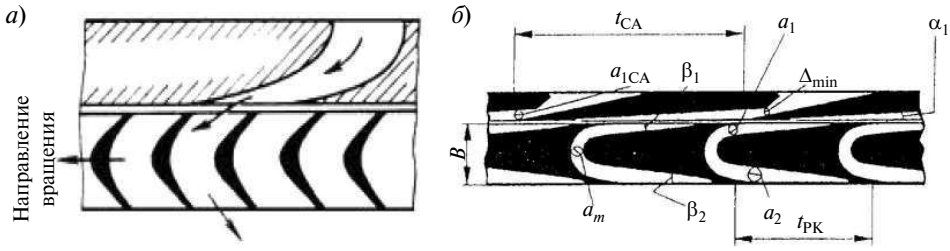


Рис. 1. Классическая активная ступень с парциальным подводом рабочего тела (*а*) и ступень конструкции ЛПИ (*б*)

из СА $\alpha_1 = 5°$, углом входа в РК $\beta_1 = 10{,}5°$ и без бандажа; степень парциальности $\varepsilon = 0{,}612$, осевой зазор (ОЗ) $\Delta z_{оз} = 3$ мм, проектная мощность 26 кВт (модель 605).

Фотографии СА и лопаток РК исследуемой ступени представлены на рис. 2 и 3.

Постановкой задачи определены вопросы как исследования течения в турбинной ступени, так и определения осевого усилия, действующего на РК ступени.

С целью определения осевого усилия, действующего на РК, в расчетную модель были включены области между диском РК и статорными деталями, имеющие место в реальной проточной части (рис. 4).

Решалась стационарная задача. Модель турбулентности SST — высокорейнольдсовая, $Y+$ от 15. Сечение расчетной конечно-элементной модели на среднем диаметре приведено на рис. 5.

Важным вопросом в постановке задачи является способ стыковки в модели неподвижного СА и вращающегося РК. Следуя опыту расчетов транс- и сверхзвуковых ступеней, а также учитывая высокую степень окружной неравномерности вследствие невысокой степени парциальности [3], для стыковки СА и РК в стационарной постановке использовался интерфейс Frozen Rotor. Для определения осредненных параметров ступени были рассмотрены четыре характерных положения РК по углу его поворота относительно СА.

Результаты численных расчетов трехмерной модели исходного варианта ступени, выполненные в программном комплексе CFX, представлены на рис. 6–10.

Визуализация потока на входе в сопла СА определила наличие значимой вихревой структуры потока седловидной формы «п» и «к» (рис. 6 и 7), что, впрочем, достаточно прогнозируемо. Однако интенсивность вихрей оказалась настолько мощной, что вихри «захватили» всю ПЧ сопла (рис .8, *а*), разделив поток посередине высоты сопла.

Как видно на рис. 8, *а*, корневой вихрь *1* вращается против часовой стрелки при взгляде по потоку, периферийный вихрь *2* — по часовой стрелке. Поток *1* практически не отслеживает цилиндрические обводы КС сопла, траектория движения близка к прямолинейной. На поток *2* цилиндричность обводов оказывает существенное воздействие. Разделение еще более контрастно определяется на рис. 9 и 10.

Рис. 8, *б*, демонстрирует отражение потока *2* от периферийного цилиндрического обвода ОЗ.

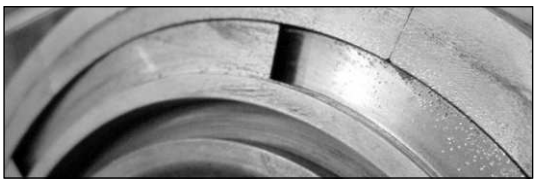


Рис. 2. Сопловой аппарат

Рис. 3. Лопатки рабочего колеса

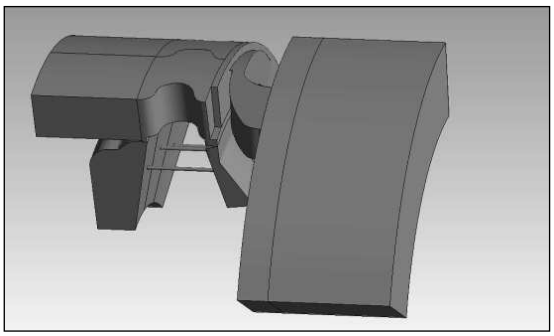


Рис. 4. Геометрия модели 605

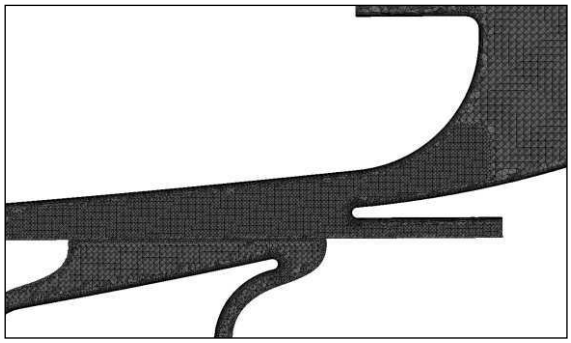


Рис. 5. Расчетная модель

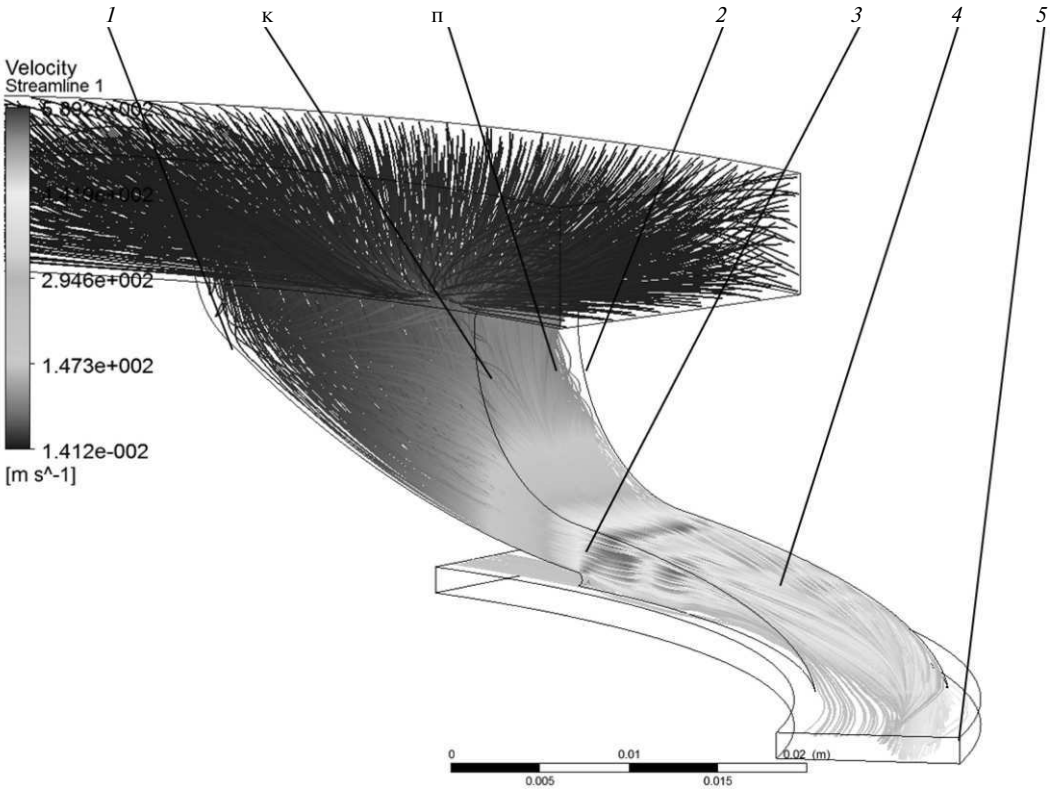


Рис. 6. Streamlines во входном сечении сопла (*1* и *2* — профилированные стороны входной части сопла; *3* — критическое сечение сопла (КР); *4* — косой срез (КС) сопла; *5* — часть ОЗ ($0{,}5\ \Delta z_{оз}$); п — периферийный вихрь; к — корневой вихрь

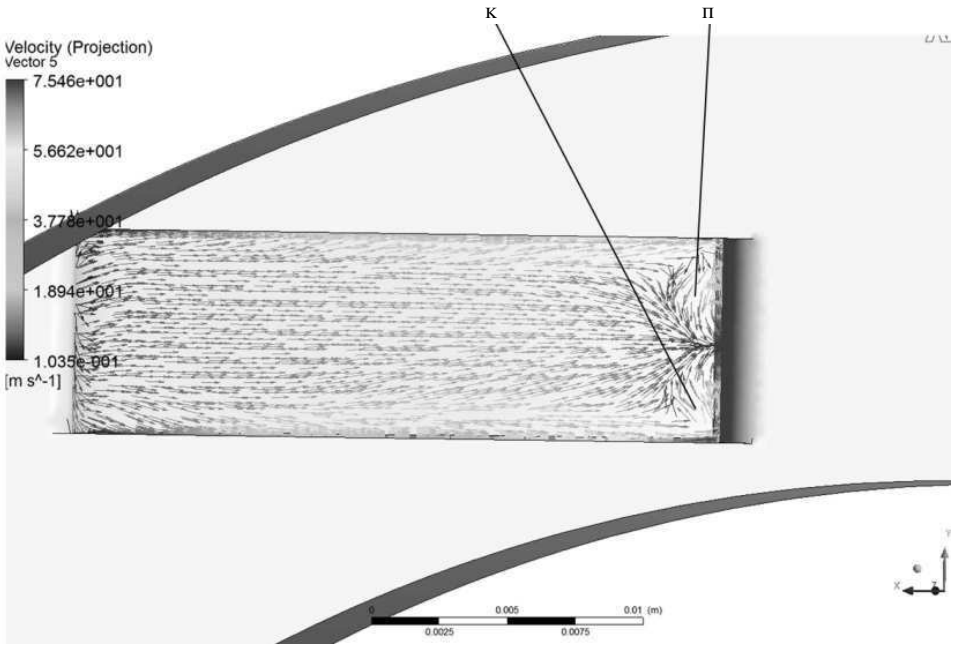


Рис. 7. План тангенциальной составляющей скорости во входном сечении сопла (Δz = 2 мм от поверхности входа): п — периферийный вихрь; к — корневой вихрь

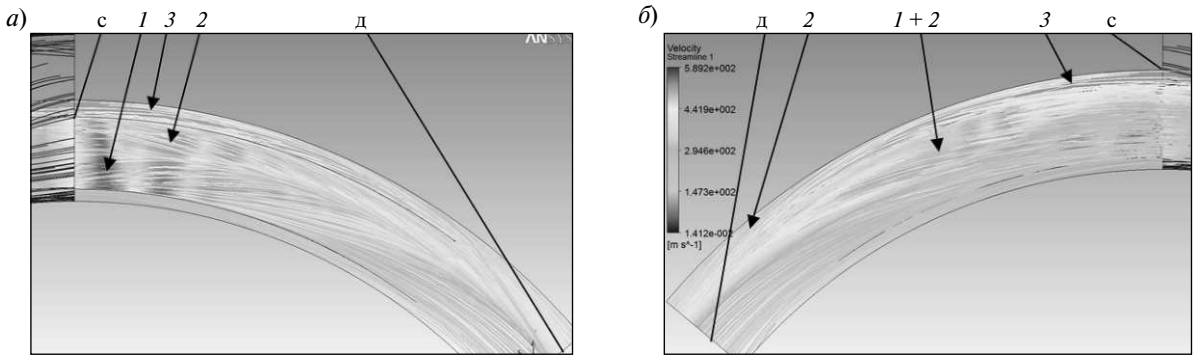


Рис. 8. Streamlines в КС СА (*1* — корневой поток сопла; *2* — периферийный; *1* + *2* — суммарный поток на выходе из СА; *3* — часть суммарного потока 2 из предыдущего сопла): *а* — вид со стороны входа потока в СА; *б* — вид со стороны выхода; *с* и *д* — кромки КС сопла

В динамике процессы движения потоков представлены на рис. 9.

Из теории турбомашин [2] известно, что поток рабочего тела (РТ) при постоянном давлении в свободном пространстве ОЗ движется прямолинейно по поверхностям тока линейчатого гиперболоида вращения. Следовательно, в идеальном случае поток должен достичь периферии ступени в средней части ОЗ с высокой радиальной составляющей скорости, далее — либо отразиться от цилиндрической поверхности периферийного обвода, либо принять условия цилиндрического течения.

Анализ картины течения (см. рис. 8–10) показывает реальность «гиперболичности» течения РТ в пространстве ОЗ, однако особенности конструкции ступени приводят к отклонению пространственных поверхностей тока от линейчатых гиперболоидов

Первоисточником этого отклонения служит весьма существенный вихрь *3* из предыдущего сопла (см. рис. 8 и 9). Своим существованием он обязан наличию мертвой зоны в ОЗ, образованной стенкой СА и периферийным обводом ПЧ, в которой находится поток *3*. Его присутствие обеспечивает вытеснение потоков *1* и *2* в сторо-

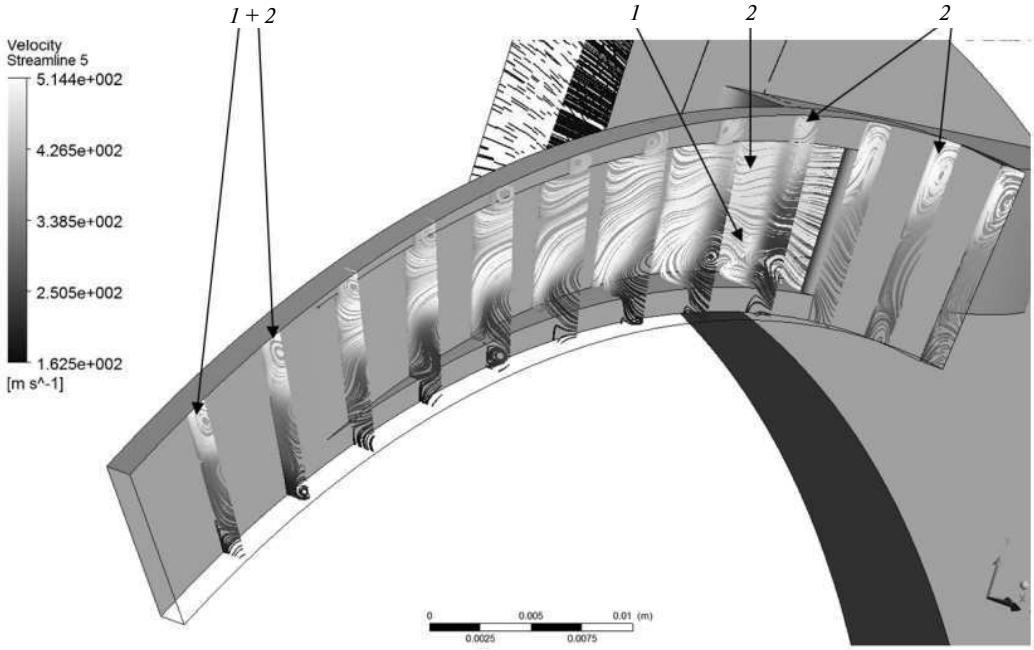


Рис. 9. Планы завихренности скорости относительно оси *X* в осевом зазоре (0,5 $\Delta z_{оз}$) и КС сопла в пространстве исследуемой модели (шаг планов — 5°, нумерация соответствует рис. 8)

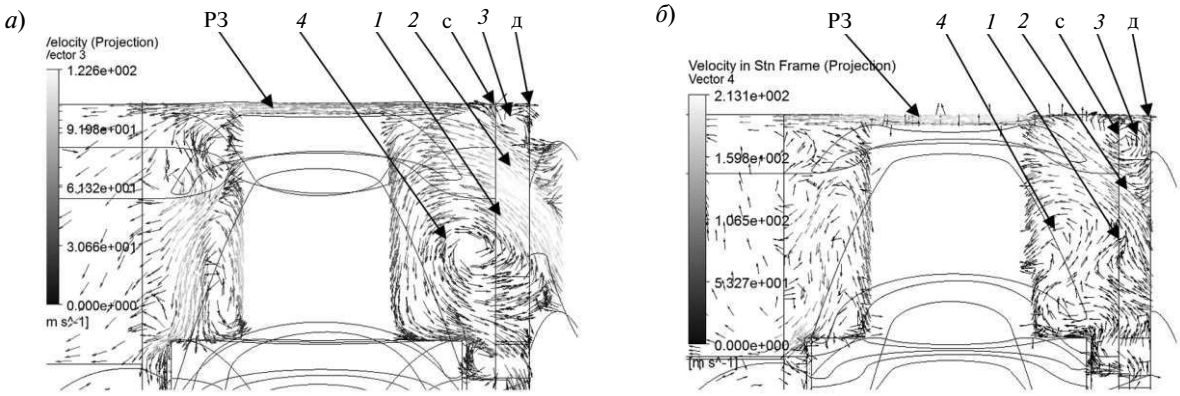


Рис. 10. Визуализация потока в меридиональных сечениях, расположенных под углами 20° (*а*) и 35° (*б*) к кромке сопла, ближайшей к КР сопла (дуга КС сопла — 36,7°): *с* — середина ОЗ; *д* — поверхность КС сопла; нумерация потоков *1–3* соответствует рис. 8; *4* — суммарный отраженный поток; РЗ — радиальный зазор над РК

ну РК. Примечательно, что поток *3* (см. рис. 9), является частью потока *2*, который в результате отражения от периферии разделяется на два потока — поток *3* (рис. 11) и поток, суммирующийся в дальнейшем с потоком *1*. Суммарный поток *4* (рис. 10), отражается от периферии по принципам весьма жестких сверхзвуковых струй с уменьшением α_1. Аналогичное отражение визуализировано для потока *2* в КС сопла (рис. 9), причем отражение начинается в районе 1/3 дуги КС от КР, что интенсифицирует вытеснение основных потоков в сторону РК.

Отраженный от периферии поток *4* (рис. 10) частично входит в РК с периферии РЗ, частично — из ОЗ. Картина течения РТ на входе в РК представлена на рис.12.

Визуализация течения РТ позволяет определить ЗО потока от периферии ОЗ и РЗ. Наличие ЗО активного РТ от периферии определяет высокую активность потока в РЗ (см. рис. 10). Необходимо отметить наличие серьезных вихревых структур в корневой части РК. Очевидно, что корневые сечения практически не работают, а являются плохо организованным эжектором.

Вероятно, в РК суммарный поток выходит к периферии ступени на расстоянии шести миллиметров от входной кромки РК. Следовательно, в этом месте происходит отражение потока, где и наблюдается локальный максимум по расходу РТ в РЗ (рис. 13). После второго отражения суммарного потока и под воздействием центробеж-

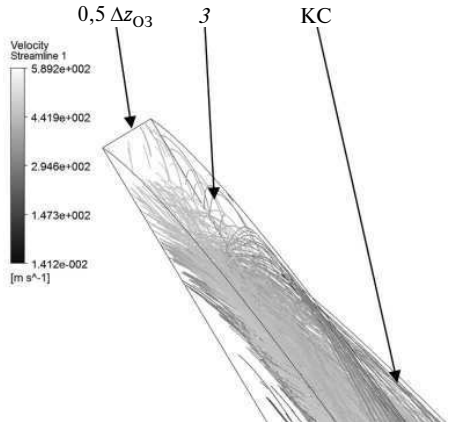


Рис. 11. Вид на ОЗ в конце КС сопла (номер потока *3* соответствует рис. 8)

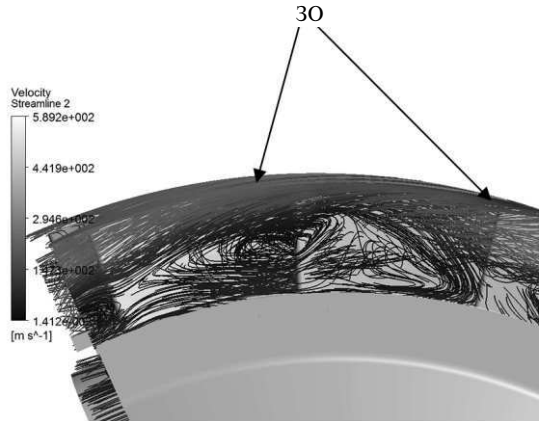


Рис. 12. Пространственное течение РТ на входе в РК (ЗО — зона отражения)

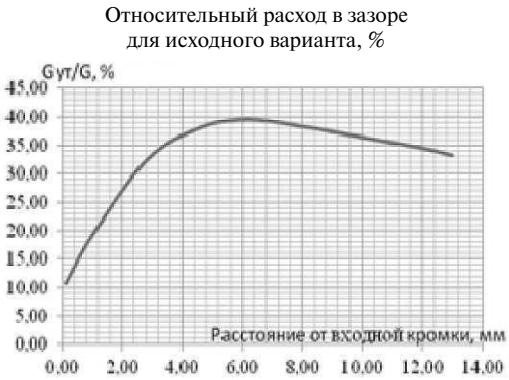


Рис. 13. Изменение относительного расхода через РЗ над РК в зависимости от расстояния от входной кромки

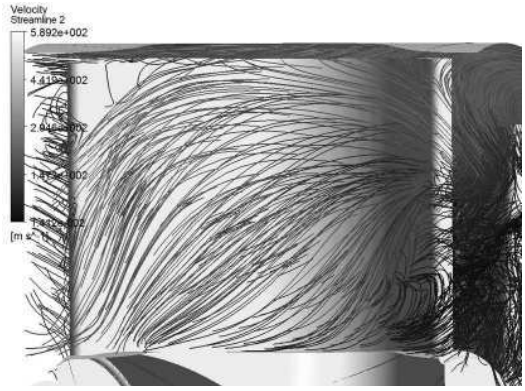


Рис. 14. Streamlines на вогнутой поверхности лопатки РК

ных сил поток с радиальной составляющей скорости к корню заполняет выходные сечения РК (рис. 14).

Из изложенного можно заключить, что течение в модели 605 является сугубо трехмерным и характеризуется следующими особенностями: образованием вихревой структуры в СА вследствие неоптимальной геометрии входной части; высокой степенью окружной неравномерности на входе в РК вследствие малых углов α_1 и парциального подвода РТ; локализацией потока на периферии, которую обеспечивает течение РТ за СА в свободном пространстве открытого ОЗ при $\alpha_1 = 5°$; образованием вихревой структуры потока эжектируемой среды в корне и средней части проходных сечений РК, создающей высокий уровень потерь на трение и вентиляцию и приводящей к росту осевого усилия, направленного в сторону СА; высокой активностью РТ в РЗ над РК ступени без бандажа.

Наиболее важными направлениями первого этапа оптимизации проточной части являются исследования влияния степени парциальности и величины радиального зазора (Δr) над лопатками РК без бандажа и с бандажом. С этой целью необходимо рассмотреть следующие модели (рис. 15):

1) ступень ЛПИ со степенью парциальности $\varepsilon = 1$ (модель 905);

2) без бандажа: *а* — $\Delta r = 0{,}5$ мм (модель 905); *b* — $\Delta r = 0{,}3$ мм (модель 903);

3) с бандажом: *а* —$\Delta r = 0{,}3$ при высоте бандажного усика $l_y = 2{,}7$ мм (модель 903В1); *b* — $l_y = 1{,}5$ мм (модель 903В2).

Трехмерные расчетные модели базовых вариантов представлены на рис.15.

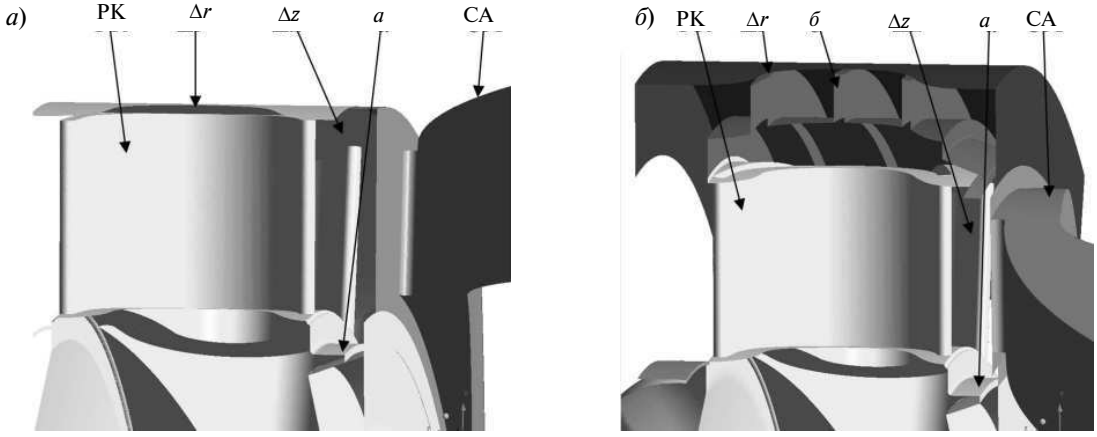


Рис.15. Базовые модели: *а* — усик корневого уплотнения; *б* — бандаж РК

Анализ результатов исследований пространственной структуры потока, полученной методом численного трехмерного моделирования

Результаты расчетов интегральных величин для рассмотренных моделей представлены гистограммами на рис. 16–17.

Сравнение моделей 605 и 905 (влияние степени парциальности ε). На рис. 18 представлен Streamlines в КС сопел в середине ОЗ.

Сравнение моделей показывает, что увеличение степени парциальности ε до единицы приводит к снижению окружной неравномерности параметров потока после СА и уменьшению зон пассивного газа. Вместе с тем увеличение расхода РТ (а соответственно, и мощности, вырабатываемой ступенью) на модели 905 усиливает эжекционные эффекты и приводит к росту осевого усилия на 16,3 кг без изменения направленности (см. рис. 17). Внутренний КПД при этом возрос на 7,9 % (см. рис. 16).

Сравнение моделей 905 и 903 (влияние радиального зазора). В количественном плане — внутренний КПД из-за уменьшения Δr возрос на 4,2 % (см. рис. 16), осевое усилие — на 67,63 кг без изменения направления (см. рис. 17).

Качественный характер течения РТ не изменился. Характер изменения расхода РТ в пространстве РЗ представлен на рис. 19. Линии тока РТ в РЗ можно оценить по рис. 20.

Видно, что РТ в РЗ имеет высокую окружную составляющую скорости (рис. 20), и основная масса потока возвращается в проточную часть РК. Следовательно, можно сделать вывод, что в ступени ЛПИ с РК без бандажа нет классической утечки РТ через РЗ, а имеет место малоэффективное преобразование потенциала РТ в зазоре.

Необходимо отметить, что традиционный метод уплотнения РЗ путем организации сотовых уплотнений в ступенях ЛПИ с РК без бандажа, очевидно, приведет к снижению КПД.

Сравнение моделей 903 и 903В1 (влияние бандажа РК). В количественном плане — внутренний КПД модели с бандажом РК возрос на 11,3 % (см. рис. 16), осевое усилие — на 13,36 кг без изменения направления (см. рис. 17).

Из рис. 21 видно, что качество работы потока в модели 903В1 выше, чем в модели 903,

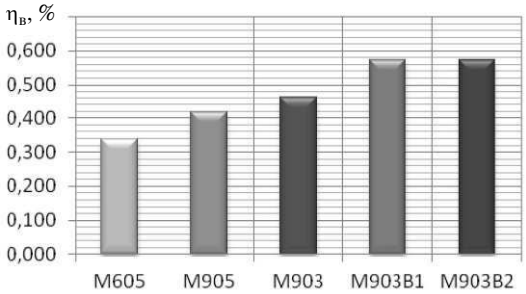


Рис. 16. Внутренний КПД моделей

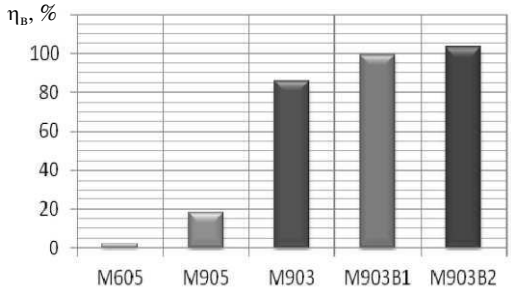
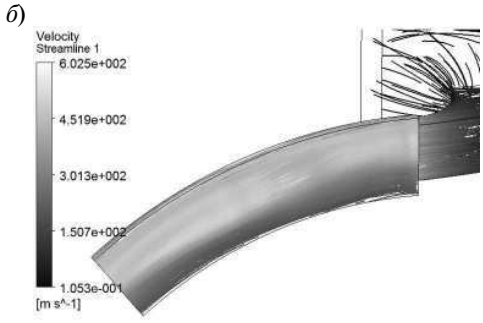


Рис. 17. Осевое усилие на РК моделей

Модель 605



Модель 905

Рис. 18. Течение РТ в КС сопла (Streamlines)

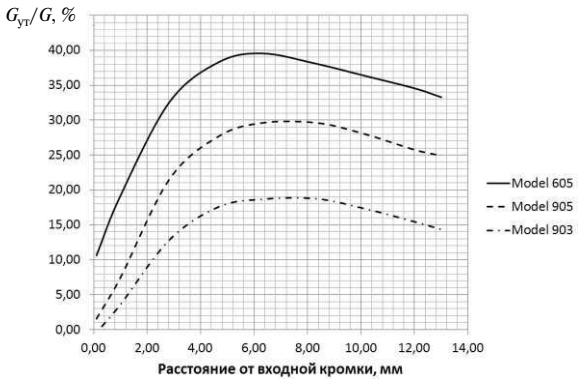


Рис. 19. Характер изменения расхода РТ в РЗ

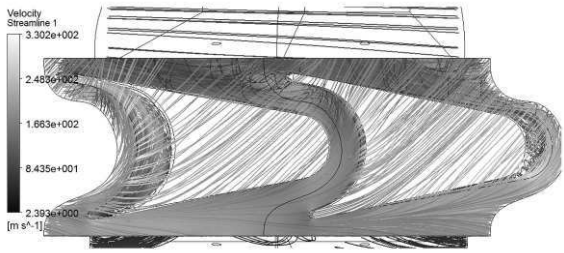


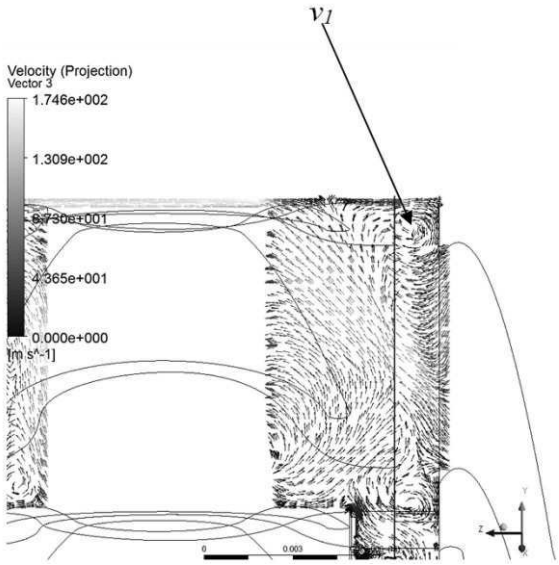
Рис. 20. Вид сверху на течение в РК и РЗ

за счет следующего: уменьшения трения РТ о поверхности вращающегося бандажа по сравнению с трением о неподвижную периферийную поверхность зазоров; обнуления РЗ для активной части РТ в РК; уменьшения интенсивности РТ в РЗ.

Недостатки модели 903В1: увеличение осевого усилия до 99,34 кг, повышенный уровень утечек РТ через надбандажный РЗ. Впрочем, оба эти недостатка являются следствием одной причины — стандартного выполнения осевого уплотнения зазоров, несвойственного ступеням ЛПИ, так как весьма мощный поток v_2, аналогичный потоку v_1 в модели 903 (см. рис. 10, поток *3*), имея высокую окружную скорость, входит в зазор между усиком бандажа *У* и плоской поверхностью СА. В ступенях ЛПИ усик бандажа утоплен в корпус СА. Увеличение осевого усилия определяется также уменьшением потерь кинетической энергии активного РТ, что обеспечивает увеличение его эжектирующей способности. Кроме того, имеет место более полное заполнение проходных сечений РК активным потоком, что приводит к повышению качества эжектирования. В нашем случае есть только один метод уменьшения осевого усилия — оптимизация корневой перекрыши.

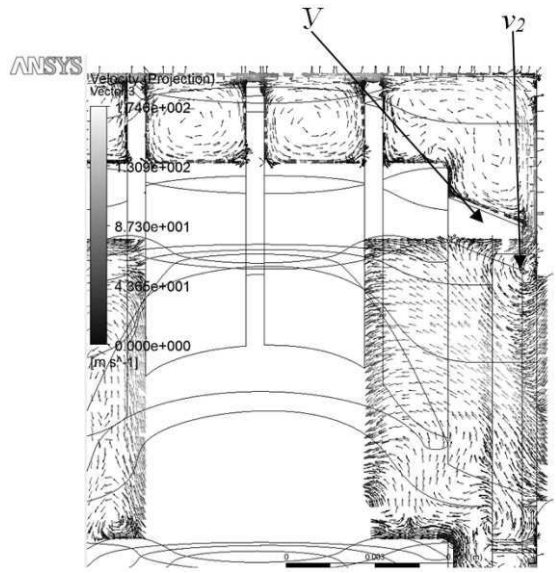
Сравнение моделей 903В1 и 903В2 (влияние типа бандажных уплотнений). Необходимость постановки данного исследования вызвана прочностными соображениями.

а)



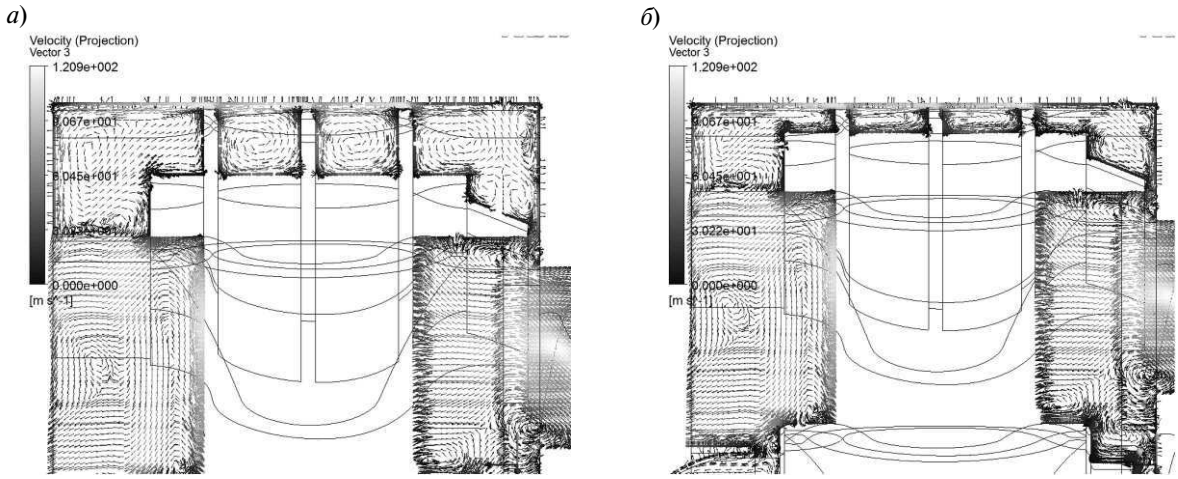
Модель 903

б)



Модель 903В1

Рис. 21. Векторные поля в меридиональном сечении (30° от критического сечения сопла)



Модель 903В1 Модель 903В2

Рис. 22. Характер течения в РЗ (векторное поле)

Очевидно, что качественная картина течения РТ в исследуемых моделях практически одинакова, отличия имеют место лишь в надбандажном пространстве (рис. 22).

В количественном плане внутренний КПД модели 903В2 возрос на 0,1 %, осевое усилие — на 3,6 кг без изменения направления, утечка РТ сократилась на 0,83 %. Причина увеличения осевого усилия изложена в предыдущем анализе. Уменьшение утечки происходит за счет уменьшения проходного сечения РЗ над бандажными усиками.

Обобщим полученные результаты для всех моделей:

1. Обоснована необходимость конструктивных изменений входной части СА.

2. Увеличение степени парциальности с 0,612 до 1 привело к увеличению внутреннего КПД на 7,9 %.

3. Уменьшение радиального зазора над РК обеспечило увеличение $\eta_в$ на 4,2 %.

4. Обоснована нерациональность применения сотовых уплотнений для ступеней ЛПИ с РК без бандажа.

5. Применение бандажа РК весьма эффективно и повышает $\eta_в$ на 11,3 %.

6. Обоснована необходимость уплотнения ПЧ с целью снижения осевого усилия.

7. Обоснована необходимость оптимизации корневой перекрыши с целью повышения $\eta_в$ и снижения осевого усилия.

В заключение необходимо отметить, что в работе приведены исследования традиционных методов повышения эффективности ПЧ турбинных ступеней. На базе анализа течения РТ в исследованных моделях выработаны нетрадиционные методы решения поставленных задач, которые ввиду ограниченности объема статьи не приводятся. Работы по выработанным направлениям исследований ведутся в настоящее время на кафедре ТДУ СПбГПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассохин, В.А.** Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение [Текст] / В.А. Рассохин // Энергомашиностроение. Труды СПбГПУ.— № 491. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004.

2. **Кириллов, И.И.** Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов.— Л.: Машиностроение, 1972.

3. **Епифанов, А.А.** Опыт численного моделирования структуры течения и характеристик ступеней малорасходных турбин ЛПИ [Текст] / А.А. Епифанов, В.А. Рассохин, А.И. Кириллов // Энергетика, энергосбережение и экология / Сб. трудов XL Междунар. научно-практ. конф. «Неделя науки СПбГПУ».— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011.

УДК 621.311

В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Д.А. Лапатеев

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ В ОКНАХ

Снижение энергопотребления зданий в условиях постоянного удорожания топлива — актуальная задача для экономики нашей «северной» страны с достаточно холодным климатом, особенно если учитывать наличие сильной конкуренции с иностранными производителями, имеющими сравнительно низкую энергоемкость продукции. Энергия в жилых, общественно-административных и производственных зданиях тратится на компенсацию трансмиссионных потерь через ограждающие конструкции, подогрев воздуха в системах механической вентиляции и на инфильтрацию, подогрев воды на ГВС, искусственное освещение, технологию и т. д. [1]. В этом случае доля затрат от общего энергопотребления на трансмиссионные теплопотери и инфильтрацию в среднем по стране составляет от 10 до 60 % в зависимости от местоположения и типа зданий [2]. Здание с минимальным потреблением тепловой энергии — это здание, в котором теплопотери через оболочку сведены к экономически обоснованному минимуму.

В целях снижения нагрузок на системы вентиляции, отопления и ГВС в общественно-административных и производственных зданиях применяют новые теплоизоляционные материалы, дежурный режим отопления, рекуперацию, установку автоматических термоклапанов у отопительных приборов, утилизацию теплоты вытяжного воздуха с промежуточным теплоносителем в системах механической вентиляции и т. п. [3].

Существенная доля тепловых трансмиссионных потерь зданий приходится на потери через оконные проемы (по разным оценкам, от 20 до 50 % от общего объема). Основным показателем, характеризующим это, является приведенная величина термического сопротивления всего оконного блока, хотя наибольшие потери приходятся на его светопрозрачную часть [4].

Недостатки современных энергосберегающих конструкций окон

Современные энергосберегающие конструкции окон имеют ряд существенных недостатков [2, 3 и 6]. Так, применение окон с высокой степенью герметичности вызывает кратное увеличение воздухообмена, и задачи энергосбережения не решает, а лишь изменяет ее условия, перекладывая теплопотери через неплотности в окнах на теплопотери в системе вентиляции. Конструкции окон, ориентированные на снижение конвективной составляющей и теплопроводности (многослойное остекление или заполнение стеклопакетов малотеплопроводными газами), значительно снижают уровень поступления в помещение солнечного света (в том числе полезных для здоровья человека УФ-лучей), а также имеют высокую стоимость и громоздкость.

Окна, понижающие долю тепла, передаваемого излучением, за счет использования теплоотражающих покрытий, достаточно энергоэффективны, поскольку доля тепла, передаваемого излучением, может достигать 80 %, и ее понижение заметно отразится на теплопотерях окна. Однако широкое применение покрытий с высокой теплоотражающей способностью ограничено их стоимостью, которая обусловлена сложной технологией нанесения покрытий и дороговизной материалов, а также снижением коэффициента светопропускания до 50 %, вызывающим дополнительные затраты на искусственное освещение внутри помещений.

Следует особо отметить перспективные технологии энергосбережения в окнах.

Один из примеров таких технологий — вакуумированные окна [7, 8] со стеклянными стержнями или шарами внутри стеклопакетов для выдерживания атмосферного давления воздуха и динамического давления ветра, со специальными стеклянными уплотнениями. Такая

светопрозрачная конструкция имеет низкий коэффициент теплопроводности, но теплопотери по краям больше, чем у традиционных изолирующих стеклопакетов.

Окна с электрохромным остеклением [8], позволяющим плавно изменять прозрачность стекла приблизительно от 5 до 70 %, и соответствующим регулированием теплопоступлений за счет солнечной радиации несут существенную выгоду для общественных зданий с точки зрения экономии благодаря снижению расходов на освещение и на охлаждение воздуха внутри помещений. Но эта технология пока дорогостоящая.

Окна с аэрогелем [8], состоящим приблизительно на 4 % из силикона и на 96 % из воздуха, обладают высокой изоляционной способностью, но они существенно рассеивают свет и не имеют хорошей прозрачности.

Предлагаемые технические решения

Для повышения коэффициента сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции без увеличения затрат на искусственное освещение нами был предложен вариант применения в темное время суток теплоотражающих экранов, которые снижали бы тепловые потери от лучистого (и в меньшей степени от конвективного) теплообмена, не вызывая уменьшения значения светопроницаемости окна в светлое время суток. Теплоотражающие экраны задерживают электромагнитное излучение преимущественно в инфракрасной области.

Учитывая, что в течение отопительного периода в Центральном регионе РФ средняя продолжительность светового дня составляет около 8 часов, то остальные 16 часов оконные проемы могут быть закрыты теплоотражающими экранами. Для обоснования данного предложения в табл. 1 приведены значения среднемесячной длительности светового дня, отнесенной к длительности суток, в разных городах РФ для некоторых месяцев отопительного периода.

Было исследовано несколько конструкций энергосберегающих оконных блоков с применением теплоотражающих экранов [4, 5]. Отправной точкой исследования послужила конструкция блока, предложенная сотрудниками ИГЭУ еще в 2000 году [9]. Для удобства обслуживания в нее были внесены некоторые конструктивные изменения. На рис. 1 приведена конструкция оконного блока, который состоит из корпуса *1* с установленным в нем шкивом *2* который с помощью тросика *6* перемещает металлический экран *4*, свернутый в рулон. Экран открывается (закрывается) по мере необходимости дистанционно от кнопки или в автоматическом режиме от системы управления микроклиматом. Сворачивание и разворачивание экранов осуществляется с помощью системы с электроприводом.

Для управления процессом теплообмена через окно и повышения его термического сопротивления между слоями остекления устанавливались жалюзи с горизонтальными поворотными элементами, выполненными из алюминия (рис. 2). Проводились экспериментальные исследования зависимости термического сопротивления окна вышеуказанной конструкции от угла α наклона к горизонту поворотных элементов жалюзи.

Исследования проводились в лаборатории АНО «Ивановостройиспытания» в сертифици-

Таблица 1

Среднемесячная длительность светового дня в различных городах РФ, %

Город	Среднемесячная относительная длительность светового дня, %		
	Ноябрь	Январь	Март
Краснодар	39,7	36,4	49,9
Москва	34	32	49
Иваново	33,3	30,7	49,1
Санкт-Петербург	30,9	25,8	49,5
Мурманск	23	6	52

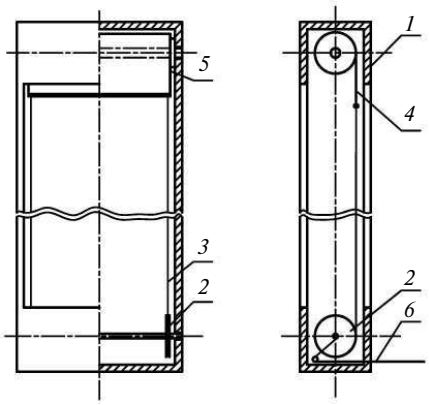


Рис. 1. Конструкция оконного блока с теплоотражающим непрозрачным металлическим сплошным экраном:

1 — корпус; *2* — шкиф; *3* — направляющая; *4* — теплоотражающий экран; *5* — пружина; *6* — управляющий тросик

рованной климатической камере [4], которая состоит из двух отделений (холодного и теплого), соединенных смежной теплоизолированной перегородкой с проемом для установки испытуемого изделия. В холодном отделении можно поддерживать температуру воздуха до минус 25 °С, а в теплом — до плюс 30 °С. Моделирование условий окружающей среды происходит в холодном отделении благодаря рециркуляции воздуха вдоль поверхности испытуемого образца, чем обеспечивается теплообмен с интенсивностью теплоотдачи 20–25 Вт/м^2·С, а в теплом отделении теплообмен обеспечивается естественной циркуляцией воздуха и излучением от ограждений климатической камеры. Температуры воздушной среды, поверхностей теплообмена (стекла, деревянная оболочка окна) измерялись с помощью хромель-копелевых термопар, а тепловые потоки — с помощью накладных тепломеров. Эти датчики подключены к 96-канальному измерителю теплопроводности ИТ-2–96, причем полученная информация сразу же обрабатывается и передается на ЭВМ.

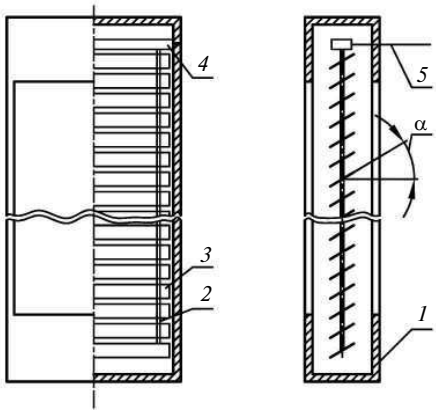


Рис. 2. Конструкция оконного блока с теплоотражающими непрозрачным металлическими жалюзи:

1 — корпус; *2* — направляющие; *3* — алюминиевый поворотный элемент; *4* — крепление; *5* — управляющий тросик; α — угол наклона поворотных элементов жалюзи относительно горизонта

В качестве базовой конструкции (контроль 1) использовался оконный блок (размеры 1000×1000×140 мм) с одним остеклением 4М1, а также с раздельными переплетами (контроль 2), состоящий из ОСП 4М1–10–4М1 и стекла 4М1 (площадь светопрозрачной части — 0,672 м^2, площадь всего окна — 1 м^2).

Результаты экспериментальных исследований

Выход системы на стационарный режим теплопередачи при изменении условий (поднятие — опускание экрана, изменение угла наклона поворотных элементов жалюзи и т. д.) достигался в течение 10–15 минут в зависимости от тепловой инертности конструкции.

Опыты (табл. 2) с использованием алюминиевой фольги толщиной 70 мкм в качестве экрана, установленного между стеклами окна, показали увеличение приведенного сопротивления теплопередаче на 26 % по сравнению с базовым вариантом (контроль 2); в то же время увеличение термического сопротивления светопрозрачной зоны окна составило 48 %. Применение такой непрозрачной конструкции целесообразно в темное время суток, доминирующее в течение отопительного периода практически на всей территории России.

Следовательно, временным введением дополнительной конструкции в окно мы регулировали его термическое сопротивление.

Следует отметить, что благодаря применению экранов повысилась температура на внутренней поверхности остекления оконного блока (рис. 3), что немаловажно, так как в нижней части остекления располагается наиболее опасная зона для выпадения конденсата, инея и образования наледей, особенно при наличии высокой влажности внутри помещения.

Таблица 2

Значения приведенного термического сопротивления в зависимости от вида конструкции оконного блока [9,10 и 11]*

Описание конструкции окна (материал и расположение экрана)	Приведенное термическое сопротивление теплопередаче светопрозр. части $R_0^{пр}$, м² °С/Вт/ %	Среднесуточное приведенное термическое сопротивление теплопередаче, $R_0^{пр.сут}$, м² °С/Вт/ %	Тепловые потери оконного блока площадью 1м² за отопит. период, $Q_{год}$, Гкал	Снижение тепл. потерь (экономия) за отоп. период, %
Контроль 1	0,348 / 100	0,452 / 100	0,289	–
Контроль 2	0,568 / 100	0,606 / 100	0,191	–
Внутри — метал. экран (контроль 1)	0,537 / 149	0,573 / 127	0,201	30
Между стеклом и стеклом — метал. экран (контроль 2)	0,841 / 148	0,768 / 126	0,155	19
Между стеклом и стеклом — метал. жалюзи (α = 90°) (контроль 2)	0,813 / 143	0,753 / 124	0,157	17,8
Между стеклом и стеклом — метал. экран + метал. экран внутри (контроль 2)	1,197 / 211	0,942 / 155	0,128	33
Экран снаружи, внутри и между слоями остекления (контроль 2)	1,323 / 233	0,996 / 164	0,122	36

* Рассчитано для условий отопительного периода Ивановской области

По поводу установки металлического жалюзи следует отметить тот факт, что максимальное приведенное термическое сопротивление $R_{пр}^0$ = = 0,813 м² °С/Вт было получено при α = +90°, когда жалюзи полностью перекрывали световой проем (рис. 4).

При этом воздушная прослойка межстекольного пространства разделялась на две, снижая конвективную составляющую теплообмена [2]. Образовавшийся теплоотражающий экран снизил лучистую составляющую, поскольку каждый поворотный элемент выполнен из алюминия с высокой теплоотражающей способностью.

В рамках работы было решено также исследовать энергетическую эффективность жалюзи, представленных на современном рынке данного вида продукции. В предприятии розничной торговли были закуплены эмалированные жалюзи. С одного из опытных образцов химическим и механическим путями было удалено лакокрасочное покрытие. В ходе испытания эмалированного образца (табл. 3), проводившегося при α = +90° (угол поворота жалюзи в закрытом состоянии), мы получили увеличение сопротивления теплопередаче окна лишь на 12 %, при установке с внутренней стороны окна, а при испытании очищенных жалюзи, установленных также с внутренней стороны окна, — 37 %. Данный факт объясняется высокой степенью черноты краски, значение которой лежит в пределах 0,91–0,93, что в несколько раз превышает степень черноты алюминия, изменяющейся в пределах от 0,04 (полированный металл) до 0,2 (окисленный металл).

Следовательно, в жалюзи с эмалированными ламелями, предлагаемыми отечественными и импортными производителями, за счет нанесения лакокрасочного покрытия значительно занижен энергосберегающий потенциал данной теплоотражающей конструкции.

На основе проведенных исследований также было выполнено математическое моделирование на базе программы PHOENICS VR. В режиме работы программы «Pre-processor» была создана 3D-модель оконного блока. В качестве испытуемого окна было принято двойное остекление.

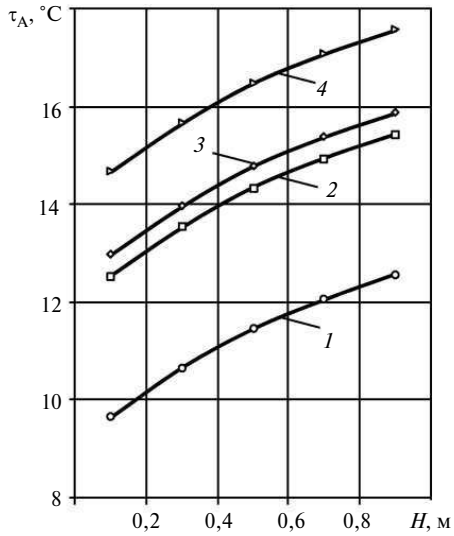


Рис. 3. Изменение температуры на внутренней поверхности остекления средней зоны окна по высоте светопрозрачной части в зависимости от конструкции оконного блока:

1 — без экрана (контроль 2); *2* — экран установлен снаружи (контроль 2); *3* — экран установлен между ОСП и стеклом (контроль 2); *4* — то же плюс экран снаружи (контроль 2)); Температура воздуха в «теплом» отделении камеры $t_{вн}$ = 20 °С, в холодном — $t_н$ = –20 °С

Были смоделированы различные варианты применения металлических экранов, такие, как установка экрана с внутренней стороны (в «теплой» зоне), с наружной стороны (в «холодной» зоне), совместное применение экранов, установка экрана между двумя стеклами. Были заданы соответствующие модели турбулентности и скорости воздушных потоков (в «холодной» зоне), обеспечивающие нормируемые значения коэффициентов теплоотдачи от воздуха к стеклу, включен режим расчета сложного теплообмена с излучением, заданы температуры не только воздушных сред, но и окружающих поверхностей.

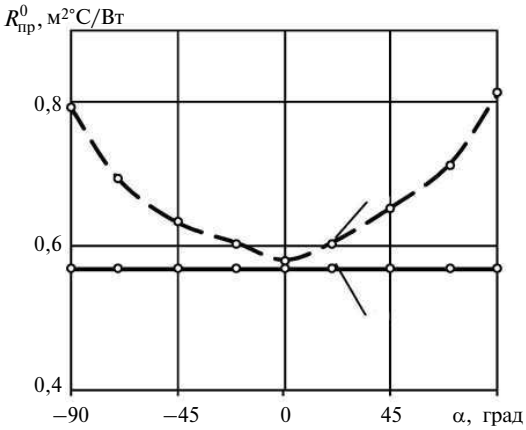


Рис. 4. Зависимость приведенного термического сопротивления окна от угла наклона к горизонту поворотных элементов жалюзи

(*1* — оконный блок без жалюзи (контроль 2); *2* — оконный блок с жалюзи)

В ходе численного моделирования были определены поля температур, а также — тепловые потоки.

В результате моделирования было получено хорошее соответствие экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования (расхождение от 3 до 15 % в зависимости от варианта конструкции), причем, как и при проведении натурного опыта, наибольшую эффективность удалось достичь при применении трех металлических экранов.

При проведении технико-экономических расчетов для условий отопительного периода Ивановской области был определен срок окупаемости мероприятия по установке металлических экранов, который составил 3,9 года (один экран). Для определения экономии тепловой энергии за счет применения теплоотражающих экранов была введена новая величина — «среднее за отопительный период приведенное сопротивление теплопередаче окна» $\overline{R}_{0\,пр\,от\,пер}$, м²°С/Вт:

$$\overline{R}_{0\,пр\,от\,пер} = \frac{R_1 n_1 + \sum_{i=2}^{k} R_i n_i}{n_{от\,пер}},$$

где R_1 — приведенное сопротивление теплопередаче окна без экранов (базовый вариант), м²°С/Вт; n_1 — время за отопительный период без использования экранов, час; R_i, n_i — соответственно приведенное сопротивление теплопередаче, м²°С/В, и время использования различных вариантов расположения экранов, час, (в том числе и при разном угле поворота ламелей α); k — число вариантов расположения экранов; $n_{от\,пер}$ — продолжительность отопительного периода, час.

Значения n_i зависят от географической широты расположения здания, графика работы организации, продолжительности отопитель-

Таблица 3

Результаты исследований эмалированных и очищенных алюминиевых жалюзи

Вид конструкции	Плотность теплового потока q, Вт/м^2	Приведенное термическое сопротивление, R, м^2 °С/Вт	Увеличение приведенного термического сопротивления, %
Контрольный вариант (Стеклопакет 4М1–10–4М1–10–4М1)	74,285	0,49	–
Эмалированные жалюзи	66,80	0,55	12
Очищенные жалюзи	54,71	0,67	37

ного периода и т. д. Аналогичная формула использована и при определении среднесуточного приведенного термического сопротивления теплопередаче окна $R_{0\,\text{пр сут}}$, в м^2°С/Вт.

Предложения по применению окон с экранами в зданиях

Для принятия решения о применении сплошного металлического экрана или металлических жалюзи в качестве энергосберегающего мероприятия необходимо руководствоваться следующими соображениями: стоимость металлических жалюзи на порядок выше стоимости сплошного экрана ввиду более сложной конструкции, но жалюзи могут плавно регулировать процесс инсоляции и светопоступления, что немаловажно для создания микроклимата в помещении в летний период. Но даже при угле $\alpha = 0$ жалюзи заметно снижают поступление дневного света в помещение. Исходя из сказанного металлические жалюзи следует устанавливать в окнах, имеющих южную, юго-восточную и юго-западную ориентацию, а сплошные металлические экраны — на северной, северо-восточной и северо-западной сторонах здания.

Существующие центральные (или индивидуальные) системы управления на основе солнечного датчика (фотоэлемент) или программируемого таймера автоматически смогут опускать защитные тепловые экраны в нужное время суток, обеспечив снижение тепловых потерь через окна. Данное обстоятельство весьма существенно, так как на действующих промышленных предприятиях площадь оконных проемов составляет от 20 до 70 % от общей площади ограждающих конструкций.

Применение в темное или нерабочее время суток на промышленных предприятиях, помимо дежурного режима отопления и увеличенной рекуперации в системах вентиляции, еще и теплоотражающих металлических экранов, повышающих коэффициент сопротивления теплопередаче окон, приводит к уменьшению отопительной нагрузки, тем самым вызывая увеличение надежности работы системы теплоснабжения и уменьшение затрат на энергоресурсы по данной статье в диапазоне от 10 до 36 % (как видно из табл. 2) в зависимости от географической широты расположения объекта и климатических данных для региона (табл. 1). Также следует отметить, что повышение температуры на внутреннем остеклении окна за счет применения наружных экранов позволит снизить температуру дежурного режима отопления на 3–4 °С (в зависимости от влажности внутри помещения исходя из условий недопущения образования конденсата на ограждающих конструкциях), что тоже, в свою очередь, приведет к снижению затрат тепловой энергии на отопление.

В то же время, в отличие от конструкций с использованием теплоотражающих покрытий, нанесенных на стекло, окна с регулируемым сопротивлением на основе экранов не вызывают увеличения потребления электрической энергии на искусственное освещение, что особенно актуально для производственных цехов с высокими нормами освещенности рабочих мест.

В летнее время применение металлических жалюзи с солнечной стороны здания снизит поступление солнечной энергии в помещение, тем самым сократив затраты энергии в системах кондиционирования воздуха [12].

В результате проведенных исследований установлено, что положительный энергосберегающий эффект от использования теплоотражающих металлических экранов в окнах имеет место и такие конструкции могут быть рекомендованы к использованию при проектировании ограждений жилых и промышленных зданий, причем предлагаемые конструкции — малозатратны и долговечны. Применение рассмотренных технологий значительно снизит нагрузки на системы энергообеспечения зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савин, В.К.** Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение [Текст] / В.К. Савин.— М.: Лазурь, 2005.— 432 с.

2. **Логвиненко, В.В.** Минимизация теплопотерь образовательных учреждений путем управления процессом теплообмена окон [Текст]/ В.В. Логвиненко, М.М. Титов, М.К. Лисин.— Энергоэффективность.— 2004. № 3.— С. 79–83.

3. **Табунщиков, Ю.А**. Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий [Текст] / Ю.А. Табунщиков, В.И. Ливчак, В.Г. Гагарин, Н.В. Шилкин.— АВОК.— 2009. № 5.— С. 38–44.

4. **Захаров, В.М.** Использование окон с регулируемым сопротивлением теплопередачи в качестве энергосберегающего мероприятия для систем энергоснабжения зданий [Текст] / В.М. Захаров, А.В. Банников, Н.Н. Смирнов.— Вестник ИГЭУ.— 2004. № 4.— С. 11–13.

5. **Захаров, В.М.** Энергосберегающие конструкции окон на основе применения теплоотражающих экранов [Текст] / В.М. Захаров, Л.Б. Калинина, Н.Н. Смирнов.— Светопрозрачные конструкции.— 2008. № 5–6.— С. 42–45.

6. **Борискина, И.В.** Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий [Текст]: Справочник проектировшика. Том II: Оконные конструкции из ПВХ / И.В. Борискина, Н.В. Шведов, А.А. Плотников // СПб.: Изд-во НИУПЦ «Межрегиональный институт окна», 2005.— 320 с.

7. **Carmody, J.** Residental windows: a guide to new technologies and energy perfomance [Текст] / J. Carmody, S. Selkowitz, L. Heschong // New York, 2000.

8. **Табунщиков, Ю.А.** Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания [Текст] / Ю.А. Табунщиков.— Энергосбережение.— 2008. № 2.— С. 16–21.

9. **Авторское свидетельство № 16011 на полезную модель**. Оконный блок / В.М. Яблоков, Н.М Ладаев.— М., 2000.— Свидетельство от 07.03.2000 г.

10. **Патент на полезную модель № 84042.** Оконный блок / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов.— М., 2008.— 17.12.2008.

11. **Патент на полезную модель № 95725.** Оконный блок / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов.— М., 2010.— 24.02.2010.

12. **Пыжов, В.К.** Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека [Текст]: Учебное пособие / В.К. Пыжов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». — Иваново, 2008.— 496 с.

УДК 621.165.001.2

К.Л. Лапшин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ПРИМЕНЕНИЕМ «ИНТЕГРАЛЬНЫХ» СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

Создание конкурентоспособной паровой турбины невозможно без систематического использования современных методов оптимального проектирования, в основе которых лежит детальный проектировочный газодинамический расчет течения водяного пара с учетом пространственной структуры потока. Эти методы должны корректно учитывать такие прогрессивные конструкторские решения, направленные на повышение экономичности турбины, как тангенциальный наклон, саблевидность и обратная закрутка сопловых лопаток, в том числе и их комбинации, что особенно уместно применять для длинных последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин.

Проточные части современных паровых турбин достигли высокой степени аэродинамического совершенства. Вместе с тем огромные мощности и длительные сроки эксплуатации делают экономически оправданным поиск даже десятых долей процента КПД турбин. Обнаружить скрытые резервы повышения экономичности паровых турбин можно, используя на этапе проектирования проточных частей математические методы целенаправленного поиска оптимального варианта — методы нелинейной оптимизации, реализуемые на ЭВМ. Общий подход к постановке и решению задач компьютерной оптимизации проточных частей паровых и газовых турбин изложен в монографии [1].

Для практического решения весьма сложной научно-технической проблемы компьютерной оптимизации ЦНД паровых турбин разработан авторский программный комплекс CND.OPT в среде ТУРБО-ПАСКАЛЬ для персональных компьютеров (ПК) [1]. Этот комплекс имеет широкие возможности и может быть использован как в режиме компьютерной оптимизации, так и в режиме диалога с ПК.

Основу математической модели этого комплекса составляет проектировочный газодинамический расчет (обратная задача) проточной части ЦНД паровой турбины при заданных диаметрах и высотах лопаточных венцов в цилиндрической системе координат в двухмерной постановке задачи. Расчетные сечения z = const располагаются в межвенцовых зазорах проточной части.

В сечениях z = const вдоль радиуса ищется совместное решение уравнения

$$c = c_c \exp\left\{\int_{r_c}^{r} \frac{1}{1+\mathrm{tg}^2\alpha+\mathrm{tg}^2\alpha\,\mathrm{tg}^2\gamma}\times\right.$$

$$\times\left[\mathrm{tg}\alpha\left(\frac{\mathrm{tg}\delta}{B(r)}-\frac{\mathrm{tg}\alpha\,\mathrm{tg}\gamma}{r}\left(\mathrm{tg}\gamma+\frac{(\mathrm{tg}\gamma''-\mathrm{tg}\gamma')r}{r''-r'}\right)\right)-\right.$$

$$\left.\left.-\frac{A(\Delta\alpha)}{r}\right]dr\right\} \qquad (1)$$

и уравнения неразрывности [1]. Уравнение (1) представляет собой результат совместного решения уравнений движения в форме Эйлера и уравнения энергии [1]. В уравнении (1): c — абсолютная скорость пара; α — угол между проекцией вектора скорости c на плоскость $z - u$ и положительным направлением оси u; γ — угол между проекцией вектора скорости c на плоскость $r - z$ и положительным направлением оси z; δ — угол тангенциального наклона линии центров масс сечений сопловых лопаток (ТНСЛ) относительно радиуса в плоскости $r - u$; $B(r)$ — расстояние вдоль оси z между входными кромками сопловых и рабочих лопаток; $A(\Delta\alpha)$ — коэффициент, учитывающий характер изменения угла α_1 по высоте сопловых лопаток; r — текущий радиус; индексы «′, ″, c» указывают на принадлежность параметра соответственно к корневому, периферийному или среднему радиусу.

В сечениях за рабочими лопатками в уравнении (1) по соображениям прочности обычно принимается $\delta = 0$ и методом итераций находится такое распределение углов α_2 потока, чтобы удовлетворить условию постоянства удельной мощности вдоль радиуса ступени.

Проектировочные расчеты выполняются для дозвуковых и сверхзвуковых скоростей потока пара с учетом их радиальных составляющих. Свойства водяного пара учитываются путем аппроксимации диаграммы состояния по методике ВТИ [2]. Для учета потерь кинетической энергии созданы полуэмпирические зависимости [1], полученные в основном по результатам экспериментальных исследований на модельных и натурных турбинах, а не плоских решеток профилей. Такой подход позволяет учесть эффекты, связанные с управлением градиентом степени реактивности и уровнем вторичных потерь за счет применения тангенциального наклона, обратной закрутки и саблевидности направляющих лопаток, в том числе и их комбинаций, и вскрыть тем самым дополнительные резервы повышения экономичности турбин.

Применение метода штрафных функций дает возможность свести задачу оптимизации к следующей [1]: максимизировать $\eta_{ТП}(X)$, $X \subseteq E^n$, где $\eta_{ТП}$ — «присоединенная» целевая функция, основу которой составляет внутренний КПД проточной части всей паровой турбины (или отсека), X — совокупность n независимых переменных x_i в n-мерном евклидовом пространстве переменных.

Для решения задач компьютерной оптимизации разработана процедура «Поиск» [1], которая реализует основную идею релаксационного метода (метод покоординатного спуска, метод Гаусса — Зейделя) — раздельную оптимизацию по каждой из переменных при фиксированных значениях остальных переменных. В отличие от классического подхода, при оптимизации по каждой из переменных используется не градиентный метод, а прямое упорядочение вариантов по критерию эффективности (метод прямого поиска).

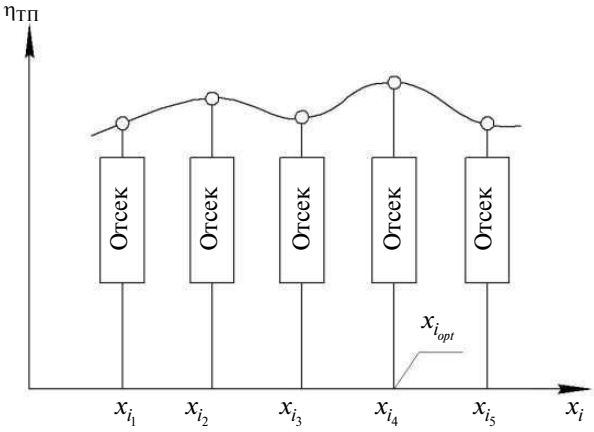


Рис. 1. Элемент процедуры «Поиск»

Суть работы процедуры «Поиск» поясняет рис. 1. После ввода исходных данных одной из варьируемых величин x_i присваивается ряд значений через одинаковый шаг. За счет выбора диапазона изменения независимой переменной x_i можно переходить от задач дальнего поиска к задачам ближнего поиска. Для каждого из значений x_i выполняется процедура «Отсек», т. е. проектировочный газодинамический расчет проточной части осевой тепловой турбины, и определяется функция цели $\eta_{ТП}$. Затем находится значение переменной x_{iopt}, доставляющее максимум функции $\eta_{ТП}$. После этого по аналогичной схеме ищется оптимальное значение следующей независимой переменной, но уже с зафиксированным значением переменной x_{iopt}. Поиск максимума функции $\eta_{ТП}$ с приемлемой точностью требует, как правило, нескольких глобальных циклов раздельной оптимизации по каждой их независимых переменных x_i.

Такой подход к компьютерной оптимизации проточной части ЦНД паровой турбины обеспечивает нахождение максимума целевой функции $\eta_{ТП}$ (основу которой составляет внутренний КПД $\eta_Т$ проточной части ЦНД) для заданных в одномерной сетке значений каждой из независимых переменных, в том числе и на границе области их изменения. В этом случае отпадают проблемы, связанные с возможным «зацикливанием» задачи нелинейной оптимизации. Кроме того, программа для ПК получается простой и компактной, с небольшим потребным объемом оперативной памяти. Поэтому даже для решения задач большой размерности можно использовать ПК среднего класса без обращения к внешней памяти, что позволяет получить решение с заданной точностью за приемлемое время.

При одинаковом числе шагов m_s для каждой из независимых переменных во всех циклах раздельной оптимизации целесообразно в первом глобальном цикле поиска назначать наибольший диапазон изменения каждой из независимых переменных x_i, сужая его в следующих циклах (рис. 2). Этот диапазон A_{si} на цикле I образуется отрезками $A_{si}/2$ справа и слева от заданного зна-

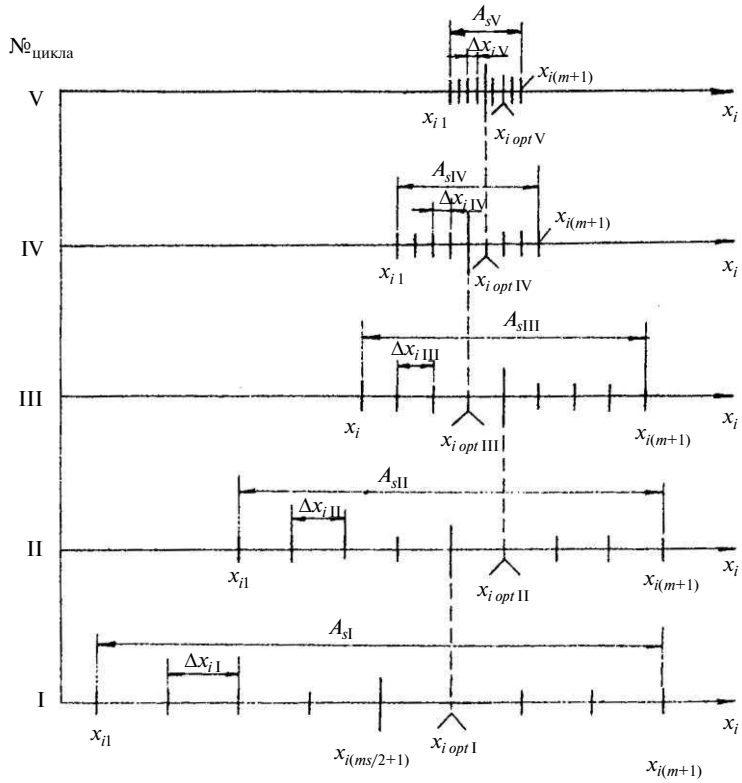


Рис. 2. Изменение диапазона варьирования переменной x_i

чения $x_{i(ms/2+1)}$ переменной на оси координат, а в последующих циклах — от найденных в предыдущих циклах оптимальных значений x_{iopt} этой переменной, благодаря чему и происходит «улучшение» переменной x_i. Таким образом, поиск по каждой из переменных ведется на отрезке соответствующей оси координат, который при переходе от цикла к циклу уменьшается в размерах и перемещается по этой оси. Благодаря такому подходу реализуется также идея переменного шага Δx_i, размер которого уменьшается с приближением к максимуму функции цели.

Изложенный алгоритм оптимизации проточной части осевой тепловой турбины предназначен для решения задач большой размерности. Известно, что для решения таких задач методы ускоренной сходимости могут не дать желаемого результата с точки зрения сокращения общего машинного времени решения задачи на ПК. Этот парадокс объясняется тем, что, несмотря на уменьшение количества шагов поиска, в методах ускоренной сходимости на каждом большом шаге неизбежные итерации вычислительного процесса становятся более сложными и трудоемкими, так что общее количество компьютерных операций может оказаться соизмеримым с рассмотренным выше методом.

Поскольку в процедуре «Поиск» метод прямого упорядочения вариантов по критерию эффективности используется не в чистом виде, а в сочетании с релаксационным методом, то нахождение глобального максимума функции цели, строго говоря, не гарантируется, как, впрочем, и для большинства других методов решения задач оптимизации большой размерности. Однако практика оптимизации на ПК проточных частей турбин показала, что при переходе от цикла к циклу приращение функции цели $\eta_{ТП}$ всегда положительно. Общий прирост целевой функции $\eta_{ТП}$ после завершения компьютерной оптимизации позволяет предположить, что в процессе поиска найдено значение $\eta_{ТП}$, близкое к глобальному максимуму.

Развитый выше подход к решению проблемы компьютерной оптимизации проточной части турбины дает возможность реализовать конкретные практические задачи ее оптимального проектирования.

В качестве примера практической реализации рассмотренных выше положений теории рассмотрим четыре варианта компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД мощной паровой турбины для ТЭС, полученные за счет применения программного комплекса CND. OPT. Меридианные обводы проточной части для всех вариантов ЦНД приняты одинаковыми, относительное удлинение рабочих лопаток последней ступени — $d_{2c}/l_2 = 2{,}58$. Все четыре варианта получены оптимизацией из одной и той же стартовой точки.

Проектировочные газодинамические расчеты ЦНД выполнялись на 11 радиусах. Число ступеней и количество лопаток в каждом венце приняты для всех вариантов одинаковыми. Расход пара, давление, температура и влажность торможения пара перед соплами первой ступени, расходы пара в отборы и давление в потоке пара на среднем диаметре за последней ступенью (0,003 МПа) во всех вариантах расчетов поддерживались также одинаковыми. Основные результаты расчетов представлены в таблице.

Все четыре варианта ЦНД, представленные в таблице, получены в результате компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД. В качестве целевой функции привлекался КПД η_T проточной части ЦНД.

Варьируемыми независимыми переменными служили давления p_1 и p_2 в потоке перед и за лопаточными венцами, кроме давления p_{2n} за последней ступенью, которое во всех вариантах расчета поддерживалось постоянным.

Кроме того, при выборе вариантов 2, 3, 4 варьировался показатель степени n_α в уравнении $\alpha_1 = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha_{1c}\left(r_1/r_2\right)^{n_\alpha}\right)$ и δ'' ТНСЛ в корневых сечениях НА.

Результаты компьютерной оптимизации пятиступенчатого ЦНД мощной паровой турбины

Название параметра	Значение параметра в четырех вариантах ЦНД			
	1	2	3	4
Внутренний диаграммный КПД η_T ЦНД	0,839	0,842	0,846	0,848
Мощность ЦНД, N_T, кВт	29286	29432	29630	29686
Внутренний КПД η последней ступени	0,700	0,704	0,708	0,710
Перепад энтальпий H_0 на последнюю ступень, кДж/кг	245,7	242,8	235,8	232,3
Число Маха $M_{c_1'}$ у корня за НЛ последней ступени	1,875	1,798	1,735	1,700
Число Маха $M_{w_2''}$ у периферии за РЛ последней ступени	1,615	1,607	1,534	1,521
Перепад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ для последней ступени	0,700	0,636	0,555	0,530
Скорость c_1'' у периферии за НЛ последней ступени, м/с	356	358	384	385
Показатель степени n_α ступеней ЦНД	1 1 1 1 0	0,92 0,92 0,89 0,89 0,09	0,85 0,85 0,83 0,88 0,09	0,85 0,84 0,85 0,86 0,09
Углы δ ТНСЛ на корневом, среднем и периферийном радиусах последней ступени, град	0,0 0,0 0,0	8,7 0,0 0,0	7,4 4,6 0,0	3,6 8,9 0,0
Приращение КПД $\Delta\eta_T$ отсека по сравнению с вариантом 1, %	0,0	0,3	0,7	0,9
Приращение мощности ΔN_T, кВт, отсека по сравнению с вариантом 1	0,0	146	344	400

Таким образом, поиск оптимального варианта выполнялся в девятимерном (вариант 1) и в девятнадцатимерном (варианты 2, 3, 4) пространстве варьирования независимых переменных.

Персональный компьютер (ПК) с тактовой частотой 2,3 ГГц анализировал большой ряд ЦНД и выбирал из них оптимальный с максимальными значениями внутреннего КПД η_T и мощности N_T: вариант 1 выбран в результате анализа 168 ЦНД за 48 секунд, вариант 2 — при анализе 521 ЦНД за 114 секунд, вариант 3 — из 521 ЦНД за 139 секунд, вариант 4 принят путем анализа 867 ЦНД за 210 секунд.

Дадим комментарии этим четырем оптимальным вариантам ЦНД.

Вариант 1. Лопаточные венцы первых четырех ступеней закручены по закону потенциального вихря, а последней ступени — по закону постоянства угла α_1 вдоль радиуса. Поэтому при выборе варианта 1 ЦНД (в отличие от вариантов 2, 3, 4) показатель степени n_α в уравнении $\alpha_1 = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha_{1c}\left(r_1 / r_2\right)^{n_\alpha}\right)$ равен единице для первых четырех ступеней и нулю для последней (см. табл.). Линии центров масс сопловых лопаток всех ступеней ориентированы вдоль радиуса (рис. 3), поэтому углы наклона δ на корневом, среднем и периферийном радиусах последней ступени равен нулю — $\delta' = \delta_c = \delta'' = 0$ (см. табл.).

Очевидно, что оптимальный вариант 1 ЦНД располагает определенными резервами повышения экономичности. Так, например, перепад энтальпий H_0 на последнюю ступень чрезмерно велик, поэтому числа Маха $M_{c_1'}$ в корневых сечениях за НЛ и $M_{w_2''}$ в периферийных сечениях за РЛ последней ступени имеют неблагоприятные, высокие значения (см. табл.). По этим причинам внутренний КПД η последней ступени невелик. Перепад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ последней ступени максимален среди рассмотренных вариантов (см. табл.). Степень реактивности у периферии последней ступени велика, поэтому скорость пара c_1'' у периферии за НЛ мала. Это приводит к слабому разгону капельной влаги в межвенцовом зазоре и к повышенной эрозии периферийных сечений рабочих лопаток последней ступени. Чрезмерно высокие числа Маха $M_{w_2''}$ у периферии за рабочими лопатками последней ступени ухудшают работу выходного диффузора. Поэтому для последней ступени целесообразно применить мероприятия по снижению градиента степени реактивности.

Вариант 2. В последнее время в конструкциях паровых турбин с целью снижения градиента степени реактивности и уменьшения вторичных потерь в корневых сечениях направляющих аппаратов (НА) применяются «саблевидные» сопловые лопатки для всех ступеней ЦНД (рис.3).

Отрицательные углы δ'' у периферии НЛ, как в классических «саблевидных» лопатках, в ступенях ЦНД обычно не применяются, чтобы не увеличивать градиент степени реактивности и не уменьшать тем самым разгон капельной влаги у периферии за НЛ. По этому принципу спроектирован ЦНД варианта 2.

По сравнению с вариантом 1 в варианте 2 увеличились: внутренний КПД η_T, мощность N_T, КПД η последней ступени и скорость c_1'' у периферии за НЛ; при этом уменьшились перепад энтальпий H_0, число Маха $M_{c_1'}$ у корня за НЛ, число Маха $M_{w_2''}$ у периферии за РЛ и пере-

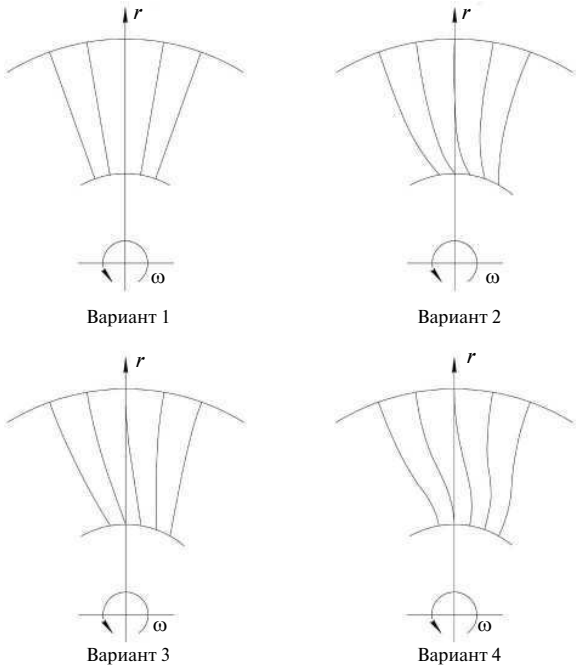


Рис. 3. Линии центров масс сопловых лопаток со стороны выходных кромок; (ω — направление вращения ротора)

пад степени реактивности $\Delta\rho = \rho'' - \rho'$ для последней ступени (см. табл.). Все перечисленные основные результаты компьютерной оптимизации варианта 2 по сравнению с вариантом 1 имеют положительный эффект.

Вариант 3. Ранее в совместных расчетно-теоретических и экспериментальных исследованиях Ленинградского политехнического института и Ленинградского металлического завода был предложен рациональный способ пространственного проектирования сопловых лопаток ЦНД паровых турбин [3]. Суть этого предложения состоит в следующем. Известен сопловой аппарат, лопатки которого от внутреннего до наружного обводов проточной части наклонены в сторону вращения РЛ таким образом, что центры масс НЛ лежат на прямой линии. Однако наклон лопаток ограничен по причине увеличения вторичных потерь у периферии НЛ. Поэтому с целью повышения экономичности турбины и уменьшения эрозионного износа РЛ за счет снижения градиента степени реактивности было предложено линии центров масс периферийных сечений НЛ вывести на радиальное направление [3] (см. рис. 3). Именно по такому принципу были спроектированы сопловые лопатки всех ступеней варианта 3.

Все положительные свойства варианта 2 по сравнению с вариантом 1 усилились в варианте 3 (см. табл.).

Вариант 4. Для сопловых лопаток всех ступеней применено специальное проектирование, суть которого состоит в следующем. В корневых сечениях сопловых лопаток ступеней ЦНД поток пара — околозвуковой или сверхзвуковой, а вторичные потери, как известно, малы [4]. Поэтому оптимальный угол ТНСЛ у корня последней ступени равен всего 3,6 градуса. Далее угол ТНСЛ увеличивается до 8,9 градуса на среднем диаметре с целью снижения градиента степени реактивности. Затем угол ТНСЛ в направлении радиуса уменьшается до нулевого значения у периферии. Линия центров масс сечений сопловой лопатки по конфигурации напоминает знак интеграла (рис. 3). Поэтому назовем этот новый способ пространственного проектирования сопловых лопаток «интегральным».

Все положительные свойства вариантов 2 и 3 по сравнению с вариантом 1 усилились в варианте 4 (см. табл.).

Таким образом, анализ основных результатов вычислительного эксперимента, представленных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что «интегральные» сопловые лопатки в сочетании с компьютерной оптимизацией являются существенным резервом повышения экономичности проточных частей ЦНД мощных паровых турбин.

На следующем этапе проектирования ЦНД требуется перейти к профилированию лопаточных венцов для одного из рассмотренных выше оптимальных вариантов. Для создания лопаточных венцов, которые обеспечат расчетные поля параметров, скоростей и углов потока пара в контрольных сечениях z = const проточной части, необходимо располагать информацией о соотношении между эффективными $\alpha_{1эф}$ и поточными углами α_1 и о коэффициентах расхода лопаточных венцов. Для варианта 1 и для рабочих решеток всех вариантов ($\delta = 0$) такая информация опубликована, например в монографии [4]. Однако для сопловых решеток вариантов 2, 3 и 4 с ТНСЛ такая информация может быть получена только на основе обобщения результатов обширных экспериментальных исследований отсеков турбинных ступеней с ТНСЛ. Поэтому она, как правило, является конфиденциальной. Некоторые соображения по этому поводу изложены в статье [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Ривкин, С.А.** Уравнения состояния воды и водяного пара для машинных расчетов процессов и оборудования электростанций [Текст] / С.А. Ривкин, Е.А. Кремневская // Теплоэнергетика.— 1977. № 3.— С. 69–73.

3. **Авторское свидетельство № 985328.** Сопловой аппарат [Текст] / И.И. Кириллов, К.Л. Лапшин, В.Н. Садовничий, С.А-Г. Вольфовский, В.А. Матвеенко, А.П. Огурцов.— 1982.

4. **Щегляев, А.В.** Паровые турбины [Текст]: монография / А.В. Щегляев.— М., 1976.— 368 с.

5. **Лапшин, К.Л.** Трехмерный газодинамический расчет потока в ступени осевой турбины со сниженным градиентом степени реактивности [Текст] / К.Л. Лапшин, М.С. Панкратов // Энергомашиностроение.— 2006. № 2.— С. 57–60.

УДК 621.313

И.З. Богуславский, Я.Б. Данилевич,
В.В. Попов, В.С. Рогачевский

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Машины двойного питания (МДП) [1, 2] находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности и в энергетике. В режимах двигателя [3] они используются в регулируемых электроприводах, например воздуходувок доменных печей, преобразовательных агрегатов для прокатных станов, турбокомпрессоров и др.; максимальная мощность их достигла 50–60 МВт. В режимах генератора они применяются в энергетических установках, обеспечивающих постоянную частоту напряжения в сети при переменной скорости вращения приводного двигателя (дизель, турбина) [4–7]. В зависимости от типа такого двигателя максимальная мощность МДП различна: для ветроустановок и для малых ГЭС она составляет 5–8 МВт, для генераторов, работающих на электропередачу (ЛЭП), — 400 МВт. МДП используются также и как компенсаторы (максимальная мощность — 60 МВАр). В последние годы стала известна еще одна область применения МДП [8]: изготовлен преобразователь для связи двух энергосистем, в которых синхронные частоты несколько различаются; его максимальная мощность — 100 МВА.

Многочисленные исследования физических процессов в МДП, методов их расчета и проектирования, методов регулирования МДП с целью оптимизация мощности модели были начаты в 20-х годах XX века [1, 9–11]. Их результаты подтверждены экспериментами и практикой эксплуатации в ряде стран Европы и в США. Первоначально рассматривалась работа МДП в режиме двигателя в составе электроприводов (каскады); они различались по принципам регулирования скорости. Несколько позже исследованы квазиустановившиеся и переходные процессы МДП в режиме генератора [6, 7]. В настоящее время в связи с повышением уровня использования МДП и применением преобразователей частоты, которые позволяют регулировать напряжение обмотки ротора по амплитуде и фазе, возникла необходимость [12, 13] более строго учесть насыщение магнитной цепи МДП и влияние режимов МДП на это насыщение, на величину потоков рассеяния обмоток, учесть влияние высших временных гармоник ($Q > 1$) на потери в машине и на форму кривой напряжения.

Формулировка проблемы

Конструктивно эти МДП выполнены аналогично асинхронной машине с фазным ротором [1, 2, 9]: в пазы статора и ротора укладывается многофазная обмотка (обычно трехфазная с целым числом пазов q на полюс и фазу) [2]; активная сталь статора и ротора — шихтованные. На контактные кольца ротора от возбудителя (преобразователь частоты) подается напряжение с частотой скольжения; оно может изменяться по амплитуде и фазе [3, 6, 7]. Отметим, что для обмотки ротора с числом фаз $m_{рот} \geq 3$ синхронный режим МДП недопустим из-за перегрева стержней (катушек) в отдельных фазах обмотки ротора.

Режимы МДП, в отличие от режимов асинхронной машины с фазным ротором, имеют ряд особенностей:

напряжение первой гармоники на зажимах обмотки статора ($Q = 1$) остается неизменным по величине и частоте: $U_{ст\,1} \neq f(n_{вр})$; $f_{ст\,1} \neq f(n_{вр})$; оно может изменяться по фазе относительно тока: $\varphi_{ст\,1} = \text{var}$;

напряжение первой гармоники на зажимах обмотки ротора ($Q = 1$) изменяется по величине и частоте: $U_{рот\,1} = f(n_{вр})$; $f_{рот\,1} = f(n_{вр})$; оно может изменяться по фазе относительно тока: $\varphi_{рот\,1} = \text{var}$;

напряжение обмоток статора и ротора содержит ряд высших гармоник ($Q > 1$): $U_{ст\,Q} = f(n_{вр})$; $U_{рот\,Q} = f(n_{вр})$; $f_{ст\,Q} = f(n_{вр})$; $f_{рот\,Q} = f(n_{вр})$.

Из изложенного следует, что задачу определения электромагнитных нагрузок МДП в эксплуатационных режимах целесообразно подразделить на две. В первой из них учитывается первая гармоника поля в зазоре ($Q = 1$) и определяются электромагнитные нагрузки МДП, мощность (электромагнитный момент), соответствующие данной гармонике. Это позволяет рассчитать возбудитель и преобразователь частоты, которыми комплектуются МДП. Во второй задаче определяются нагрузки, соответствующие высшим гармоникам ($Q > 1$).

Частоты и амплитуды первых гармоник напряжения и тока в обмотках ротора и статора МДП

Соотношения между частотами $f_{рот\,1}$ и $f_{ст\,1}$ при $n_{вр}$ = var. В режимах с изменением скорости вращения ротора ($n_{вр} = \text{var}$) система регулирования преобразователя частоты обеспечивает $f_{ст\,1} \neq f(n_{вр})$; $f_{рот\,1} = f(n_{вр})$. Закон регулирования частоты $f_{рот}$ следует из соотношения

$$f_{ст\,1} = \left| pn_{вр}/60 + f_{рот\,1}(-1)^{A+1} \right|. \qquad (1)$$

Здесь A — признак, определяющий порядок следования фаз для первой временной гармоники напряжения обмотки ротора ($Q_{рот} = 1$), или же направление вращения роторного поля относительно ротора.

Из (1) следуют законы регулирования для преобразователя частоты: в режимах при скоростях вращения $n_{вр} < 60(f_{ст}/p)$ для первой гармоники напряжения обмотки ротора должно обеспечиваться прямое следование фаз ($A = 1$), причем направление вращения роторного поля первой гармоники ($Q_{рот} = 1$) и ротора совпадают. В режимах $n_{вр} > 60(f_{ст}/p)$ должно обеспечиваться обратное следование фаз ($A = 2$), причем направление вращения роторного поля первой гармоники и ротора противоположны. При синхронной скорости ($n_{вр} = 60f_{ст}/p$) частота первой гармоники напряжения должна быть $f_{рот\,1} = 0$. При этом токи в трех фазах обмотки ротора и, соответственно, перегревы обмоток этих фаз неодинаковы.

Соотношения между напряжениями $U_{рот\,1}$, $U_{ст\,1}$ и токами $I_{рот\,1}$, $I_{ст\,1}$ при $n_{вр}$ = var. Система уравнений магнитосвязанных контуров для первой временной и пространственной гармоник. Для первых гармоник напряжения обмоток ротора и статора имеем [14, 15] (здесь и далее величины с точкой сверху обозначают временные комплексные амплитуды):

$$\dot{I}_{рот\,1}[Z_{рот\,1} + Z_{F1(рот)}] + \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{рот\,1} W_{рот} K_{W\,рот}) - \dot{U}_{рот\,1} = 0. \qquad (2)$$

$$\dot{I}_{ст\,1}[Z_{ст\,1} + Z_{F1(ст)}] + \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{ст\,1} W_{ст} K_{W\,ст}) - \dot{U}_{ст\,1} = 0. \qquad (3)$$

Здесь $Z_{рот\,1} = R_{рот\,1} + j2\pi f_{рот\,1} L_{рот\,1}$; $Z_{ст\,1} = R_{ст\,1} + j2\pi f_{ст\,1} L_{ст\,1}$.

В уравнениях (2), (3) значения полных сопротивлений фильтров $Z_{F1(рот)}$, $Z_{F1(ст)}$ вычислены соответственно при частотах $f_{ст\,1}$ и $f_{рот\,1}$. Эти уравнения записаны для МДП в режиме регулируемого двигателя при скоростях вращении согласно (1) при $A = 1$. Для иных возможных режимов МДП оба уравнения аналогичны; они отличаются лишь знаками при слагаемых.

Для магнитосвязанных контуров этих обмоток на основе закона полного тока [14] справедливо

$$\dot{F}_{рот\,1} + \dot{F}_{ст\,1} = \dot{F}_{0\,1},$$

или

$$\dot{I}_{рот\,1}K_1 + \dot{I}_{ст\,1}K_2 + \dot{F}_{0\,1}K_3 = 0, \qquad (4)$$

где

$$K_1 = 2m_{рот} W_{рот} K_{W\,рот}/(p\pi);$$

$$K_2 = 2m_{ст} W_{ст} K_{W\,ст}/(p\pi);$$

$$K_3 = -1;\ \dot{F}_{0\,1} = \dot{F}_{мц\,1} + \dot{F}_{п\,1};$$

$F_{мц\,1}$ — МДС магнитной цепи; $F_{п\,1}$ — составляющая МДС, которая соответствует [15] сумме $P_{п\,1}$ потерь холостого хода и добавочных потерь в машине (с учетом потерь вентиляционных, механических, например трения в подшипниках и др.):

$$\dot{F}_{п\,1} = \dot{I}_{п\,1} K_2, \text{ где } I_{п\,1} \approx P_{п\,1} / (m_{ст} U_{ст\,1}). \quad (5).$$

Эти потери зависят частично от потока $\dot{\Phi}_{0\,1}$, а также от частот $f_{ст\,1}, f_{рот\,1}$; величину $P_{П\,1}$ удобно определять методом итераций. В качестве начального приближения можно задать $I_{П\,1} \approx 0$; практика расчетов подтверждает, что тогда для определения значений $P_{п\,1}$ и $I_{п\,1}$ трех итераций обычно достаточно. Насыщение магнитной цепи машины учитывается характеристикой намагничивания, которая вычисляется согласно [1, 2, 9]:

$$\dot{\Phi}_{0\,1} = \Phi\,(\dot{F}_{мц\,1}). \quad (6).$$

Уравнения (1)–(3), (4), (6) образуют систему для решения первой задачи; в результате этого решения определяются рабочие характеристики МДП в различных эксплуатационных режимах.

При численной реализации этой системы зависимость (6) удобно представить кусочно-линейной функцией.

В системе содержатся шесть комплексных величин, определяющих электромагнитные нагрузки МДП: $\dot{U}_{ст\,1}$, $\dot{I}_{ст\,1}$, $\dot{U}_{рот\,1}$, $\dot{I}_{рот\,1}$, $\dot{\Phi}_{0\,1}$, $\dot{F}_{мц\,1}$. Следовательно, две из них при расчете режима МДП должны быть заданы. Соответственно при решении системы эти величины необходимо перенести в правую часть уравнений (1)—(3), (4).

В практике перед использованием этой системы целесообразно провести решение контрольной задачи. Для нее следует задать $\dot{U}_{рот\,1} = \text{const} = 0$; $\dot{U}_{ст\,1} = \text{const} = \dot{U}_{ст\,1(ном)}$. Задавая ряд значений скорости $n_{вр}$, из (1) определяют ряд значений частоты $f_{рот\,1}$, а из системы — ряд значений $\dot{I}_{ст\,1}$, $\dot{I}_{рот\,1}$, $\dot{\Phi}_{0\,1}$, $\dot{F}_{мц\,1}$ и, следовательно, ряд значений электромагнитной мощности и моментов. Этот ряд величин следует также получить и из схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с помощью метода, изложенного, например, в [16], и сопоставить полученные результаты.

Рассмотрим особенности практических расчетах рабочих характеристик МДП в различных режимах:

в режиме регулируемого двигателя удобным может оказаться, например, задание по амплитуде и фазе значений $\dot{U}_{ст\,1}$, $\dot{I}_{ст\,1}$. Задавая ряд значений скорости $n_{вр}$, из (1) определяют ряд значений частоты $f_{рот\,1}$, а из системы — ряд значений $\dot{U}_{рот\,1}$; $\dot{I}_{рот\,1}$; $\dot{\Phi}_{0\,1}$; $\dot{F}_{мц\,1}$ и, следовательно, ряд значений электромагнитной мощности и моментов. Возможно и решение обратной задачи, если есть ограничения по нагреву обмотки ротора, по мощности преобразователя частоты в цепи ротора. Отметим, что при $n_{вр} > 60(f_{ст}/p)$ обмотке ротора МДП может соответствовать режим генератора;

в режиме компенсатора или генератора удобным может оказаться, например, задание по амплитуде и фазе номинальных значений $\dot{U}_{ст\,1}$, $\dot{I}_{ст\,1}$ и решение аналогичной задачи, как для регулируемого двигателя;

в режиме преобразователя частоты достаточно задать напряжения $\dot{U}_{ст\,1}$, $\dot{U}_{рот\,1}$ обеих систем соответственно с частотами $f_{ст\,1}, f_{рот\,1}$. Из (1) для этих частот следует дополнительно определить скорость вращения ротора $n_{вр}$.

Отметим, что результаты решения системы уравнений (1)–(3), (4), (6) являются исходными для расчета возбудителя и преобразователя частоты в роторе.

Частоты и амплитуды высших гармоник напряжения и тока в обмотках ротора и статора МДП

Соотношения между частотами $f_{рот\,Q}$ и $f_{ст\,Q}$ при $n_{вр}$ = var. Установим связь между частотами напряжений высших гармоник в обеих обмотках. Аналогично (1) получаем

$$f_{ст\,Q} = \left| p n_{вр} / 60 + f_{рот\,Q} (-1)^{D+1} \right|, \quad (7)$$

где D — признак, определяющий порядок следования фаз напряжения для высших ($Q_{рот} > 1$) гармоник обмотки ротора, или же направление вращения роторного поля этой гармоники относительно ротора.

Рассмотрим режимы МДП, представляющие практический интерес [17]. В режимах при скоростях $n_{вр} < 60(f_{ст}/p)$ ($A = 1$) поля ротора временного порядка $Q_{рот}$ = 5, 11, 17, ..., $6K - 1$ (здесь и далее $K = 1, 2, 3, ...$) и ротор вращаются в противоположные стороны ($D = 2$), а поля ротора порядка $Q_{рот} = 7, 13, 19, ..., 6K + 1$ и ротор — в одну сторону ($D = 1$). При скоростях $n_{вр} > 60(f_{ст}/p)$ ($A = 2$) поля ротора порядка $Q_{рот}$ = 5, 11, 17, ..., $6K - 1$ и ротор вращаются в одну сторону ($D = 1$), а поля ротора порядка $Q_{рот}$ = 7, 13, 19, ..., $6K + 1$ и ротор — в противоположные ($D = 2$).

Соотношения между напряжениями $\dot{U}_{\text{рот } Q}$, $\dot{U}_{\text{ст } Q}$ и токами $\dot{I}_{\text{рот } Q}$, $\dot{I}_{\text{ст } Q}$ при $n_{\text{вр}}$ = var. Система уравнений магнитосвязанных контуров для высших гармоник. Система уравнений для учета высших гармоник аналогична (1)–(3), (4), (6). Однако коэффициенты в этой системе (полные сопротивления обмоток ротора, статора и фильтров) вычисляются соответственно при частотах $f_{\text{ст } Q}$ и $f_{\text{рот } Q}$,. Кроме того, для напряжения обмотки статора справедливо соотношение: $\dot{U}_{\text{ст } Q} = \dot{I}_{\text{ст } Q} Z_{\text{вн ст } Q}$; здесь $Z_{\text{вн ст } Q}$ — полное сопротивление нагрузки, которое по отношению к зажимам обмотки статора — внешнее; оно вычисляется при частоте $f_{\text{ст } Q}$. Значения $\dot{U}_{\text{рот } Q}$, $\dot{I}_{\text{рот } Q}$ при ее решении обычно заданы: они определяются предварительно из гармонического анализа напряжений и токов ротора, первая гармоника которых уже определена.

При решении второй системы следует учитывать, что степень насыщения магнитной цепи машины установлена в результате решения первой задачи. Приближенно зависимость между потоком взаимоиндукции $\Phi_{0\ Q}$ и МДС $F_{\text{мц } Q}$ в расчетной области можно представить в виде [15]

$$\dot{\Phi}_{0\ Q} \approx E_N \dot{F}_{\text{мц } Q}$$

Здесь $E_N = (\partial\Phi_{0\ 1}/\partial F_{\text{мц } 1})$**. Знак ** показывает, что производная взята в точке на характеристике намагничивания машины (6), которая соответствует потоку $\Phi_{0\ 1}$; он определен при решении первой задачи.

Экспериментальная проверка методов [12]

Изложенные методы расчета режимов МДП были проверены экспериментально на стенде завода. В качестве МДП был использован асинхронный двигатель с фазным ротором (630 кВт, 6 кВ, $2p = 12$). Возбуждение осуществлялось от преобразовательного агрегата, состоящего из двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Для напряжения высших гармоник $Q_{\text{рот}}$ = 5, 11, 17 был выбран обратный порядок следования фаз (A, C, B), а для гармоник $Q_{\text{рот}}$ = 7, 13, 19 — прямой (A, B, C). Расхождение между расчетными и опытными значениями токов в обмотках не превышало 6 %.

Приложение 1

Общий метод расчета рабочих характеристик МДП, изложенный выше в разделах 1–4, позволяет рассчитать эти характеристики в режимах регулируемого двигателя, компенсатора, генератора, а также преобразователя частоты. Он сводится к решению системы уравнений четвертого порядка в комплексной плоскости. Однако практически целесообразно на основе этой системы уравнений дополнительно создать методику расчета МДП, аналогичную заводским методикам [9] расчета неявнополюсных машин (турбогенераторы, турбодвигатели и асинхронные машины). В производственных условиях она позволяет инженеру учесть опыт разработки традиционных конструкций неявнополюсных машин указанных типов. Основные элементы такой методики применительно к работе с «перевозбуждением» МДП в режимах двигателя, компенсатора, генератора приведены ниже в разделах П.I.1 — П.I.5.

П.1.1. МДС и ток ротора МДП при нагрузке. Воспользуемся законом полного тока согласно уравнению (4). Пренебрежем в выражении для $\dot{F}_{0\ 1} = \dot{F}_{\text{мц } 1} + \dot{F}_{\text{п } 1}$ вторым слагаемым. Амплитуда МДС $\dot{F}_{\text{мц } 1}$ магнитной цепи содержит два слагаемых [1, 2, 9]:

$$\dot{F}_{\text{мц } 1} = \dot{F}_{\text{мц ст } 1} + \dot{F}_{\text{мц рот } 1}. \qquad (8)$$

Первое из них — $\dot{F}_{\text{мц ст } 1} = \dot{F}_{\text{мц заз } 1} + \dot{F}'_{\text{мц зуб } 1} + \dot{F}'_{\text{мц яр } 1}$ — содержит три составляющие: МДС зазора, зубцов и ярма статора. Эти составляющие в (8) определяются зазором, геометрией магнитной цепи статора и потоком взаимоиндукции $\Phi_{\text{вз}}$ в зазоре [9, 14, 18]:

$$\dot{\Phi}_{\text{вз } 1} = \left| j[1/(\omega W_{\text{ст}} K_{W\text{ст}}) E_V \dot{U}_{0\ 1}] \right|;$$

$$E_V = [(\cos\varphi)^2 + (X_{\text{ст } 1} + \sin\varphi)^2]^{0,5}, \qquad (9)$$

где $\omega_{0\ 1}$ — круговая частота сети; E_V — внутренняя ЭДС [9]; $X_{\text{ст } 1}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах (принимаем, что оно значительно больше активного сопротивления $R_{\text{ст } 1}$); $\cos\varphi$ — коэффициент мощности на выводах статора МДП.

Второе слагаемое в (8) $\dot{F}_{\text{мц рот } 1} = \dot{F}''_{\text{мц зуб } 1} + \dot{F}''_{\text{мц яр } 1}$ содержит две составляющие: МДС зубцов и ярма ротора [9]. Обе составляющие определяются суммой $\Phi'_{\text{вз } 1}$ [9, 18] потока взаимоиндукции $\Phi_{\text{вз } 1}$ в (9) и потоков пазового рассеяния ротора $\Phi_{\text{мц расс } 1}$:

$$\Phi'_{\text{вз }1} = \Phi_{\text{вз }1} + \Phi_{\text{мц расс }1}. \qquad (10)$$

Здесь $\Phi_{\text{мц расс }1} = |\dot{F}_{\text{ген экв }1}|\Lambda_{\text{паз расс}}$, где $\Lambda_{\text{паз расс}}$ — проводимость пазового рассеяния ротора [9, 18]; $\dot{F}_{\text{ген экв }1}$ — эквивалентная МДС генератора; следуя методике расчета турбогенераторов и турбодвигателей, определим ее в виде суммы двух комплексных амплитуд [18]:

$$\dot{F}_{\text{ген экв }1} = \dot{F}_{\text{ст }1} + \dot{F}_{\text{мц ст}}. \qquad (11)$$

В практических расчетах модуль комплексной амплитуды в (11) $\dot{F}_{\text{ген экв }1}$ для проверки удобно вычислить в виде [18]

$$(F_{\text{ген экв }1})^2 = (F_{\text{ст }1})^2 + (F_{\text{м ц ст }1})^2 + \\ + 2F_{\text{ст }1}F_{\text{м ц ст }1}\{1 + [(\cos\varphi)/(X_{\text{ст }1} + \\ + \sin\varphi)]^2\}^{(-0,5)}. \qquad (12)$$

После определения $F_{\text{ген экв }1}$ по (11) или (12), $\Phi'_{\text{вз }1}$ по (10) последовательно определяются МДС $F'_{\text{м ц зуб }1}$, $F'_{\text{м ц яр }1}$ и $F_{\text{м ц рот р}1}$; в результате получаем составляющую в МДС $F_{\text{м ц }1}$ магнитной цепи МДП.

Искомую комплексную амплитуду МДС ротора при нагрузке $\dot{F}_{\text{рот }1}$ вычисляем согласно (4).

Найдем сначала составляющие этой комплексной амплитуды в координатах статора (вещественная ось совмещена с комплексом фазного напряжения, мнимая — составляет с ней угол + π/2):

$$\text{Re}\,\dot{F}_{\text{рот }1} = -F_{\text{м ц }1}\sin\psi - F_{\text{р я }1}\cos\varphi;$$

$$\text{Im}\,\dot{F}_{\text{рот }1} = F_{\text{м ц }1}\cos\psi + F_{\text{р я }1}\sin\varphi. \qquad (13)$$

Здесь фазовый угол МДС $F_{\text{м ц }1}$ равен

$$\psi = \arccos[(X_{\text{ст }1}\sin\varphi + 1)/E_V] + \pi/2;$$

угол φ — соответствует коэффициенту мощности МДП. Отметим, что согласно (13) в принятой системе координат комплекс МДС $\dot{F}_{\text{м ц }1}$ расположен так, что угол ψ находится в пределах $\pi/2 \le \psi < \pi$. В практических расчетах модуль комплекса $\dot{F}_{\text{рот }1}$ для проверки вычисляется аналогично (12):

$$(F_{\text{рот }1})^2 = (\text{Re}\,\dot{F}_{\text{рот }1})^2 + (\text{Im}\,\dot{F}_{\text{рот }1})^2 = \\ = (F_{\text{ст }1})^2 + (F_{\text{м ц }1})^2 + \\ + 2F_{\text{ст }1}F_{\text{м ц }1}\{1 + [(\cos\varphi)/(X_{\text{ст }1} + \sin\varphi)]^2\}^{(-0,5)}. \qquad (14)$$

Из соотношения (14) следует, что для МДП будет $F_{\text{рот }1} > F_{\text{ст }1}$.

Ток ротора при нагрузке $\dot{I}_{\text{рот }1}$ определяется согласно (14) из известных соотношений [9], используемых для МДС многофазной обмотки.

П.I.2. Фазовый угол, определяющий положение комплексных амплитуд МДС $\dot{F}_{\text{рот }1}$ и тока $\dot{I}_{\text{рот }1}$ (в координатах статора). Используя выражение (13), получаем

$$\beta = \text{arctg}\,[(\text{Im}\,\dot{F}_{\text{рот }1})/(\text{Re}\,\dot{F}_{\text{рот }1})]. \qquad (15)$$

Отметим, что согласно (13) в принятой системе координат комплекс МДС $\dot{F}_{\text{рот }1}$ расположен так, что угол β находится в пределах $\pi/2 < \psi < \varpi$.

П.I.3. Напряжение обмотки ротора, его составляющие.

Преобразуем уравнение (2) для комплекса $\dot{U}_{\text{рот }1}$ для того, чтобы найти его вещественную и мнимую составляющие. Они определяют фазовый угол γ этого комплекса. Для этого предварительно вычислим отношение

$$Z_{\text{экв }1} = \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{\text{рот }1}W_{\text{рот}}K_{W\text{рот}})/\dot{I}_{\text{рот }1} = \\ = |Z_{\text{экв }1}|\exp j\delta = R_{\text{экв }1} + jX_{\text{экв }1},$$

где

$$R_{\text{экв }1} = |Z_{\text{экв }1}|\cos\delta; \quad X_{\text{экв }1} = |Z_{\text{экв }1}|\sin\delta \qquad (16)$$

и согласно (13) и (15)

$$\delta = |\arccos[(X_{\text{ст }1}\sin\varphi + 1)/E_V]| + \\ + |\text{arctg}\,[(\text{Im}\,\dot{F}_{\text{рот }1})/(\text{Re}\,\dot{F}_{\text{рот }1})]|.$$

С учетом выражений (2), (16) получаем

$$\text{Re}\,\dot{U}_{\text{рот }1} = (\text{Re}\,\dot{I}_{\text{рот }1})(R_{\text{рот }1} + R_{\text{экв }1}) - \\ - (\text{Im}\,\dot{I}_{\text{рот }1})(X_{\text{рот }1} + X_{\text{экв }1}),$$

$$\text{Im}\,\dot{U}_{\text{рот }1} = (\text{Re}\,\dot{I}_{\text{рот }1})(X_{\text{рот }1} + X_{\text{экв }1}) + \\ + (\text{Im}\,\dot{I}_{\text{рот }1})(R_{\text{рот }1} + R_{\text{экв }1}), \qquad (17)$$

где $X_{\text{рот }1} = j2\pi f_{\text{рот }1}L_{\text{рот }1}$; $X_{\text{ст }1} = j2\pi f_{\text{ст }1}L_{\text{ст }1}$. Согласно (17) модуль амплитуды комплекса этого фазного напряжения равен

$$\dot{U}_{\text{рот }1} = [(\text{Re}\,\dot{U}_{\text{рот }1})^2 + (\text{Im}\,\dot{U}_{\text{рот }1})^2]^{0,5}. \qquad (18)$$

В практических расчетах модуль комплексной амплитуды $\dot{U}_{\text{рот }1}$ для проверки вычисляется из (2) в виде

$$\dot{U}_{\text{рот }1} = |\dot{I}_{\text{рот }1}R_{\text{рот }1} + j\dot{I}_{\text{рот }1}X_{\text{рот }1} + \\ + j\omega S\Phi_{\text{вз }1}W_{\text{рот}}K_{W\text{рот}}2^{(-0,5)}|. \qquad (19)$$

П.I.4. Фазовый угол, определяющий положение комплексной амплитуды $\dot{U}_{\text{рот}}$. В координатах статора угол, определяющий положение комплекса фазного напряжения ротора $\dot{U}_{\text{рот}}$, равен

$$\gamma = \text{arctg}\,[(\text{Im}\,\dot{U}_{\text{рот }1})/(\text{Re}\,\dot{U}_{\text{рот }1})]. \qquad (20)$$

П.I.5. Коэффициент мощности обмотки ротора; активная и реактивная мощность этой обмотки; потери

в обмотке ротора. В системе регулирования МДП необходимо поддерживать с помощью возбудителя (преобразователь частоты) коэффициент мощности обмотки ротора $\cos\varphi_{рот}$ для того, чтобы обеспечить эксплуатационные характеристики МДП при работе в сети (в том числе заданные значения его активной и реактивной мощностей и др.). Он определяется значениями фазовых углов β (15) и γ (20):

$$\varphi_{рот} = \gamma - \beta. \quad (21)$$

Поддержание угла $\varphi_{рот}$ должно осуществляться системой управления МДП в реальном масштабе времени [6, 7].

Из полученных выражений для $\dot{U}_{рот\,1}$, $\dot{I}_{рот\,1}$, $\varphi_{рот}$ обмотки ротора вычисляются [9, 14] полная, активная и реактивная мощности возбудителя (преобразователя частоты), а также потери в обмотке ротора.

Приложение 2

Особенности конструкций обмотки ротора МДП

П.2.1. Особенности конструкции стержневой обмотки [1, 2, 9]. Оценим величину коэффициента Фильда для обмотки МДП большой мощности. Предположим, что высота паза ротора МДП $H = 200$ мм, высота меди в нем — $H_{Cu} = 150$ мм, а коэффициент Фильда для транспонированных стержней при частоте $f_{50} = 50$ Гц равен $K_{F,50} \approx 1{,}25$. При частоте $f_{рот\,1} = 2{,}5$ Гц получаем $K_{F\,S} \approx 1{,}0$. Определим теперь этот коэффициент [9, 14] сначала для того же эквивалентного стержня при $f_{рот\,1} = 2{,}5$ Гц, но при отсутствии транспозиции. Найдем для такого стержня «приведенную высоту» [14] $H_{прив} = K' H_{Cu}$ при промышленной частоте (50 Гц):

$$H_{прив\,50} = [\omega_{50}\mu_0\Delta/(2\rho_{Cu})]^{(0,5)} H_{Cu} = 0{,}085 H_{Cu} = 12{,}5.$$

Здесь μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; $\Delta \approx 0{,}8$ — отношение ширины меди в пазу к ширине паза; ρ_{Cu} — удельное сопротивление меди при 75 °С. Соответственно, при $f_{рот\,1} = 2{,}5$ Гц получаем $H_{прив\,рот\,1} = 2{,}8$. Примем, что отношение пазовой части стержня к его длине равно $\lambda \approx 0{,}75$. Тогда коэффициент Фильда нетранспонированного стержня при $f_{рот\,1} = 2{,}5$ Гц равен $K'_{F,S} \approx 2{,}1$. Это практически исключает возможность применения в конструкции МДП стержней без транспозиции.

П.2.2. Особенности конструкции катушечной обмотки [9, 15]. Для такой обмотки при $H = 200$ мм и $f_{рот\,1} = 2{,}5$ Гц: $K'_{F,S} \approx 1{,}0$. Следовательно, для МДП при скольжениях $S \le 0{,}05$ катушечная обмотка не выдвигает проблем по добавочным потерям в ней и ее перегревам.

Выводы

Методы расчета рабочих характеристик МДП позволяют найти с учетом насыщения магнитной цепи машины напряжения и токи в обмотках, вызванные первой временной гармоникой ($Q = 1$), а также напряжения и токи высших временных гармоник ($Q > 1$), вызванные работой преобразователя частоты в цепи ротора.

Результаты расчета эксплуатационных режимов МДП являются исходными для расчета возбудителя и преобразователя в цепи ротора, а также сопротивления фильтров в обмотках статора и ротора.

Многофазная обмотка ротора МДП может выполняться как стержневой, так и катушечной [2]. В стержневой обмотке возможно применение «неполной транспозиции».

Приложение 3

Список обозначений: $f_{рот\,1}$, $f_{ст\,1}$ — частоты первой гармоники напряжения обмоток ротора и статора; $f_{рот\,Q}$, $f_{ст\,Q}$ — частоты высших гармоник напряжения обмоток ротора и статора; $F_{рот\,1}$, $F_{рот\,Q}$, $F_{ст\,1}$, $F_{ст\,Q}$, $F_{мц\,1}$, $F_{мц\,Q}$ — временные комплексы амплитуд МДС обмоток ротора, статора и магнитной цепи машины, $I_{рот\,1}$, $I_{рот\,Q}$, $I_{ст\,1}$, $I_{ст\,Q}$, $I_{мц\,1}$, $I_{мц\,Q}$ — временные комплексы амплитуд токов обмоток ротора и статора; $K_{W рот}$, $K_{W ст}$ — обмоточные коэффициенты для обмоток ротора и статора; $L_{рот\,1}$, $L_{ст\,1}$ — индуктивности рассеяния обмоток ротора и статора; $m_{рот}$; $m_{ст}$ — число фаз обмоток ротора и статора; $n_{вр}$ — скорость вращения ротора; P — мощность; p — число пар полюсов; $Q_{рот}$, $Q_{ст}$ — порядки временных гармоник напряжения обмоток ротора и статора; $R_{рот\,1}$, $R_{рот\,Q}$, $R_{ст\,1}$, $R_{ст\,Q}$ — активные сопротивления обмоток ротора и статора; $U_{рот\,1}$, $U_{рот\,Q}$, $U_{ст\,1}$, $U_{ст\,Q}$ — комплексные амплитуды фазных напряжений обмоток ротора и статора; $U_{ст\,1(ном)}$ — то же для номинальнго фазного напряжение обмотки статора; $W_{рот}$, $W_{ст}$ — число витков в фазе обмоток ротора и статора; $\Phi_{1\,0}$, $\Phi_{Q\,0}$ — комплексные амплитуды результирующих потоков взаимоиндукции; $\varphi_{рот\,1}$, $\varphi_{рот\,Q}$, $\varphi_{ст\,1}$, $\varphi_{ст\,Q}$ — фазовые углы между напряжением и током.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Костенко, М.П.** Электрические машины. Т. 2 [Текст] / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский.— М.— Л.: ГЭИ, 1973.— 655 с.

2. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек.— Л.: Энергия, 1974.— 840 с. 1968.— 730 с.

3. **Онищенко, Г.Б.** Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного притания [Текст] / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева.— М.: Энергия. 1979.— 200 с.

4. **Шефтер, Я.И.** Ветроэнергетические агрегаты [Текст] / Я.И. Шефтер.— М.: Машиностроение, 1972.— 288 с.

5. **Boguslavsky, I.Z.** Wind— Power and small Hydrogenerators Designing Problems [Текст] / I.Z. Boguslavsky, Ja.B. Danilevich // Proceedings of the IEEE Russia (Northwest Section). International Symposium «Distributed Generation Technology».— October 2003.

6. **Блоцкий, Н.Н.** Машины двойного питания [Текст] / Н.Н. Блоцкий, И.А. Лабунец, Ю.Г. Шакарян.— М.: ВНИТИ, 1979.— 123 с.

7. **Ботвинник, М.М.** Управляемые электрические машины переменного тока [Текст] / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян.— М.: Наука, 1969.— 140 с.

8. Modern Systems.— 2002. № 4.— С. 23.

9. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред. И.П. Копылова.— М.: Энергия. 1980.— 495 с.

10. **Walker Miles.** The Control of the Speed and PF of Induction Motors [Текст] / Walker Miles // London: Pittman. 1924.— 153 p.

11. **Дрейфус, Л.** Коллекторные каскады [Текст] / Л. Дрейфус. — М.: ОНТИ, 1934.— 259 с.

12. **Антонов, В.В.** Методы расчета установившихся режимов АСГ [Текст] / В.В. Антонов, И.З. Богуславский, Е.Ю. Кочеткова, В.С. Рогачевский // Электротехника.— 1992. № 2.

13. **Богуславский, И.З.** Методы исследования режимов машины двойного питания с учетом насыщения и высших гармоник [Текст] / И.З. Богуславский // Известия АН СССР. Сер.: Энергетика транспорт.— 1992. № 1.

14. **Демирчян, К.С.** Теоретические основы электротехники (в трех томах) [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.— М.-СПб.: Питер, 2004.

15. **Богуславский, И.З.** Двигатели и генераторы переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами [Текст] / И.З. Богуславский.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.— Т. 1.— 390 с. Т. 2 — 130 с.

16. **Антонов, В.В.** Расчет мощного асинхронного двигателя с нелинейными параметрами [Текст] / В.В. Антонов, И.З. Богуславский, М.Г. Савельева // Электросила.— 1984. № 35.

17 **Богуславский, И.З.** Методы исследования зубцовых ЭДС мощных машин двойного питания [Текст] / И.З. Богуславский, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин // Известия РАН. Сер.: Энергетика.— 2011. № 1.

18. **Титов, В.В.** Турбогенераторы. Расчет и конструкция [Текст] / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий [и др.]. / Под редакцией Н.П. Иванова и Р.А. Лютера.— Л.: Энергия, 1967.— 895 с.

УДК 621.316.99

Н.В. Коровкин, С.Л. Шишигин

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Заземляющие устройства (ЗУ) рабочего, защитного, молниезащитного и помехозащитного заземления играют важную роль в обеспечении надежности, электробезопасности и электромагнитной совместимости объектов электроэнергетики. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по точности и адекватности как расчетов на этапе проектирования, так и измерений на этапе эксплуатации [1]. ЗУ служит для растекания токов короткого замыкания (КЗ), молнии, импульсных помех и состоит из заземлителей — проводников в земле и в воздухе, включая систему молниезащиты, металлоконструкции зданий и оборудования, грозозащитные тросы воздушных линий, экраны кабельных линий и т. д. Как правило, геоэлектрическая структура земли — многослойная, горизонтально слоистая, включающая локальные неоднородности произвольной формы. Расчету подлежит сопротивление ЗУ, распределение его токов, напряжение прикосновения, шаговое напряжение, распределение потенциала, напряженности электрического и магнитного поля. Таким образом, имеем сложную, теоретически и практически важную задачу. Показать современный уровень ее решения — цель настоящей работы.

Выбор математической модели ЗУ. Наиболее точное решение задачи дает модель заземлителя, основанная, например, на решении уравнений Максвелла с использованием программы FDTD. Но дискретизация расчетного объема потребует огромного числа узлов, поскольку линейные размеры ЗУ на 3–5 порядков превышают сечение проводников, которые определяют шаг сетки. Приходится также искусственно замкнуть расчетную область для задания граничных условий. Цепная модель ЗУ, которая может быть использована в программе EMTP, существенно проще, но адекватно учесть все электромагнитные связи между элементами, тем более — структуру земли и экранирующие эффекты, здесь невозможно. Кроме того, результатом расчета будут интегральные параметры — напряжения и токи элементов, но не дифференциальные — напряженности электромагнитного поля, необходимые в задачах электромагнитной совместимости (ЭМС).

Задачи расчета ЗУ по постановке, методам и требуемым результатам являются цепно-полевыми, а для их решения требуются две взаимосвязанные модели — полевая и цепная (рис. 1). Полевая модель позволяет рассчитать

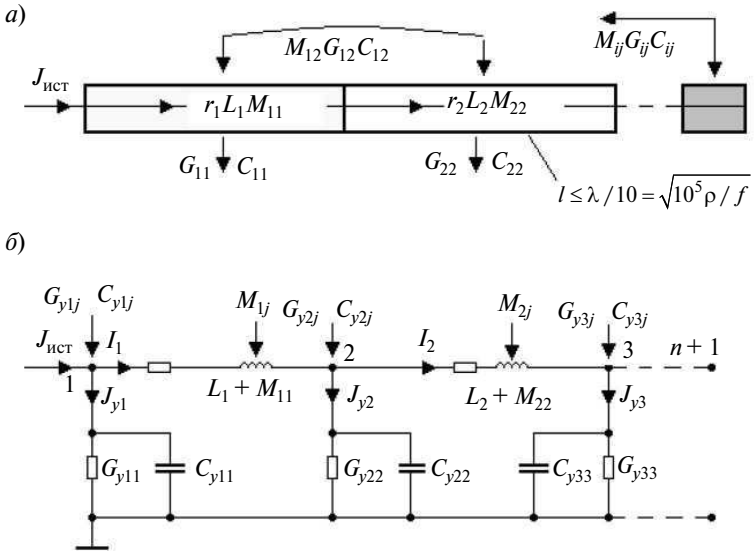


Рис. 1. Полевая (*а*) и цепная (*б*) модели стержневого заземлителя

электромагнитные параметры элементов, которые далее используются в цепной модели для расчета токов элементов. При найденных токах (продольных и стекающих) для расчета характеристик электромагнитного поля вновь используется полевая модель.

Цепно-полевая модель ЗУ. Заземлитель дробится на элементы длиной $l \le \lambda/10 = \sqrt{10^5 \rho / f}$ (где λ — длина электромагнитной волны частотой f в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ), что позволяет проводить расчет электромагнитных параметров элементов в статическом приближении. Предполагается, что источники поля — электрические заряды, а также стекающие и продольные токи сосредоточены на осях проводников круглого сечения. Внутреннее активное сопротивление и индуктивность элементов определяются с учетом поверхностного эффекта и описываются диагональными матрицами **r** и **L**. Электрические и магнитные связи между элементами описываются полностью заполненными матрицами собственных и взаимных проводимостей **G**, емкостей **C**, индуктивностей **M**. Матрица проводимостей растекания тока получается обращением матрицы сопротивлений — $\mathbf{G} = \mathbf{R}^{-1}$.

Элемент R_{ij} матрицы **R**, имеющий смысл взаимного сопротивления в однородной среде с удельным сопротивлением ρ, определяется как отношение потенциала в средней точке i-го элемента к току j-го элемента:

$$R_{ij} = R(p, q, l) = \frac{\rho}{4\pi|l|} \ln \frac{(q + l - p)l + |q + l - p||l|}{(q - p)l + |q - p||l|},$$

где координаты расчетной точки (p) и стержня (q, l) являются арифметическими векторами (рис. 2). Векторная форма записи позволяет применять формулу при любом расположении стержней относительно поверхности земли.

Собственное сопротивление стержня диаметром d определяется как

$$R_{ii} = \frac{\rho}{2\pi|l|} \ln \frac{|l| + \sqrt{|l|^2 + d^2}}{d}, \qquad |l| > d.$$

Векторная форма записи сопротивлений элементов в двухслойной земле приведена в [2]. Матрица **C** емкостей элементов получается обращением матрицы $\boldsymbol{\alpha}$ потенциальных коэффициентов, где элементы α аналогичны (при замене ρ на $1/\varepsilon$) сопротивлениям элементов R_{ij} в однородной земле.

Взаимная индуктивность элементов равна $M_{ij} = \Psi_{ij}/I_j$, где $\Psi_{ij} = \int \overline{A_{ij}}\, \overline{dl_i} \approx \overline{A_{ij}}\, \overline{l_i}$ — потокосцепление i-го стержня с током j-го стержня, которое определяется интегрированием векторного потенциала по длине i-го элемента (стандарт МЭК 60050–121). Используя обозначения рис. 1, получим

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 l_i l_j}{4\pi|l_j|} \ln \frac{(q + l_j - p)l_j + |q + l_j - p||l_j|}{(q - p)l_j + |q - p||l_j|}.$$

Для перехода к цепной схеме ЗУ (рис. 2, *б*) выполняется преобразование матриц **G** и **C**, определенных в средних точках элементов (рис. 2, *а*), в узловые матрицы $\mathbf{G_Y}$ и $\mathbf{C_Y}$ (рис. 2, *б*) из условия неизменности стекающего тока элементов. Топология продольных ветвей схемы (рис. 2, *б*) описывается стандартной матрицей соединений **A** и вводимой матрицей **B** ($b_{i,j} = |a_{i,j}|/2$). Тогда [2] искомые узловые матрицы будут определяться так: $\mathbf{G_Y} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{B}^T$, $\mathbf{C_Y} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{B}^T$.

Цепная модель ЗУ позволяет определить потенциалы и токи (стекающие и продольные) элементов методами теории цепей. При гармонических воздействиях используется метод узловых потенциалов. Методы расчета переходных процессов, возникающих при импульсных воздействиях, рассмотрены далее. По найденным стекающим токам стержней в модели (рис. 2, *а*) определяется распределение потенциала и напряженности электрического поля, по найденным продольным токам — напряженность магнитного поля.

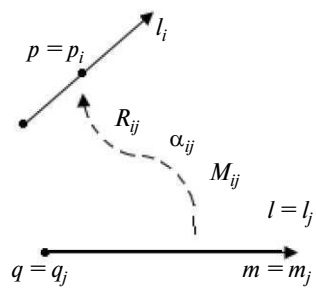


Рис. 2. Определение взаимных параметров i, j-х элементов с координатами $q = q_j = (x_q, y_q, z_q)^T$, $m = m_j = (x_m, y_m, z_m)^T$, $l = l_j = m - q$, $p = p_i = (x_p, y_p, z_p)^T$

Методы расчета импульсных процессов ЗУ. Для расчета импульсных процессов в ЗУ целесообразно использовать частотный метод и метод дискретных схем. Первый позволяет наиболее просто учесть частотную зависимость параметров ЗУ, второй применим для учета нелинейных параметров.

Частотный метод (ЧМ) с искусственной периодизацией сигнала. Ограничим длительность наблюдения за переходным процессом величиной $t_{пп} = (3–10)\,T_1$, где T_1 — длительность переднего фронта волны. Продолжим импульс тока $J(t)$ вне расчетного интервала ($t > t_{пп}$) этой же функцией, но с обращением знака (рис. 3). Получим периодическую функцию $f(t)$ с периодом $2t_{пп}$, обладающую нечетной симметрией:

$$f(t) = \begin{cases} J(t), \ 0 \le t \le t_{пп}; \\ J(t_{пп}) - J(t - t_{пп}), \ t_{пп} < t \le 2t_{пп}. \end{cases}$$

Это позволяет исключить из гармонического ряда четные гармоники:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1,3,5...} A_k \cos(k\omega_1 t + \phi_k), \ \omega_1 = \pi / t_{пп}.$$

Расчет коэффициентов ряда проводится с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Метод дискретных схем (МДС). Стандартная реализация МДС с заменой индуктивности и емкости резистивными моделями на каждом временном шаге известна [3]. Однако для расчета волновых процессов, требующих большей точности при заданном шаге, в развитие работы [4] предлагается метод дискретных комплексных схем. Индуктивность моделируется сопротивлением sL, конденсатор — проводимостью sC, где $s = (2 + \sqrt{2}j) / h$, h — длина шага по времени. Начальные условия n-го шага учитываются источниками $E_n = Li_n$ для катушки и $J_n = Cu_n$ для конденсатора. Проводим расчет комплексной схемы. Переход от изображения к оригиналу проводится по формуле $f(t) = \mathrm{Re}(\,(5\sqrt{2}j - 2)F(s)\,) / h$.

Совместное применение рассмотренных методов позволяет анализировать импульсные процессы с учетом частотных и нелинейных свойств элементов ЗУ и земли. В большинстве задач МДС эффективнее ЧМ по точности и быстроте решения. Поэтому целесообразно расширить область применения МДС на задачи с частотнозависимыми сопротивлениями.

Учет частотнозависимых сопротивлений в МДС. Обычно эта задача решается с использованием эквивалентных схем с близкими частотными характеристиками, но можно предложить более эффективный способ [2].

Пусть задано сопротивление $z(j\omega)$ частотнозависимого элемента или его операторный аналог $Z(s)$. Проинтегрируем $Z(s)$ в пространстве изображений и, перейдя к оригиналу, получим переходное сопротивление $z(t) = L^{-1}[Z(s)/s]$, связывающее между собой напряжение и ток в виде интеграла Дюамеля:

$$u(t) = z(t)i(0) + \int_0^t z(t-x)\,i'(x)\,dx, \ i(0) = 0. \qquad (*)$$

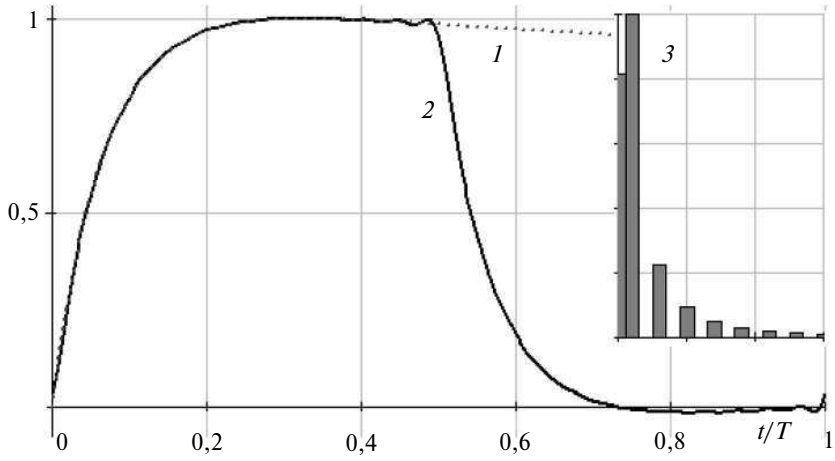


Рис. 3. Импульс тока (*1*) при единичной амплитуде импульса, периодизация (*2*), АЧХ (*3*)

Дискретная форма записи этого интеграла на сетке с узлами $t_n = (n-1)h$, $n = 1, \ldots (N+1)$ при кусочно-постоянной аппроксимации производной тока дает

$$u_{n+1} = \sum_{m=1}^{n} \frac{i_{m+1} - i_m}{h} \int_{t_m}^{t_{m+1}} z(t_{n+1} - x)\, dx =$$

$$= \sum_{m=1}^{n} (i_{m+1} - i_m)\, R_{n-m+1},$$

где (с учетом обозначения $k = n - m + 1$ и подстановки $y = t_{n+1} - x$) дискретное переходное сопротивление k-го интервала равно

$$R_k = \frac{1}{h} \int_{(k-1)h}^{kh} z(y)\, dy, \quad k = 1, \ldots N.$$

Интегрируя в пространстве изображений, вместо $z(t)$ имеем $z_1(t) = L^{-1}[Z(s)/s^2]$. Тогда $R_k = [z_1(kh) - z_1(kh-h)]/h$, $k = 1, \ldots N$, где $z_1(t)$ — реакция цепи на воздействие тока единичной ступеньки $i(t) = t$. Выделяя первое слагаемое u_{n+1}, получим соотношение

$$u_{n+1} = R_1 i_{n+1} - \sum_{m=2}^{n} (R_{n-m+1} - R_{n-m+2})\, i_m =$$

$$= R_1 i_{n+1} - E_n,$$

которому соответствует схема (рис. 4).

Таким образом, сопротивление $z(j\omega)$ полностью описывается дискретными переходными сопротивлениями в шаговых алгоритмах.

В качестве примера найдем дискретное переходное сопротивление стального стержня с операторным сопротивлением $Z(s) = (l/2\pi a)\sqrt{s\mu/\gamma}$, где l — длина, a — радиус стержня. Переходное сопротивление стержня $z(t) = L^{-1}[Z(s)/s] = (l/2\pi a)\sqrt{\mu/\gamma\pi t}$. Тогда дискретные переходные сопротивления

$$R_n = \frac{1}{h} \int_{(n-1)h}^{nh} z(y)\, dy =$$

$$= \frac{l}{a} \frac{\sqrt{\mu/\gamma}}{\pi\sqrt{\pi h}} (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}), \; n = 1, \ldots N$$

зависят лишь от номера n шага.

Учет нелинейных элементов. К ним относится собственная проводимость элемента ЗУ

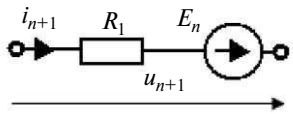


Рис. 4. Дискретная модель сопротивления $z(j\omega)$

с учетом искрообразования в земле (в работе используется модель Е.Я. Рябковой) и с учетом намагничивания железа (используется универсальная кривая Л.Р. Неймана). Нелинейность не вносит принципиальных изменений в работу шаговых алгоритмов — параметры нелинейных элементов при расчете переходных процессов принимаются кусочно-постоянными и равными значению в начале каждого шага. В большинстве случаев насыщение стальных стержней заземлителя мало сказывается на результатах расчета, поэтому рекомендуется выбирать постоянное значение μ/γ стержней по универсальной кривой Л.Р. Неймана, а для оценки погрешности проводить расчет дважды — с минимальным и максимальным значениями μ/γ.

Сопротивление заземлителя при импульсных воздействиях. Допустим, что в результате расчета или измерений известны временные функции напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ на входе заземлителя (рассматриваемого как пассивный двухполюсник). Требуется найти топологию, параметры и входное сопротивление двухполюсника.

Эта задача имеет простое решение в виде активного R или комплексного Z сопротивлений соответственно при постоянном и синусоидальном токе. Сопротивление импульсного заземлителя — функция времени, и для ее реализации используются RLC-схемы заранее неизвестной топологии, что существенно усложняет задачу. Прежде чем приступить к ее решению, рассмотрим подход, нашедший широкое распространение в инженерной практике.

Примем, что сопротивление заземлителя в течение переходного процесса постоянно и равно отношению максимума напряжения к максимуму тока $z_и = u_{max}/i_{max}$. В теории заземления $z_и$ называется импульсным сопротивлением (в курсах ТОЭ под импульсным сопротивлением традиционно понимается реакция цепи на единичный импульс, но терминология здесь не обсуждается). С его помощью легко ре-

шаются три важные задачи: сравнение и нормировка сопротивлений систем молниезащиты, а также расчет перенапряжений. Однако введено оно без должных обоснований, отсюда критическое отношение к нему многих исследователей (действительно, взяли и поделили два значения импульсных функций, причем для разных моментов времени).

Подойдем к определению импульсного сопротивления заземлителя, опираясь на методы теоретической электротехники. Заменим импульсы тока и напряжения эквивалентными синусоидами с частотой $f = 0{,}25/\ T_1$ (эквивалентная частота) при неизменной амплитуде и ограничимся расчетным интервалом $t < T_1$. Тогда комплексное сопротивление заземлителя $Z = \dot{U} / \dot{I} = |Z| e^{j\varphi}$, а модуль сопротивления $|Z(T_1)| = U_m/I_m$ полностью совпадает с импульсным сопротивлением заземлителя $z_и = |Z(T_1)|$. Таким образом, импульсное сопротивление имеет смысл модуля сопротивления на эквивалентной частоте импульса, поэтому является функцией длительности фронта волны $z_и(T_1)$. Расчет зависимости $z_и(T_1)$ можно проводить на импульсе с линейным фронтом, либо по частотной характеристике модуля сопротивления $|Z(f)|$ при $f = 0{,}25/T_1$. Таким образом, понятие импульсного сопротивления заземлителя $z_и(T_1)$ обосновано с помощью метод эквивалентных синусоид. Этот приближенный параметр, зависящий от фронта импульса тока, не рекомендуется применять при $t > T_1$.

Мгновенное сопротивление заземлителя $r(t) = u(t)/i(t)$ — следующий формальный параметр, призванный показать изменение сопротивления заземлителя во времени и используемый рядом исследователей для подбора схем замещения импульсных заземлителей. Введение этого параметра не имеет под собой теоретической основы для *RLC*-цепей, поскольку не учитывает запасы энергии в электрической цепи, поэтому ограничимся лишь констатацией факта его существования.

Точное решение, связывающее временные функции напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$, дает интеграл Дюамеля (*), где $z(t)$ — переходное сопротивление заземлителя, численно равное напряжению двухполюсника при включении единичного тока, является функцией времени и не зависит от длительности фронта волны. Последнее означает, что экспериментальное определение $z(t)$ возможно при любом тестовом импульсе тока, что упрощает требования к измерительному оборудованию.

Для нахождения $z(t)$ воспользуемся дискретной формой записи интеграла Дюамеля на временной сетке с узлами $t_n = (n-1)h$, $n = 1, \ldots (N + 1)$, где N — число интервалов длиной h.

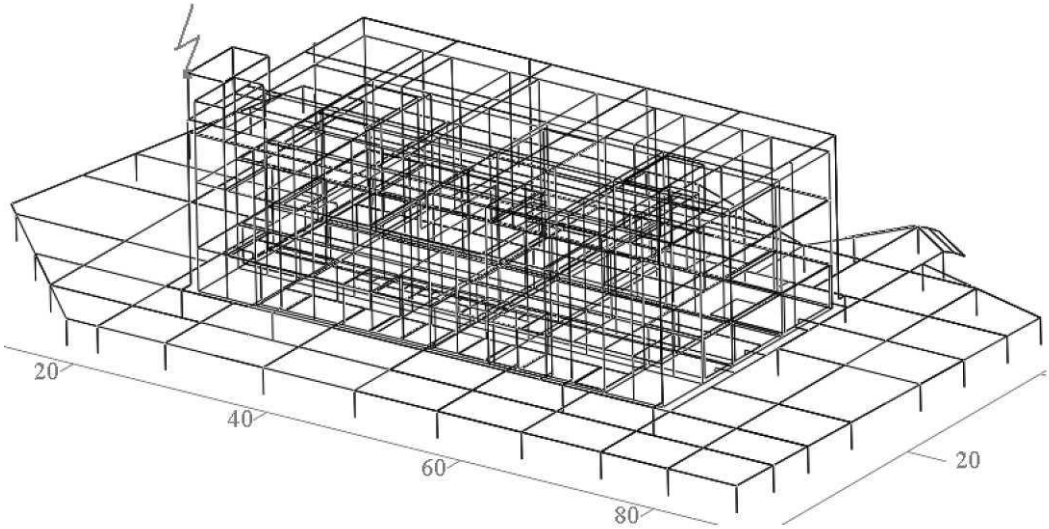


Рис. 5. Геометрическая модель ЗУ электрической подстанции с закрытым распределительным устройством

Примем, что производная тока в пределах каждого интервала постоянна $\left(\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=t_n} = \text{const}\right)$, начальные условия нулевые. Тогда

$$u_{n+1} = \sum_{m=1}^{n} \frac{i_{m+1} - i_m}{h} \int_{t_m}^{t_{m+1}} z(t_{n+1} - x)\, dx =$$

$$= \sum_{m=1}^{n} (i_{m+1} - i_m)\, z_{n-m+1} = z_n i_2 + \sum_{m=2}^{n} (i_{m+1} - i_m)\, z_{n-m+1},$$

откуда получим рекуррентную формулу для определения дискретных значений переходного сопротивления $z_n = z(t_n)$:

$$z_1 = u_2 / i_2;$$

$$z_n = \left[u_{n+1} - \sum_{m=2}^{n} z_{n-m+1}(i_{m+1} - i_m) \right] / i_2;$$

$$n = 2, \ldots N; \quad i_1 = u_1 = 0.$$

Таким образом, переходное сопротивление $z(t)$ получено. С его помощью имеем точное решение при любом импульсном воздействии, а реализация методами синтеза электрических цепей дает схему замещения импульсного заземлителя, что позволяет анализировать процессы в заземлителях с помощью программ расчета электрических цепей.

Программная реализация. Рассмотренные модели и методы расчета ЗУ реализованы в программе ZYM как приложение к AutoCAD. Использование AutoCAD в качестве геометрического процессора (требование проектировщиков) позволяет моделировать сложные объекты (рис. 5) и представлять результаты расчета в виде 2D-, 3D-графиков с анимацией динамики. Сеточная структура стен и металлоконструкций ЗРУ (см. рис. 5) создает объемный электромагнитный экран, существенно снижающий уровень напряженности магнитного поля в местах расположения микропроцессорных устройств.

Расчеты ЗУ в задачах электромагнитной совместимости формулируются как цепно-полевые задачи и требуют совместного использования полевой и цепной моделей. Полевая модель предназначена для расчета электромагнитных параметров цепной схемы и анализа электромагнитной обстановки. Цепная модель обеспечивает наиболее эффективный способ расчета токов элементов (продольных и стекающих) при гармонических и импульсных воздействиях. Расчет переходных процессов проводится методом дискретных схем, которой позволяет учесть нелинейные и частотнозависимые сопротивления и обладает преимуществом перед частотным методом. Разработанные математические модели, методы и программы расчета ЗУ позволяют решать задачи ЭМС, возникающие в электроэнергетике и других отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяков, А.Ф.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике [Текст] / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов [и др.]; под ред. А.Ф. Дьякова.— М.: Энергоатомиздат, 2003.— 768 с.

2. **Шишигин, С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств [Текст] / С.Л. Шишигин // Электричество.— 2010. № 1.— С. 16— 23.

3. **Демирчян, К.С.** Теоретические основы электротехники [Текст]: Учебник для вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин.— 5-е изд. Том 1, 2. — СПб.: Питер, 2009.

4. **Влах, И.** Машинные методы анализа и проектирования электронных схем [Текст] / И. Влах, К. Сингхал / Пер. с англ.— М.: Радио и связь, 1988.— 560 с.

УДК 621.316.93

Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук

ГРОЗОУПОРНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОМПОЗИТНЫМИ ОПОРАМИ

Тема композитных опор для воздушных линий (ВЛ) появилась сравнительно недавно и вызвала в России немалый интерес. Неоспоримые преимущества легких и прочных композитных конструкций позволяют предполагать появление новых технических решений для строительства и ремонта воздушных ЛЭП. Возможно повышение надежности ВЛ при использовании новых опор, упрощение ремонтных работ, снижение эксплуатационных затрат и многое другое. Наряду с преимуществами, имеются и недостатки, которые могут привести к противоположному эффекту.

По итогам конференции «ЛЭП-2012» предложено определить область применения новых опор и решить вопросы, связанные с оптимизацией их конструкций [1]. Важной задачей является определение особенностей грозозащиты ВЛ высокого напряжения с композитными опорами, которые могут быть вызваны применением изоляционного материала в основе конструкции [2].

Влияние конструкции композитных опор на грозоупорность ВЛ

Основная часть конструкции композитной опоры — стойка, которая, как правило, выполняется из стеклопластика. Технология производства обеспечивает опоре необходимую прочность и стойкость к внешним воздействиям. Особое внимание приковано к опорам RStandard™, производимым в Канаде компанией RS Technologies inc. Стойки этих опор выполняются из конических стеклопластиковых модулей, насаживаемых друг на друга по телескопическому принципу. Такая конструкция определяет простоту монтажа, хранения и транспортировки опор. Эти опоры послужили прототипом российских разработок, выполненных ЗАО «Феникс-88» в 2012 году для ВЛ 110–220 кВ [3]. Модули RStandard™ использованы в опорах 110–500 кВ, разработанных для России в 2011 году [4]. Важно отметить, что предложенные конструктивные решения отличаются от принципов использования композитных опор за рубежом.

За рубежом композитные опоры используются в сетях напряжением до 240 кВ. Основной опыт эксплуатации связан с распределительными сетями среднего напряжения. Таким сетям идентичны российские сети напряжением до 35 кВ. Примечателен опыт эксплуатации композитных опор на напряжении 7,2 кВ в Северной Америке, где подтвердились преимущества их использования [5]. Отмечены преимущества композитных опор при их работе в климатических условиях Норвегии в сетях напряжением 132 кВ [6].

Преимущественно зарубежные решения связаны с заменой деревянных опор композитными, которые обладают более хорошими эксплуатационными и экологическими характеристиками. Конструкции композитных опор идентичны конструкциям опор деревянных. Как правило, ВЛ высокого напряжения выполняются одноцепными с горизонтальным расположением проводов. Типовые российские деревянные опоры 35–220 кВ имеют аналогичное исполнение. Высота деревянных опор не превышает 15–20 м, импульсная прочность изоляции увеличена за счет деревянных траверс. Это позволяет ВЛ иметь приемлемую грозоупорность при высокой индуктивности, характерной для заземляющего спуска деревянной опоры. Воздушные ЛЭП без грозозащитных тросов с деревянными опорами имеют значительную грозоупорность по сравнению с аналогичными ЛЭП на железобетонных и металлических опорах, которые, как известно, электропроводящие. Очевидно, что электрические параметры композитных и деревянных опор при их одинаковой конструкции идентичны — в основе используется диэлектрик.

Опоры, созданные для России на основе модулей RStandard™, получили название ПRS и ППRS; они разработаны на классы напряже-

ния 110–500 кВ. Конструкции идентичны типовым железобетонным опорам. Траверсы этих опор — металлические, а грозозащитные тросы заземляются спусками из проводников. Высота некоторых опор превышает 30 м.

Для предварительного изучения грозоупорности ВЛ с композитными опорами проведен сравнительный анализ, основанный на методике руководящих указаний по грозозащите. Для более точного рассмотрения переходных процессов при поражении молнией ВЛ использован программный комплекс ATP (Alternative Transient Program), позволяющий рассматривать схемы произвольной структуры. В результате получена зависимость числа отключений ВЛ 110–330 кВ на композитных опорах в сравнении с ВЛ на опорах традиционных (рис. 1). Из-за высокой индуктивности тела композитной опоры при стандартной импульсной прочности изоляции и значительной грозопоражаемости ВЛ с опорами типа RS могут отключаться в 2–3 раза чаще аналогичных ВЛ с традиционными опорами.

Стеклопластиковые опоры 110–220 кВ, разработанные ЗАО «Феникс-88», получили название ПК. Это двухцепные и одноцепные промежуточные опоры 110–220 кВ, которые отличаются принципиально от опор ПRS только наличием консольных изоляционных траверс вместо стандартных металлических траверс с гирляндами изоляторов.

Еще при изучении опор ПRS было определено, что для повышения грозоупорности одноцепных ВЛ достаточно использовать изоляционную подвеску следующего по уровню класса напряжения, что проблематично по конструктивным соображениям [2]. В опорах сери ПК это условие отчасти выполняется. Строительная длина изоляционной траверсы соответствует длине стандартной подвески следующего по уровню класса напряжения. Изоляционная длина такой траверсы несколько меньше, а при защите поверхности полимерной части разрядными рогами она снижается еще больше. Несмотря на преимущества по изоляции, значительная высота опор ПК может привести к недостаточной грозозащите ВЛ. Оптимизация конструкций, направленная на увеличение импульсной прочности фазной изоляции за счет изоляционных свойств материала опоры, может решить эти проблемы.

Повышение грозоупорности ВЛ 110 кВ при использовании изоляционных свойств опоры и особой конструкции заземляющего спуска исследовали специалисты из Китая. В [7] предложено использовать заземляющий спуск троса, смонтированный на удалении от тела опоры (рис. 2). В конструкциях опор типа ПК и ПRS этот спуск монтируется непосредственно на поверхности стойки и ее изоляционные преимущества не используются. При удалении заземляющего спуска от опоры импульсная прочность изоляции ВЛ определяется промежутком «провод — спуск» по воздуху, а не значительно более низкими разрядными характеристиками полимерных траверс и гирлянд изоляторов. По результатам исследований [7] определено, что грозоупорность ВЛ с композитными опорами рассмотренной конструкции на 58 % выше грозоупорности ВЛ с аналогичными стальными опорами.

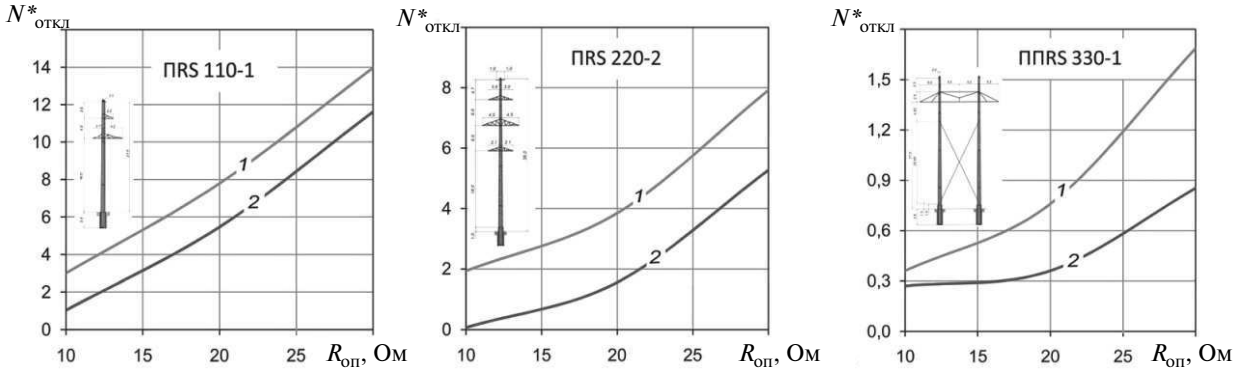


Рис. 1. Зависимость числа отключений ВЛ от сопротивления заземления опор: *1* — композитные опоры ПRS и ППRS; *2* — аналогичные по конструкции опоры унифицированной серии

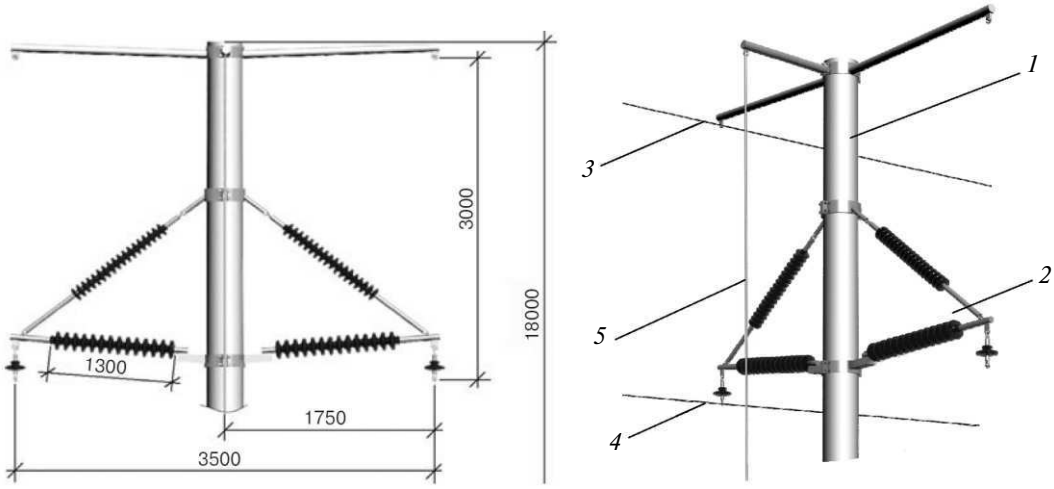


Рис. 2. Композитная опора с особой конструкцией заземляющего спуска:

1 — композитная изоляционная стойка; *2* — изоляционная консольная траверса; *3* — грозозащитный трос; *4* — фазный провод; *5* — заземляющий спуск троса

Перспективы создания изоляционных опор

Традиционно все опоры для ВЛ выполняются проводящими. Это определяет конструктивные особенности, связанные с координацией изоляции. Грозозащитные тросы на таких опорах подлежат обязательному заземлению, а к заземляющему устройству предъявляются жесткие требования по величине электрического сопротивления.

Можно предполагать, что использование композитных материалов в конструкции опоры позволит создать полностью изоляционные опоры. Воздушные ЛЭП с такими опорами будут иметь преимущества по грозоупорности. Возможно не только повышение грозоупорности, но и оптимизация конструкции, что важно для эффективности использования композитных опор. В пользу таких предположений свидетельствует положительный опыт эксплуатации ВЛ с деревянными опорами и исследования, проводимые в Китае с композитными опорами 110 кВ особой конструкции.

Результаты предварительного изучения грозоупорности ВЛ с изоляционными опорами представлены на рис. 3. Они показывают, что оптимизация конструкции может заключаться в упрощении заземляющего устройства, в отказе от заземляющего устройства на части опор (а для ВЛ без троса — на всех опорах), в снижении габаритов ВЛ и т. п. Возможно создание временных

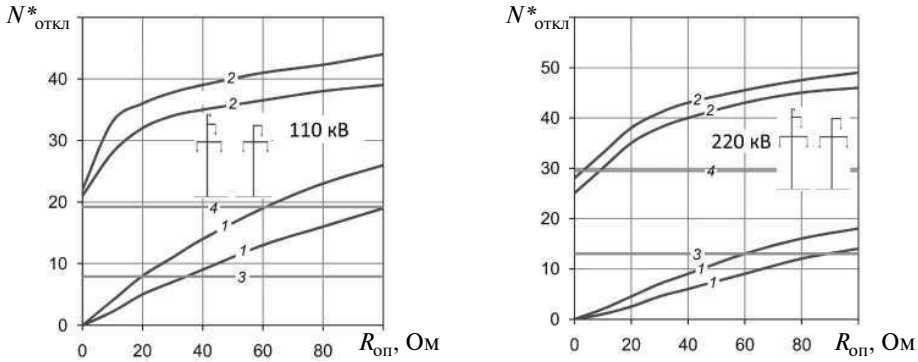


Рис. 3. Зависимость числа отключений от сопротивления заземления для композитных изоляционных опор и для традиционных:

1 — традиционные с тросом; *2* — традиционные без троса; *3* — композитные с разземленным тросом; *4* — композитные без троса

ремонтных опор простой конструкции. В местности, где принято отказываться от грозозащитного троса, возможно повышение грозоупорности при использовании изоляционных опор, а оптимизация конструкции позволит упростить их монтаж и транспортировку в условиях труднодоступной местности.

Интересная задача — применение изоляционных опор на ВЛ с грозозащитными тросами в местности с локальным повышением удельного сопротивления грунта. Обеспечить приемлемое сопротивление заземления для традиционной опоры, установленной, например, на скале, весьма сложно. Более того, любая металлическая заземленная опора, возвышающаяся над окружающими объектами, стягивает на себя грозовые разряды. Особенно сильно данный эффект проявляется в скалистых районах — на фоне остального окружения опора представляется для молнии хорошо заземленным объектом. Изоляцию таких опор принято защищать при помощи аппаратов типа ОПН, но и при этом наблюдались случаи грозовых отключений с тяжелыми последствиями для режима работы энергосистемы. При использовании изоляционных опор в местах локального повышения удельного сопротивления грунта возможно как снижение вероятности разряда молнии в грозозащитный трос, закрепленный на опоре, так и снижение вероятности отключений при грозовых поражениях троса.

Конструктивные особенности композитных опор могут оказывать влияние на грозоупорность ВЛ и эффективность их применения. При исполнении композитных опор по аналогии с традиционными металлическими и железобетонными следует ожидать снижения грозоупорности в среднем в два раза. Чтобы повысить грозоупорность, следует применять изоляционные траверсы консольного типа, а также изучить возможность создания конструкций опор с изоляционными стойками.

Перспективной задачей является изучение особенностей применения изоляционных опор для воздушных ЛЭП высокого напряжения. При этом возможна не только оптимизация конструкции и повышение эффективности применения опор, но и повышение грозоупорности ВЛ.

При формировании требований к композитным опорам следует учесть особенности грозозащиты и возможность расширения области применения этих опор. Композитные опоры могут рассматриваться не только как строительная часть ВЛ, но и в качестве электроизоляционой конструкции. В соответствии с этим следует формировать требования по электрической стойкости к материалу опор и к их исполнению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лавров, Ю.А.** ЛЭП-2012. В Новосибирске обсуждали проблемы линий электропередачи [Текст] / Ю.А. Лавров // Новости электротехники.— 2012. № 4 (76).— С. 58–60.

2. **Бочаров, Ю.Н.** К вопросу о композитных опорах воздушных линий [Текст] / Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук // Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Энергетика.— 2012. Вып. 4. № 1.— С. 78–85.

3. **Власов, В.В.** Опыт разработки, изготовления и проведения испытаний легких одноцепных и двухцепных промежуточных опор из композиционных материалов для высоковольтных линий 110–220 кВ для проведения аварийно-восстановительных работ и применения в труднодоступной местности [Текст] / В.В. Власов, В.М. Сухар // Воздушные линии.— 2012. № 4 (9).— С. 25–35.

4. **Дубина, А.А.** Разработка опор ВЛ высоких классов напряжения на основе линейки композитных стоек RStandard™ в соответствии с требованиями ПУЭ-7 [Текст] / А.А. Дубина // Воздушные линии.— 2011. № 3 (4).— С. 43–47.

5. **Колтарп, С.** Композитные опоры уверенно противостоят стихии [Текст] / С. Колтарп, Т. Вайд // Энергоэксперт.— 2010. № 6.— С. 26–28.

6. **Бочаров, Ю.Н.** Композитные опоры. Перспективы применения для ВЛ 110–750 кВ [Текст] / Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук // Новости электротехники.— 2012. № 1 (73).— С. 22–25.

7. **Zhijun, L.** Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110kV overhead transmission line / Zhijun Li, Han-Ming Li, Min Dai, Shi-Cong Deng, Ding-xie G, Qian-Hu Wei [Электронный ресурс] // 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application / New Orleans, 2010.— P. 473–475. IEEE Xplore (http://ieeexplore.ieee.org). DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.

УДК 621.311

С.П. Высогорец, А.П. Васильев

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАСЕЛ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35–110 КВ

Наиболее дорогостоящее оборудование электрических сетей — это силовые трансформаторы. В России больше половины эксплуатируемого парка силовых трансформаторов работают с превышением назначенного срока (расчетного срока службы).

Анализ отказов силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ за длительный период показывает, что среди причин повреждений — увлажнение, загрязнение трансформаторного масла и твердой изоляции, в том числе продуктами старения [1]. Основным фактором, определяющим реальный срок службы силовых трансформаторов, является твердая изоляция, состояние которой существенно зависит от качества залитого эксплуатационного трансформаторного масла и процессов, протекающих в нем.

Группа электроизоляционных масел*, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ, (масла со сниженной противоокислительной стабильностью) имеет требования к качеству менее жесткие, чем к качеству масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 220 кВ и более.

Своевременная оценка качества масел, проведение мероприятий по поддержанию стабильных характеристик изоляции путем постоянного удаления продуктов старения и своевременное восстановление его ресурса позволят обеспечить требуемый уровень надежности маслонаполненных трансформаторов.

Ресурс трансформаторного масла и его влияние на общий ресурс силового трансформатора

Определение «остаточного ресурса» установлено в ГОСТ 27.002–89 [3] и относится ко всем изделиям. Остаточный ресурс трансформаторного масла — это суммарная наработка трансформаторного масла от момента контроля его технического состояния до перехода качества масла в предельное состояние, при котором недопустима или нецелесообразна его дальнейшая эксплуатация либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Ряд авторов [1, 6, 12, 16] указывают, что остаточный ресурс твердой изоляции тесно связан с остаточным ресурсом трансформаторного масла, поскольку продукты окислительного старения масла в значительной степени влияют на старение твердой изоляции. Таким образом, надежность силовых трансформаторов в значительной степени определяется как ресурсом целлюлозной (твердой) изоляции, так и ресурсом залитого эксплуатационного трансформаторного масла. Существующая нормативная база и подход к организации химического контроля силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ не позволяют оценивать ресурс изоляционных масел, выбирать необходимую номенклатуру и определять оптимальные сроки проведения работ по восстановлению ресурса масла.

В работах в области изучения химической структуры трансформаторных масел отмечается влияние химического структурно-группового состава трансформаторных масел на его эксплуатационные свойства [6, 12, 13].

В силовых трансформаторах старение масла происходит при повышенной температуре за счет совместного воздействия на него молекулярного кислорода воздуха и электрического поля в присутствии материалов, из которых изготовлен трансформатор. Доминирующим фактором старения трансформаторного масла являются окислительные превращения входящих в его состав углеводородов, смолистых и сернистых продуктов. Окисление углеводородов (R–H) протекает по цепному механизму, который осуществляется при помощи свободных радикалов: углеводородного R· и перекисного R–O–O· [6].

* Масла, принадлежащие к I группе по противоокислительной стабильности, а также их смеси со II и/или III группами согласно классификации минеральных изоляционных масел, приведенной в [2].

В отношении кинетики окисления трансформаторных масел следует отметить, что для трансформаторных масел характерна в начале автокаталитическая реакция, а в конце — самотормозящая реакция (рис. 1) [6].

Таким образом, имеются следующие периоды процесса окисления [6]:

1. Начальная стадия, в течение которой нет наблюдаемых видимых измерений масла, называется индукционным периодом. В зависимости от особенностей химического состава масла и условий его применения продолжительность индукционного периода может варьироваться в довольно широких пределах.

2. Вслед за периодом индукции процесс вступает в автокаталитическую стадию в период самоускорения реакции, вызванный, в основном, распадом образовавшихся гидроперекисей на радикалы, который ведет к вырожденному разветвлению.

3. Затем наступает период постоянной скорости процесса, в котором скорость реакций образования и гибели свободных радикалов одинаковы. В этот период образуются продукты окисления фенольного типа, способные тормозить процесс.

4. Когда концентрация продуктов окисления фенольного типа оказывается достаточной, наступает последний период процесса окисления — период самоторможения. В нем кинетическая кривая окисления начинает идти почти параллельно оси абсцисс.

Наиболее чувствительные на разных стадиях старения показатели качества масел — кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, содержание антиокислительной присадки, тангенс угла диэлектрических потерь масла — служат маркерами протекающих процессов окисления.

Важным показателем качества масла, определяющим его устойчивость к старению, является противоокислительная стабильность, т. е. способность масла противостоять окислению.

Изменения показателей качества трансформаторного масла по мере расходования его ресурса

В филиале ОАО «МРСК Северо-Запада» — «Комиэнерго» — были проведены исследования, направленные на поиск зависимости изменения

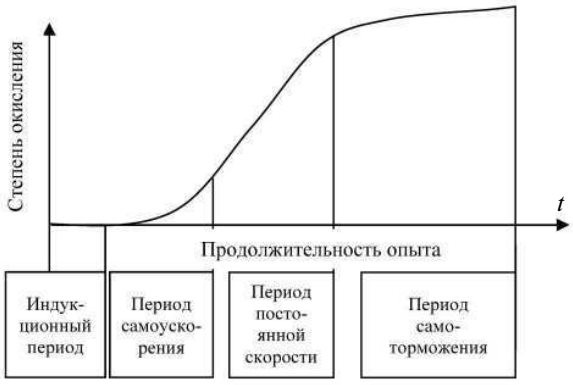


Рис. 1. Кинетическая кривая окисляемости масел

значений показателей качества эксплуатационного трансформаторного масла от степени его старения. Измерение доли утраченного ресурса производилось на силовых трансформаторах напряжением 35 и 110 кВ.

С помощью *U*-критерия Манна — Уитни было установлено, что отличия характеристик качества масла у трансформаторов разных классов напряжения (35 и 110 кВ) статистически незначимы, поэтому все результаты измерений были объединены в одну общую выборку (табл. 1).

Первичная оценка экспериментальных данных была проведена с помощью диаграмм рассеяния на основе корреляционного анализа. При построении диаграмм рассеяния было принято во внимание, что стабильность против окисления масел определяется следующими показателями качества: кислотным числом окисленного масла и количеством осадка, образованного после окисления. Соответственно, на диаграммах рассеяния (рис. 2) ось абсцисс содержит значения показателей качества эксплуатационных масел, ось ординат — значения показателя стабильности против окисления: кислотного числа окисленного масла. В диаграммах рассеяния откликом является кислотное число окисленного масла, фактором — показатель качества масла: кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание антиокислительной присадки агидол-1 (ионол).

Диаграммы рассеяния (см. рис. 2) не показывают корреляции между фактором (показатель качества масла) и откликом (кислотное число окисленного масла). Вместе с тем на диаграммах

Таблица 1

Усредненные результаты измерений силовых трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ

Измеренная доля утраченного ресурса, ед.	Показатели качества масла в трансформатороах 35 и 110 кВ							
	Кислотное число, мгКОН/г		Водорастворимые кислоты и щелочи, мгКОН/г		Тангенс угла диэлектрических потерь масла, %		Содержание агидола-1 (ионола), % массы	
	35 кВ	110 кВ	35 кВ	110 кВ	35 кВ	110 кВ	35 кВ	110 кВ
0	0,0050	0,010	0,00025	0,0011	0,80	1,25	0,085	0,089
0,25	0,014	0,018	0,0015	0,0018	1,85	2,44	0,057	0,089
0,50	0,038	0,035	0,0042	0,0052	4,57	4,55	0,048	0,070

обнаружены области, не содержащие внутри ни одного результата измерения (область № 1).

Границы области № 1 диаграммы (см. рис. 2) определяются следующим образом:

верхняя граница ограничена прямой, проходящей через значение 0,1мгКОН/г оси ординат, что является пороговым значением противоокислительной стабильности эксплуатационных масел трансформаторов 35–110 кВ; ниже этого значения стабильность масел является удовлетворительной;

левая граница ограничена прямой, проходящей через последнее значение в области от 0 до вышеуказанного порогового значения противоокислительной стабильности.

Эта область указывает на то, что начиная с определенного значения показателя качества гарантированно будет иметь место снижение ресурса масла. Сравнение полученных значений показателей качества масла с действующими предельно допустимыми нормами приведено в табл. 2.

Установленные предельно допустимые нормы не обеспечивают гарантированного обнаружения пониженного ресурса масла на ранних стадиях старения.

Для оценки характера взаимосвязи показателей качества масла со степенью его старения усредненные данные представлены графически (рис. 3). Построение графиков усредненных данных проведено на основе регрессионного анализа.

На всех представленных графиках рис. 3 зависимости имеют вид монотонно возрастающей функции. При этом на оси абсцисс есть отрезок — от 0 до точки начала кривой, где доля утраченного ресурса не изменяется и остается равной нулю; предположительно это и есть индукционный период окисления. Характер изменения кривой не противоречит теории окислительного процесса и в совокупности с вышеуказанным отрезком оси абсцисс соответствует классической кривой окисления: в начале — период спокойствия, далее — быстрый рост, затем — постепенное замедление скорости.

Одним из условий применимости для статистической обработки экспериментальных данных корреляционного и регрессионного анализа в классическом виде является представление фактора и отклика количественными характеристиками. Так как в ходе проведенных исследований отклик (противоокислительная стабильность) представлен качественной характеристикой, целесообразно рассмотреть применение методов статистики, которые позволяют получить количественную оценку.

Ввиду того, что по ряду групп результатов измерений выборка мала для того, чтобы судить о распределении генеральной совокупности, при статистической обработке данных использованы непараметрические методы.

Для оценки статистической значимости факторов на основе описательной статистики задано условие: в случае если противоокислительная стабильность не снижена (удовлетворительна), класс стабильности будет; 0, если противоокислительная стабильность снижена класс стабильности — 1. Факторами служат кислотное число, содержание водорастворимых кислот, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание присадки агидол-1 (ионол); откликом — противоокислительная стабильность.

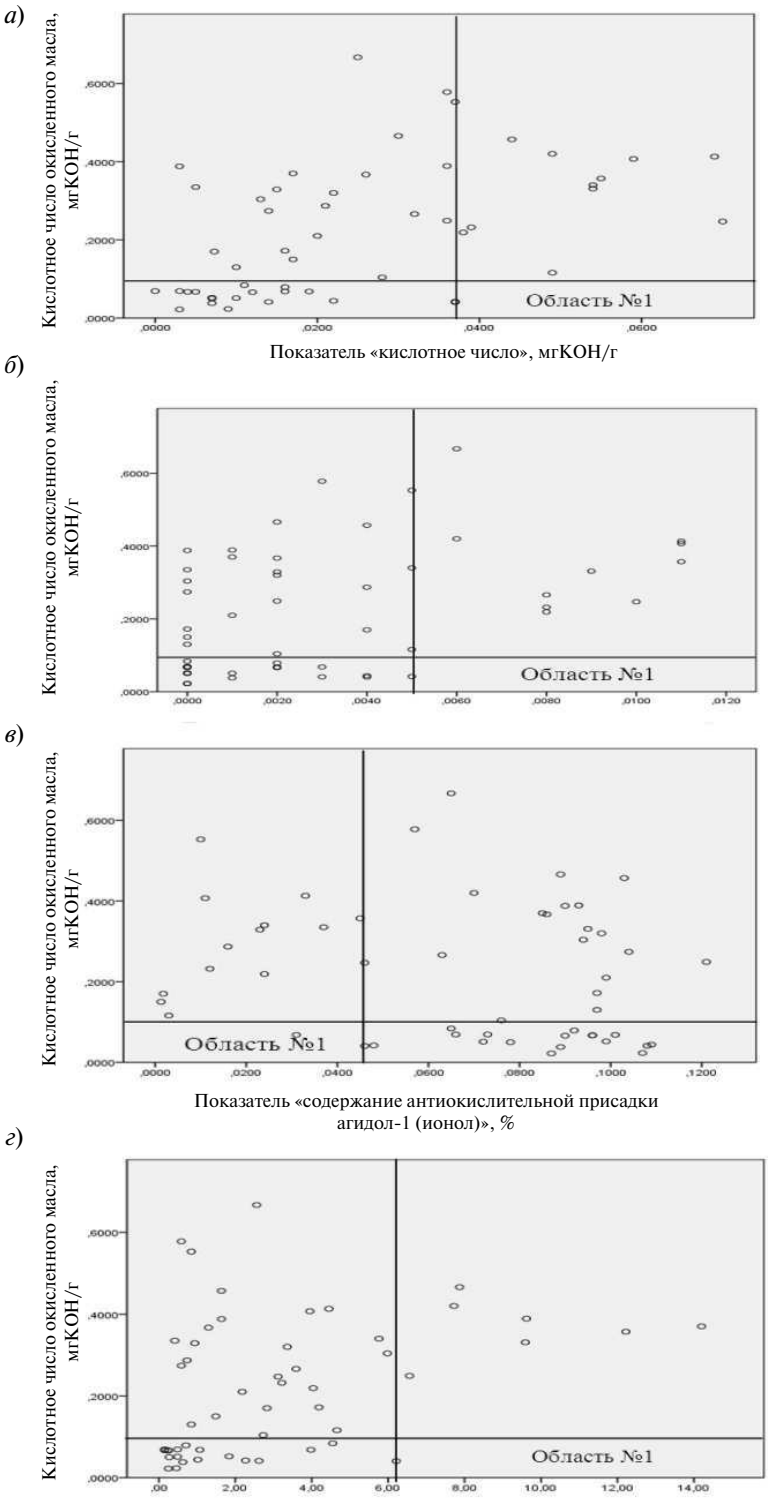


Рис. 2. Диаграммы рассеяния показателей качества масла от значения кислотного числа окисленного масла:

а — кислотное число; *б* — содержание водорастворимых кислот и щелочей; *в* — тангенс угла диэлектрических потерь масла; *г* — содержание антиокислительной присадки агидол-1; ○ — результат измерения

Таблица 2

Измеренные показатели качества масла и предельно допустимые нормы

Наименование показателя качества	Значение диаграммы рассеяния	Предельно допустимая норма
Кислотное число, мгКОН/г	0,04	0,1 / 0,25
Содержание водорастворимых кислот, мгКОН/г	0,005	0,014
Тангенс угла диэлектрических потерь масла при 90 °С, %	6	12 / 15
Содержание присадки ионол, %массы	0,05	0,1*

* Предельно допустимое значение, установленное для силовых трансформаторов напряжением свыше 110 кВ [15]

Учитывая, что медианы более устойчивы к выбросам, для определения статистической значимости различий показателей качества масла разных классов стабильности использованы диаграммы построения доверительных интервалов медиан показателей качества масла (рис. 4).

Расчет статистической значимости измерений показателей качества масла разных классов стабильности по критерию Манна — Уитни приведен в табл. 3.

Величины *P*-значений показателей — кислотное число, содержание водорастворимых кислот, тангенса диэлектрических потерь масла — много меньше 0,05, и доверительные интервалы медиан для разных классов стабильности не пересекаются. Соответственно, различия между значениями вышеуказанных показателей качества масла для разных классов стабильности будут статистически значимыми.

P-значение содержания присадки ионола близко к значению 0,05, доверительные интервалы медиан для разных классов стабильности перекрываются значительно. Соответственно, статистическая значимость между измерениями

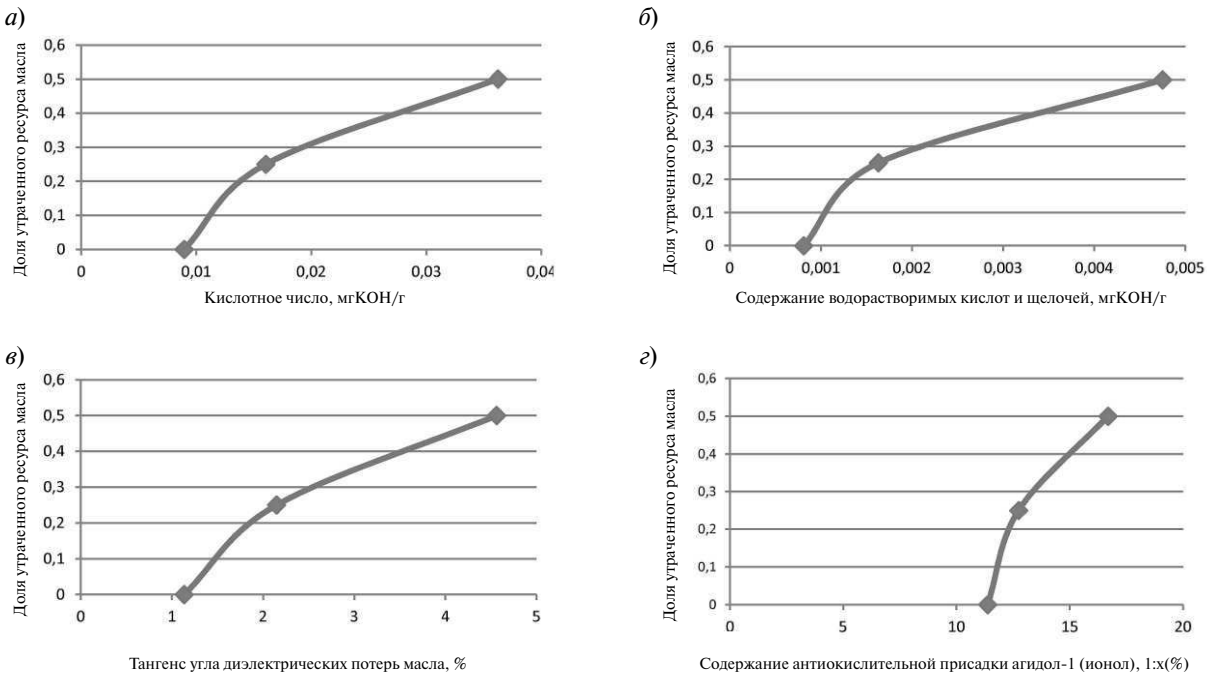


Рис. 3. Графики изменения значений показателей качества масла от доли утраченного ресурса:
а — кислотное число; *б* — содержание водорастворимых кислот; *в* — тангенс угла диэлектрических потерь масла; *г* — содержание антиокислительной присадки агидол-1 (ионол)

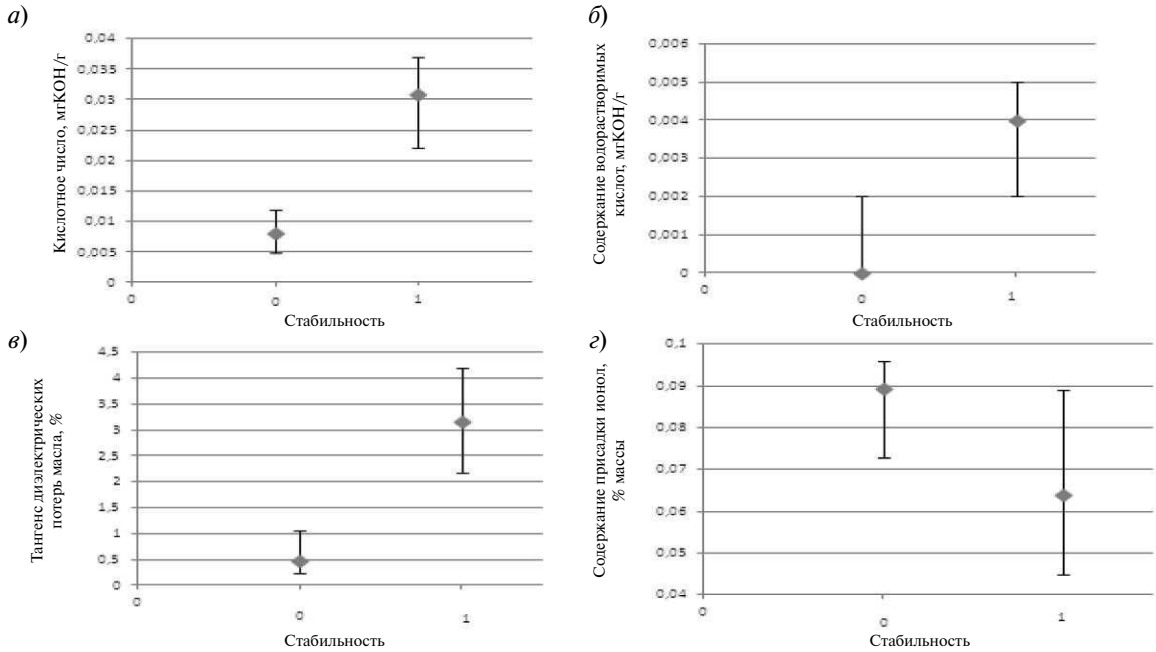


Рис. 4. Графики медиан показателей качества масла для различных классов стабильности с доверительными интервалами:

а — кислотное число; *б* — содержание водорастворимых кислот; *в* — тангенс диэлектрических потерь масла; *г* — содержание присадки ионол; ┼ — значение медианы, с обозначением доверительного интервала ($p = 0,95$)

содержания присадки ионола для разных классов стабильности не доказана. Отсутствие доказательства статистической значимости различий может быть обусловлено или малочисленностью выборки, или слабой способностью данного показателя качества безошибочно обнаруживать изменение ресурса масла. Не исключено, что на результат мог повлиять такой эксплуатационный фактор, как периодические доливки свежего масла в бак трансформатора: введение в бак трансформатора свежего масла с повышенной концентрацией ионола может повлечь некоторое изменение концентрации ионола в эксплуатационном масле.

На основе полученных зависимостей определены оптимальные пороговые значения для следующих показателей качества эксплуатационного масла силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ: кислотное число, водорастворимые кислоты и щелочи, тангенс угла диэлектрических потерь, содержание антиокислительной присадки (см. табл. 4).

Таблица 3

Результаты расчета по критерию Манна — Уитни

Наименование показателя качества масла	*P*-значение / асимптотическая значимость (двухсторонняя)
Кислотное число	0,000004
Содержание водорастворимых кислот	0,000897
Тангенс угла диэлектрических потерь масла	0,000094
Содержание присадки агидол-1 (ионол)	0,039214

Таблица 4

Новые требования к качеству эксплуатационных масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ

Наименование показателя	Значение	
	ограничивающее область нормального состояния	предельно допустимое
Кислотное число, мгКОН/г	Не более 0,04	Не более 0,1
Содержание водорастворимых кислот и щелочей, мгКОН/г	Не более 0,014	–
Тангенс угла диэлектрических потерь масла при 90 °С, %	Не более 6	Не более 12
Содержание антиокислительной присадки агидол-1 (2,6-дитретбутил-4-метил-фенол или ионол), % массы	Не менее 0,1	Не менее 0,05
Стабильность против окисления:		
кислотное число окисленного масла, мгКОН/г;	Не более 0,1	–
содержание осадка образованного после окисления, % массы	Не более 0,01	–

Необходимость изменения требований к качеству эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла

Для обеспечения надежности трансформаторов требуется не только использовать масла высокого качества, но и сохранить их свойства в течение периода эксплуатации. Для этого необходимо уточнить предельно допустимые значения контролируемых параметров, чтобы объективно и точно оценивать текущее состояние масла и его остаточный ресурс.

Необходимо повысить требования по обеспечению сохранения таких характеристик масла, как «кислотное число» и «тангенс диэлектрических потерь масла».

Результаты исследования количественного содержания продуктов старения показали, что установленные в [15] предельно допустимые значения таких показателей качества, как кислотное число и тангенс угла диэлектрических потерь, явно завышены и соответствуют уже глубоким стадиям старения масла.

При этом в стадии глубокого окисления эксплуатационное трансформаторное масло практически не восприимчиво к воздействию присадки, замена силикагеля в термосифонных (адсорбционных) фильтрах на работающем трансформаторе бессмысленна [16]. Поэтому должен быть установлен момент времени, когда достигаются точки максимума.

На основе проведенных теоретических и практических исследований нами предложены приведенные в табл. 4 предельные значения показателей качества эксплуатационных масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ без специальных защит.

Для организации эффективного контроля масла силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ по результатам его физико-химического анализа требуется изменить и перечень измеряемых показателей качества масла при плановом физико-химическом анализе его проб. Измерение таких показателей качества, как кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, тангенс диэлектрических потерь масла, содержание антиокислительной присадки ионол, необходимо установить как обязательные для определения качества масла при плановом физико-химическом анализе. Предлагаемый объем плановых измерений силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ указан в табл. 5.

В перечень показателей для оценки качества эксплуатационных трансформаторных масел необходимо включить новый показатель — ста-

Таблица 5

Рекомендуемая периодичность и объем измерений показателей качества масел силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ

Наименование объекта контроля	Периодичность измерений и перечень измеряемых показателей	
	Измерения с периодичностью 1 раз в 2 года	Измерения с периодичностью 1 раз в 4 года
Силовые трансформаторы напряжением 110 кВ без специальных защит масла	Кислотное число; содержание водорастворимых кислот и щелочей; тангенс угла диэлектрических потерь масла; содержание механических примесей (класс промышленной чистоты); пробивное напряжение; влагосодержание	Кислотное число; содержание водорастворимых кислот и щелочей; тангенс угла диэлектрических потерь масла; содержание механических примесей (класс промышленной чистоты); пробивное напряжение; влагосодержание; содержание анти окислительной присадки агидол-1 (ионол); содержание фурановых производных
Силовые трансформаторы напряжением 35 кВ без специальных защит масла	–	Кислотное число; содержание водорастворимых кислот и щелочей; тангенс угла диэлектрических потерь масла; содержание механических примесей (класс промышленной чистоты); пробивное напряжение; влагосодержание; содержание анти окислительной присадки агидол-1 (ионол)

бильность против окисления; он нужен для тестовой оценки ресурса масла при расширении объема измерений в случае, если масло имеет признаки старения.

Для тестовой оценки ресурса эксплуатационного трансформаторного масла может быть использован метод измерения стабильности против окисления трансформаторного масла, приведенный в ГОСТ 981–75 «Масла нефтяные. Методика определения стабильности против окисления» [7]. Однако в этом случае Методика должна быть доработана в части внесения в нее значений и условий процесса окисления эксплуатационных масел.

Измеряя противоокислительную стабильность эксплуатационного трансформаторного масла путем форсированного окисления пробы масла в лабораторных условиях, оценивают, насколько состояние исследуемого масла в данный момент времени устойчиво к воздействию факторов, определяющих окислительные процессы.

Метод оценки остаточного ресурса для эксплуатационных трансформаторных масел, принадлежащих к I группе по противоокислительной стабильности, а также их смесей со II и/или III группами по классификации минеральных изоляционных масел, разработан и апробирован в филиале ОАО «МРСК Северо-Запада» — «Комиэнерго».

В результате проведенных исследований достигнуто следующее:

Определены наиболее чувствительные к различным стадиям старения показатели качества масел — кислотное число, содержание водорастворимых кислот и щелочей, содержание антиокислительной присадки, тангенс угла диэлектрических потерь масла.

Определены зависимости степени старения (доли утраченного ресурса) эксплуатационных трансформаторных масел от изменения значений показателей его качества.

Показано, что необходимо, во-первых, ввести новый, ранее не применявшийся показатель качества эксплуатационного трансформаторного масла — «стабильность против окисления»; во-вторых, изменить пороговые значения кислотного числа, водорастворимых кислот и щелочи, тангенса угла диэлектрических потерь, ввести пороговое значение содержания антиокислительной присадки агидол-1 (ионол) масел, залитых в силовые трансформаторы напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла; в-третьих, изменить объем измеряемых показателей для планового физико-химического анализа проб масла, установленный для силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов, В.В.** Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов [Текст] / В.В.Соколов, В.А. Лукащук // В кн.: В.В. Соколов, Избранные труды / Сост. А.Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной.— Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010.— С. 22–30.

2. **РД 34.43.105–89.** Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел [Текст].— М.: Технорматив, 2007.— 51 с.

3. **ГОСТ 27.002–89 (СТ СЭВ 3519–81)**. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст] // М.: Изд-во стандартов, 1990.— 32 с.

4. **МУ 1.3.3.99.0037–2009**. Диагностика электрических аппаратов, распределительных устройств электростанций и подстанций [Электрон. ресурс] / Электронная библиотека ЗАО «Современные информационные услуги». — http://www.snti.ru/.

5. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Текст] / Министерство энергетики РФ.— СПб.: ООО «Барс», 2003.— 276 с.

6. **Липштейн, Р.А.** Трансформаторное масло [Текст] / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович.— М.: Энергия, 1968. 352 с.

7. **ГОСТ 981–75.** Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления [Текст].— М: Издательство стандартов, 1992.— 9 с.

8. **Boozer, C.** / C. Boozer, G. Hammond, C. Hamilton // J.Amer. Chem. Soc.— 1955. Vol. 77.— P. 3289.

9. **Эммануэль, Н.М.** Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе [Текст] / Н.М. Эммануэль, Е.Т. Денисов, З.К. Майзус // М.: Наука, 1965.

10. **Липштейн, Р.А.** О механизме действия ингибиторов окисления. Присадки к маслам [Текст] / Р.А. Липштейн // Труды II всесоюзного научно-технического совещания.— М.: Химия, 1968.— С. 169–177.

11. **Калачева, Н.И.** К вопросу о нормировании фурановых производных в трансформаторном масле для контроля состояния бумажной изоляции трансформаторов [Текст] / Н.И. Калачева // Сб.: Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 16.— СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2001.— С. 194.

12. Силовые трансформаторы [Текст]: Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина.— М.: Энергоиздат, 2004.— 616 с.

13. **Иванов, В.С.** Вопросы испытания и эксплуатации трансформаторных масел [Текст] / В.С. Иванов.— М.: Изд-во БТИ ОРГРЭС, 1962.—116 с.

14. **Gezl, G.L.** The effect of composition on the oxidation stability of electrical oils [Текст] / G.L. Gezl, A.P. Stuart, E.S. Ross // Apparatus and Systems.— 1958. № 38.

15. Объемы и нормы испытаний электрооборудования [Текст] / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца.— 6-е изд., с изм. и доп.— М.: ЭНАС, 2007.— 256 с.

16. **Брай, И.В.** Регенерация трансформаторных масел [Текст] / И.В. Брай.— М.: Химия, 1972.— 168 с.

УДК 621.316.13

А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Результаты теоретических и экспериментальных исследований в электрических сетях и электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи показали: качество электрической энергии во многих случаях не удовлетворяет требованиям действующих стандартов, что приводит к нарушению непрерывности технологического процесса добычи нефти. Это обусловлено тем, что в распределительных сетях нефтедобывающих предприятий из-за их значительной протяженности и большого количества нелинейных потребителей провалы напряжения и искажения синусоидальности токов и напряжений значительно превышают допустимые значения.

Снижение уровня питающего напряжения ниже минимально допустимого, а также перерывы в электроснабжении длительностью свыше 0,15 с могут привести к расстройству сложных технологических процессов, ложным срабатываниям системы электросетевой автоматики и защиты, отказам в электроснабжении особой группы потребителей первой категории надежности [1], значительному экономическому ущербу и повышению потерь нефтедобычи. Искажения напряжения из-за интенсивного роста нелинейной преобразовательной нагрузки значительно сокращают срок службы основного нефтепромыслового электрооборудования.

В [2] приведены результаты исследования режимов эксплуатации установок с электроцентробежными насосами (УЭЦН). Исследования проведены на математической модели в среде MatLab с использованием пакета SimULink. В модели рассмотрен вариант питания погружного электродвигателя типа ПЭД-45 (параметры двигателя приведены в Приложении 1), по кабелю КПБП 3×16 (параметры кабеля приведены в Приложении 1) от шин бесконечной мощности. На рис. 1 представлены зависимости допустимой потери напряжения $\Delta U_д$, при которой обеспечивается работоспособность УЭЦН (двигателя) независимо от продолжительности существования такого режима, при различных значениях глубины подвески (L) и коэффициента загрузки ($k_з$). Глубина подвески — это длина кабеля от питающего трансформатора до погружного двигателя, согласно которой учтена потеря напряжения. Коэффициент загрузки — это отношение фактического момента двигателя к его номинальному моменту.

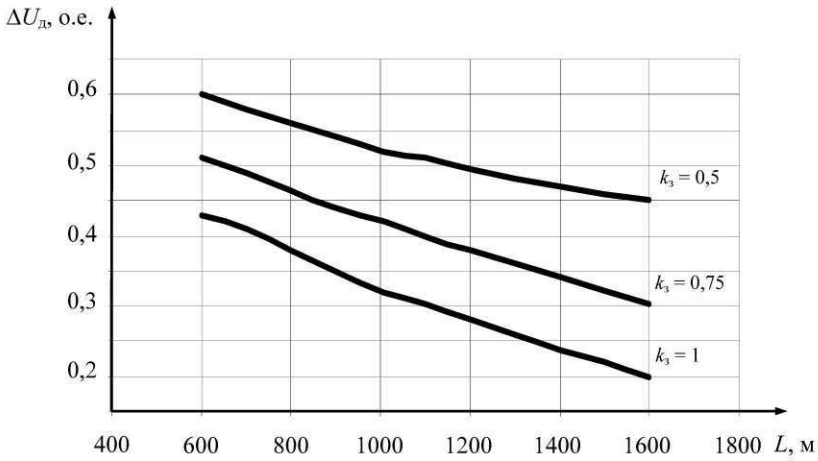


Рис. 1. Зависимости допустимой потери напряжения от глубины подвески и коэффициента использования ПЭД

Согласно рис. 1 при $k_з = 1$ и $L = 1600$ м допустимая потеря напряжения составляет 0,2 о.е. За базис для $\Delta U_д$ принято номинальное напряжение ПЭД. С уменьшением $k_з$ и L допустимая величина $\Delta U_д$ увеличивается и достигает 0,6 о.е. при $k_з = 0{,}5$ и $L = 600$ м.

С помощью описанной выше модели также получены зависимости допустимой потери напряжения ($\Delta U_д$) от длительности и уровней ($U_в$) его восстановления при коэффициенте загрузки $k_з = 1$ (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что при глубине подвеса ПЭД $L = 1600$ м и $k_з = 1$ будет $\Delta U_д = 0{,}3$ о.е. при длительности $t_{пр} = 0{,}18$ с и $U_в = 0{,}8U_{ном}$. При $L = 1000$ м и $k_з = 1$ будет $\Delta U_д = 0{,}4$ о.е. при длительности $t_{пр} = 1{,}25$ с и $U_в = 0{,}8U_{ном}$. Время $t_{пр}$ соответствует продолжительности работы двигателя, которая определяется его критическим скольжением. С уменьшением глубины подвески L и коэффициента загрузки $k_з$ ПЭД увеличивается допустимая глубина и длительность потери напряжения, при которых обеспечивается непрерывность технологического процесса.

Исследования, проведенные при напряжении восстановления, уменьшенном до $U_в = 0{,}7U_{ном}$, выявили, что предельная величина допустимой потери напряжения при $L = 1000$ м и длительности существования провала 0,45 с составляет 0,4 о.е. Полученные зависимости позволяют определить предельно допустимую величину потери напряжения в системе электроснабжения УЭЦН, при которой обеспечивается непрерывность технологического процесса.

Для обеспечения устойчивости работы погружных электродвигателей (ПЭД) электроцентробежных насосов (ЭЦН) необходимо выявить уровень потери напряжения при пуске электродвигателей главных приводов буровой установки (БУ), а также определить распределение этой потери напряжения при удаленности от источника питания.

Для решения поставленных задач необходима разработка имитационной модели электромеханического комплекса с синхронным (СД) и асинхронным (АД) двигателями, которая позволяла бы оценить влияние потери напряжения в ЛЭП при пуске СД на работу параллельно подключенному электрооборудованию. Разработана имитационная математическая модель в среде MatLab с использованием пакета SimULink. При этом необходимо было разработать обобщенную систему уравнений, описывающих работу различного типа электроприводов и сети. Потокосцепления представим в виде

$$\begin{cases} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad}\left(i_f + i_{kd}\right); \\ \Psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{kq}; \\ \Psi_f = x_{ad}\left(i_d + i_{kd}\right) + x_f i_f; \\ \Psi_{kd} = x_{ad}\left(i_d + i_f\right) + x_{kd} i_{kd}; \\ \Psi_{kq} = x_{aq} i_q + x_{kq} i_{kq}. \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ — потокосцепление; i — ток. Индексы указывают, что величина относится к продольной оси (d), к поперечной оси (q), к статору (a), к обмотке возбуждения двигателя (f), к демпферной обмотке (k).

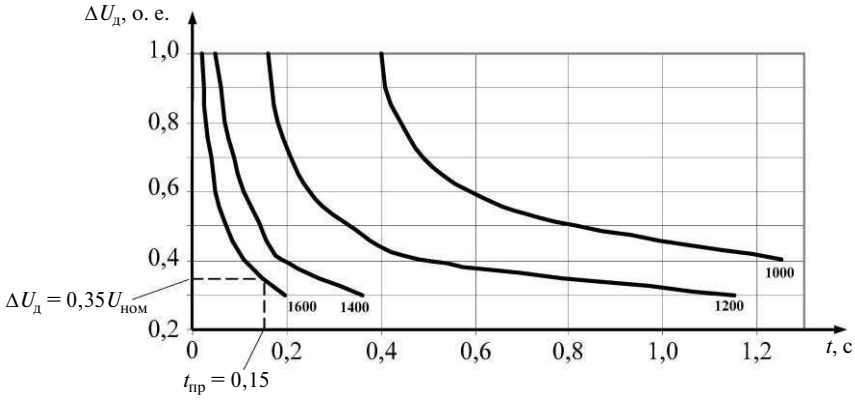


Рис. 2. Зависимость допустимой потери напряжения питания ПЭД от ее продолжительности при последующем восстановлении питания до $U_в = 0{,}8U_{ном}$ при глубинах подвески 1000, 12000, 1400 и 1600 м

Подставим систему (1) в систему уравнений Парка — Горева, подробно и многократно описанную в отечественной и зарубежной литературе [3], и, введя разделительные коэффициенты b (характеризует явнополюсность) и k (характеризует состояние обмотки возбуждения), получим следующую обобщенную систему уравнений:

$$\frac{d\left(i_d\left(x_\ell+x_s\right)+x_{ad}\left(i_f k+i_{kd}+i_d\right)\right)}{dt}=$$
$$=2\pi f\left(U_{\text{м}}\sin\Theta-\left(r+r_s\right)i_d+\right.$$
$$\left.+\left(i_q\left(x_\ell+x_s\right)+\left(x_{ad}\left(1-b\right)+x_{aq}b\right)\left(i_q+i_{kq}\right)\right)\omega\right);$$

$$\frac{d\left(i_q\left(x_\ell+x_s\right)+\left(x_{ad}\left(1-b\right)+x_{aq}b\right)\left(i_q+i_{kq}\right)\right)}{dt}=$$
$$=2\pi f\left(U_{\text{м}}\cos\Theta-\left(r+r_s\right)i_q-\right.$$
$$\left.-\left(i_d\left(x_\ell+x_s\right)+x_{ad}\left(i_f k+i_{kd}+i_d\right)\right)\omega\right);$$

$$\frac{d\left(x_{ad}\left(i_d+i_{kd}\right)+x_f i_f k\right)}{dt}=2\pi fk\left(U_f-r_f i_f\right);$$

$$\frac{d\left(x_{ad}\left(i_d+i_f k\right)+x_{kd}i_{kd}\right)}{dt}=2\pi f\left(-r_{kd}i_{kd}\right);$$

$$\frac{d\left(\left(x_{ad}\left(1-b\right)+x_{aq}b\right)i_q+\left(x_{kd}\left(1-b\right)+x_{kq}b\right)i_{kq}\right)}{dt}=$$
$$=2\pi f\left(-i_{kq}\left(r_{kd}\left(1-b\right)+r_{kq}b\right)\right);$$

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{A}{T_j};$$

где $A=\left(i_d\left(x_\ell+x_s\right)+x_{ad}\left(i_f k+i_{kd}+i_d\right)\right)i_q-$

$$-\left(i_q\left(x_\ell+x_s\right)+\left(x_{ad}\left(1-b\right)+x_{aq}b\right)\left(i_q+i_{kq}\right)\right)i_d+M_c;$$

$$\frac{d\Theta}{dt}=2\pi f\left(\omega-1\right). \qquad (2)$$

Здесь $x_d=x_{ad}+x_\ell+x_s$; $x_q=x_{aq}+x_\ell+x_s$; $M_{\text{с}}$ — механический момент на валу машины; Θ — угол между продольной осью полюсов ротора и осью поля статора (угол нагрузки); r — активное сопротивление статора; r_{s} — активное сопротивление питающей сети; x_ℓ — сопротивление рассеяния статора; x_s — сопротивление питающей сети.

При $k = b = 1$ получим систему уравнений, описывающих явнополюсный СД; при $k = 1$, $b = 0$ — неявнополюсный СД; при $k = b = 0$ — асинхронный двигатель.

Полученная модель позволяет определить допустимую длительность перерыва электроснабжения СД и АД. В данной модели рассмотрен вариант электроснабжения электрооборудования установок нефтедобычи от общих воздушных радиально-магистральных линий электропередачи напряжением 6 кВ, в котором в конце линии подключена буровая установка, а погружные электродвигатели (ПЭД-45) электроцентробежных насосов распределены по длине линии. Причем при пуске электродвигателей главных приводов БУ нарушается работоспособность ПЭД. В качестве синхронного двигателя привода насоса в модели использован СДЗ-12–46–8А (параметры двигателя указаны в Приложении 2). ЛЭП протяженностью 10 км выполнена проводом марки АС-95. С помощью данной модели определены уровни работоспособности установок электроцентробежных насосов с погружными электродвигателями при изменении входного напряжения, вызванного потерей напряжения в пусковых режимах главных электроприводов буровых установок.

На рис. 3 показано изменение напряжения при пуске СД. На рис. 3, *а* — расчетная кривая напряжения непосредственно у СД при удалении от источника питания на 10 км; на рис. 3, *б* — расчетная кривая напряжения при удалении от источника питания на 1 км; *в* — расчетная кривая напряжения непосредственно у источника питания. Из анализа полученных расчетных кривых видно, что наибольшая потеря напряжения наблюдается при наибольшем удалении от источника питания (при удалении на 10 км напряжение снижается до 3 кВ).

Длительность пуска двигателя БУ, а соответственно, длительность потери напряжения в сети составляют около 2 с. При этом допустимая потеря напряжения для ПЭД с коэффициентом загрузки $k_{\text{з}} = 0{,}75$ при глубине подвески ПЭД 1600 м равна 0,3 о.е. (т. е. напряжение питания $U = 4200$ кВ), а при 1100 м — 0,4 о.е. (напряжение питания $U = 3600$ кВ). На рис. 4 приведены зависимости изменения напряжения в ЛЭП от протяженности линии при пуске СД. Из анализа полученных зависимостей следует,

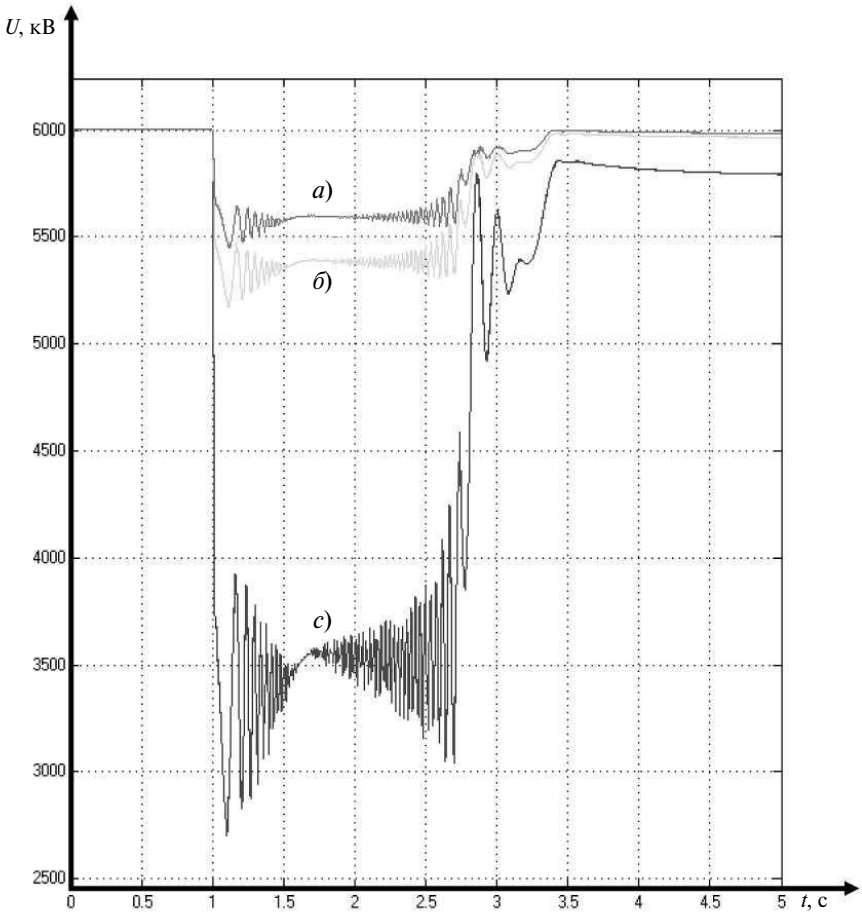


Рис. 3. Изменение напряжения при пуске СД

что из-за снижения напряжения питания до 4200 кВ при пуске СД двигатели УЭЦН (при глубине подвески ПЭД 1600 м и более) остановятся, если источник питания удален свыше 6,25 км при ЛЭП с проводом АС-70, более 6,8 км — при АС-95, дальше 7,2 км — при АС-120.

Для повышения работоспособности ПЭД на всем протяжении ЛЭП необходимо снизить влияние пусковых режимов главных приводов БУ. Этого можно добиться следующими способами:

ограничением пускового тока при использовании пускорегулирующих устройств, например преобразователей частоты (ПЧ) или тиристорных пусковых устройств;

компенсацией потери напряжения в ЛЭП с помощью вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) или динамических компенсаторов искажений напряжения (ДКИН);

комбинацией вариантов ограничения пускового тока и компенсации потери напряжения в ЛЭП.

Использование ПЧ позволит снизить пусковой ток главных приводов БУ до 1,2–1,5 от $I_{ном}$. Однако может привести к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения свыше допустимых значений. При этом увеличение количества ПЧ приведет к ухудшению гармонического состава кривых тока и напряжения.

Динамический компенсатор искажений напряжения позволяет полностью компенсировать потерю напряжения в ЛЭП при коротком замыкании или пусковых режимах [4, 7]. Устройство ДКИН нашло широкое применение в сетях 6–10 кВ. ДКИН представляет собой преобразователь напряжения, содержащий выпрямитель и инвертор с пофазным управлением на базе полностью управляемых выпрямителей, который подключен к питающей сети потребителя через вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) и создает на вторичной обмотке добавку напряжения ΔU, полностью компенсирующую провал

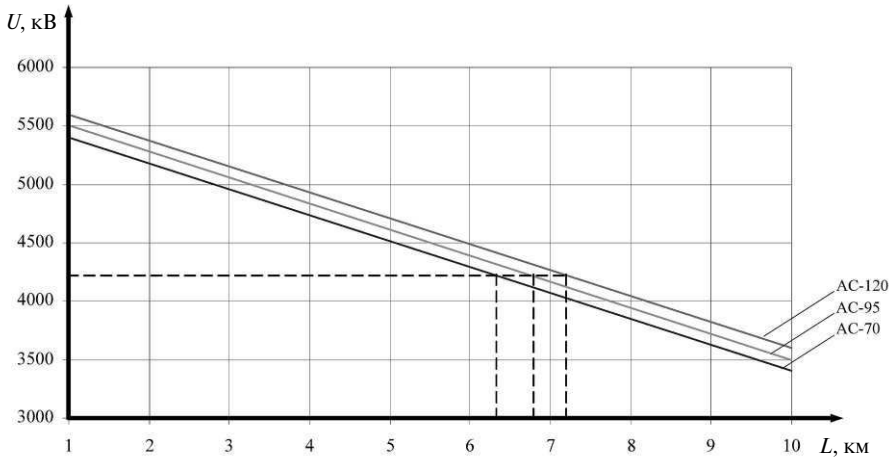


Рис. 4. Зависимости изменения напряжения в ЛЭП при пуске СД от протяженности линии

напряжения при внешнем КЗ или потере напряжения. Одно устройство ДКИН может быть использовано для обеспечения работоспособности нескольких ПЭД, рассредоточенных по ЛЭП. При этом для повышения эффективности компенсации потери напряжения произведено совершенствование устройства ДКИН, связанное с фазовой синхронизацией токов и напряжений, что существенно расширяет функциональные возможности ДКИН [5, 6].

При увеличении числа и мощности установленного оборудования целесообразно совместное использование указанных устройств для снижения влияния пусковых режимов главных приводов БУ. При этом распределение долей на компенсацию потери напряжения может быть определено с учетом минимума приведенных затрат на эксплуатацию оборудования ПЧ и ДКИН.

Основные результаты исследования сводятся к следующему:

1. Разработана имитационная модель, описывающая работу электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными электродвигателями в системе электроснабжения и позволяющая оценить вариацию параметров системы электроснабжения и двигательной нагрузки. Модель позволяет одновременно рассмотреть работу электропривода в генераторном и двигательном режимах, что необходимо при моделировании пуска, самозапуска, при возникновении коротких замыканий, работы АВР.

2. Выявлено, что при снижении напряжения питания до 4200 кВ при пуске СД двигатели УЭЦН при глубине подвески ПЭД 1600 м и более остановятся, если источник питания удален свыше 6,25 км при ЛЭП с проводом АС-70, либо 6,8 км при АС-95, либо 7,2 км при АС-120.

3. Проведен анализ различных способов снижения влияния пусковых режимов главных приводов БУ. Выявлено, что выпускаемые промышленностью динамические компенсаторы искажений напряжения позволяют полностью компенсировать потери напряжения в ЛЭП и повысить работоспособность ПЭД.

Приложение 1

Параметры двигателя:

номинальная мощность $P_{2н}$ = 45 кВт;

номинальное напряжение $U_{1н}$ = 1400 В;

номинальные частота вращения $n_н$ = 2830об/мин и скольжение $s_н$ = 0,055;

номинальный КПД $\eta_н$ = 0,81;

номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_н$ = = 0,84;

число пар полюсов $z_р$ = 1.

Параметры кабеля:

$R_к$ = 1,32 Ом/км;

$X_к$ = 0,1 Ом/км.

Приложение 2

Параметры двигателя:

номинальная мощность $P_н$ = 320 кВт;

номинальное напряжение $U_{1н}$ = 6 кВ, кратность форсировки по напряжению 1,75;

длительность форсировки до 60 с, согласно ГОСТ 24688–81 «Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок [Текст] / Главгосэнергонадзор России.— М.: ЗАО «Энергосервис», 1998.

2. **Абрамович, Б.Н.** Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи [Электрон. ресурс] / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело».— 2011. № 3.— С. 17–25.— URL: http://www.ogbus.ru/authors/Abramovich/Abramovich_1.pdf.

3. **Пронин, М.В.** Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) [Текст] / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов / Под ред. Е.А. Крутякова.— СПб.: Изд-во «Силовые машины»-«Электросила», 2004 г.

4. **Гамазин, С.П.** Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии [Текст] / С.П. Гамазин, В.М. Пупин, Ю.В. Марков // Промышленная энергетика.— 2006. № 11.— С. 51–56.

5. **Патент на изобретение № 2453021.** [Текст] / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов. Устройство регулирования отклонений напряжения и реактивной мощности.—10.06.2012.— БИ № 16.

6. **Патент на изобретение № 2446537.** [Текст] / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов. Устройство регулирования напряжения и передаваемой мощности электрической сети.— 27.03.2012.— БИ № 9.

7. **Абрамович, Б.Н.** Электроснабжение нефтегазовых предприятий [Текст]: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт. — СПб., 2008.— 88 с.

УДК 621.3.048.015

И.А. Андреев, А.А. Безбородов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Развитие мировой энергетики требует постоянного ввода новых мощностей генерирующего электрооборудования. В настоящее время в России доля оборудования теплоэлектростанций со сроком службы свыше 30 лет составила примерно 68,4 % [1]. Поэтому остро стоит вопрос о техническом перевооружении станций на базе современного энергетического оборудования, в частности генераторов с повышенными технико-экономическими показателями.

Совершенствование конструкций генераторов тесно связано с возрастанием электродинамических, тепловых и термомеханических нагрузок, что требует решения ряда важных прикладных проблем, в том числе в области внедрения новых изоляционных материалов и разработки прогрессивных технологических процессов изготовления систем изоляции статорных обмоток, а также разработки и широкого внедрения современных систем мониторинга и диагностики их работоспособности.

Как известно, работоспособность электрических машин высокого напряжения в первую очередь определяется надежностью систем изоляции статорной обмотки. Согласно статистическим исследованиям, проведенным в Северной Америке (США и Канада) [2], более 37 % отказов генераторов и электродвигателей с воздушным охлаждением и до 56 % отказов гидрогенераторов связаны с проблемами электрической изоляции статоров этих машин, которые большей частью обусловлены развитием в них частичных разрядов (ЧР) различных типов и интенсивности. ЧР возникают под действием высокой напряженности электрического поля в местах пониженной электрической прочности. Они представляют собой либо пробои газовых включений внутри изоляции, либо местные электрические разряды в газе по поверхности твердого диэлектрика. Отказ системы электрической изоляции по причине возникновения ЧР, естественно, происходит не мгновенно. Период от возникновения первичных ЧР до полного пробоя изоляции в большинстве зафиксированных случаев составляет от нескольких недель до десятков лет. Таким образом, характеристики ЧР, а также динамика их изменения во время эксплуатации — важные диагностические признаки, дающие возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития, осуществлять отбраковку дефектных изделий в заводских условиях, а также планировать оптимальное финансирование ремонтных работ.

Идентификация и выявление дефектов изоляции не могут быть осуществлены прямыми измерениями и анализом интегральных характеристик ЧР; для этого должны использоваться специальные вычислительные программы, основанные на методах распознавания образов. В настоящее время нет таких программ, апробированных для использования в заводских условиях. В связи с этим основной целью нашей работы была разработка методики оценки качества изготовления электрической изоляции и программы идентификации наиболее опасных дефектов в статорной обмотке электрических машин на стадии приемо-сдаточных испытаний.

Как известно [3], в зависимости от физических причин и областей возникновения ЧР в системах изоляции электрических машин подразделяются на два типа. Внутренние ЧР возникают в областях с пониженной электрической прочностью, так называемых «включениях», локально расположенных в объеме корпусной изоляции. Это могут быть поры и протяженные полости, заполненные газом, инородные металлические и неметаллические включения (пыль, загрязнения, металлические стружки), острия на внутренних полупроводящих и проводящих экранах. Внутренние ЧР представляют существенную опасность для электрической изоляции, выполненной на основе термопластичных

органических диэлектриков (кабели с полимерной изоляцией, трансформаторы, конденсаторы с твердым органическим диэлектриком и др.). Однако термореактивная слюдосодержащая изоляция высоковольтных электрических машин может нормально функционировать в течение всего срока службы при наличии достаточно интенсивных внутренних ЧР. Внешние ЧР, как и внутренние, возникают в местах локального усиления электрического поля, однако не внутри корпусной изоляции электрической машины, а вне ее — в пазовой и лобовой зонах крепления обмотки.

Деструктирующее действие двух типов ЧР различно в связи с тем, что внешние ЧР в системе изоляции высоковольтных электрических машин характеризуются более высокой интенсивностью. Кажущийся заряд внешних ЧР может достигать значений 10^5 пКл, а внутренних — существенно ниже (10^2–10^3 пКл). Таким образом, внешние ЧР приводят к серьезной деградации изоляции обмотки, особенно в лобовых областях. Поэтому определение типа и характера ЧР в системе изоляции имеет важное практическое значение, поскольку распознавание дефектов, их исключение на стадии приемки, возможность корректировки технологического цикла повышают качество и надежность электрической машины.

Блок-схема разработанной распознающей системы приведена на рис. 1. Принцип работы системы основан на использовании обучающей

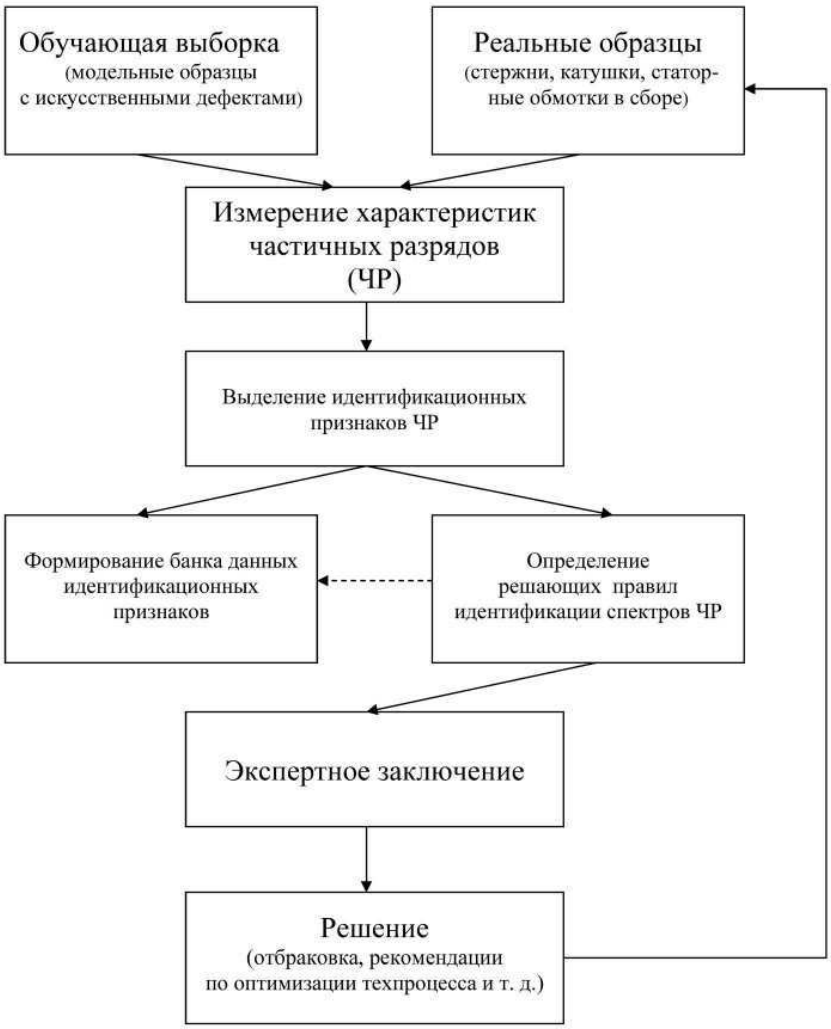


Рис. 1. Блок-схема методики идентификации технологических дефектов в изоляции статорной обмотки электрических машин на стадии заводских приемо-сдаточных испытаний

выборки, достаточно полно представляющей генеральную совокупность (гипотетическое множество всех возможных объектов, характеризующих каждый тип дефектов изоляции). Обучающая выборка формировалась из оптимального набора модельных образцов (см. таблицу), в каждом из которых создавался единичный искусственный дефект, где реализовывалась возможность возникновения ЧР определенной разновидности. При изготовлении моделей использовались изоляционные материалы (предварительно пропитанная слюдопластовая лента Элмикатерм 52409) и технологические процессы, традиционно применяемые для изготовления электрической изоляции статорных обмоток на заводе «Электросила» в г. Санкт-Петербурге. На рис. 2 приведена фотография модельного образца для изучения характеристик ЧР. Основным элементом являлся отрезок *1* реального стержня статорной обмотки с толщиной корпусной изоляции 3,4 мм. В качестве одного из электродов использовался проводник стержня, набранный из индивидуальных изолированных прямоугольных проводов. Для выравнивания электрического поля на поверхности проводника был нанесен слой тканного проводящего

Конструкции образцов для моделирования ЧР

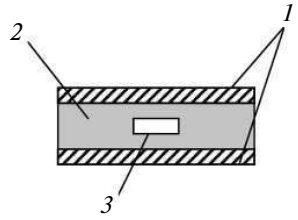
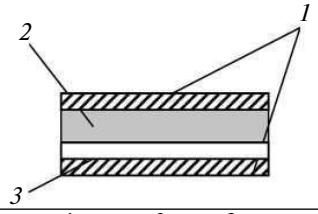
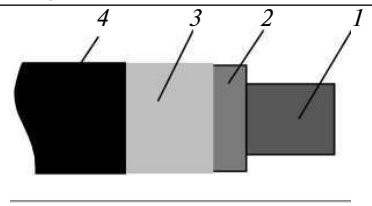
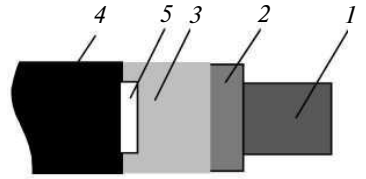
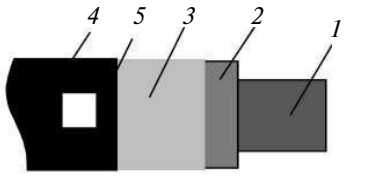
Тип образца (характер ЧР)	Схема образца	Описание конструкции
№ 1 (ЧР в газовом включении при двустороннем контакте с диэлектрическими поверхностями)		*1* — электроды (проводящий лак ПЛГ 233); *2* — корпусная изоляция; *3* — цилиндрическое отверстие (диаметр — 1, 3, 6 мм, глубина — 0,6 мм)
№ 2 (ЧР в газовом «расслоении» между слоями изоляции и внутреннего проводящего покрытия)		*1* — электроды (проводящий лак ПЛГ 233); *2* — корпусная изоляция; *3* — газовое расслоение толщиной 0,5 мм
№ 3 (коронные ЧР в краевой области проводящего покрытия)		*1* — медный стержень; *2* — корпусная изоляция; *3* — полупроводящее покрытие ПЛК 275; *4* — проводящее покрытие ПЛГ 233
№ 4 (поверхностные ЧР в дефекте полупроводящего покрытия)		*1* — медный стержень; *2* — корпусная изоляция; *3* — полупроводящее покрытие ПЛК 275; *4* — проводящее покрытие ПЛГ 233
№ 5 (ЧР в дефекте проводящего пазового покрытия)		*1* — медный стержень; *2* — корпусная изоляция; *3* — полупроводящее покрытие ПЛК 275; *4* — проводящее покрытие ПЛГ 233; *5* — дефект покрытия (10×10) мм

Рис. 2. Фотография модельного образца для изучения развития ЧР в искусственных дефектах

материала. Высоковольтный электрод представлял собой латунный цилиндр диаметром 30 мм. Для предотвращения коронных разрядов, мешающих измерению характеристик ЧР, развивающихся в искусственном дефекте, края электрода были закруглены (радиус закругления 4 мм), а краевая область между электродом и поверхностью образца заполнялась кремнийорганическим компаундом.

Использовались также макеты изоляции толщиной 2 мм, которые изготавливались на основе медных шин (800×30×6 мм). Конструктивно макеты представляли собой уменьшенные копии реальных статорных стержней.

На втором этапе измерялись характеристики ЧР (рис. 3) в соответствии с [4, 5] при помощи цифрового измерительного комплекса «СКИТ ЧР» производства СПбГПУ путем амплитудной и фазовой дискриминации импульсов раздельно на положительных и отрицательных полупериодах испытательного напряжения. Эксперименты проводились с использованием источника высокого напряжения (ИВН), позволяющего плавно регулировать подаваемое на образец напряжение от 0 до 100 кВ; его конструкция обеспечивала отсутствие помех при измерении ЧР с уровнем кажущегося заряда $q_{ЧР}$ выше 10 пКл. Дальнейшее снижение уровня помех нецелесообразно, так как развитие дефектов во всех модельных образцах наблюдалось при значениях $q_{ЧРмакс}$ как минимум на порядок выше. Токоведущие элементы установки имели форму, препятствующую появлению коронных разрядов, мешающих проведению эксперимента. Характеристики ЧР в модельных образцах измерялись при испытательном напряжении 1,2 $U_{нЧР}$ и комнатной температуре.

Амплитудно-фазовые спектры ЧР, регистрируемые измерительным комплексом, представляли собой точечные распределения импульсов ЧР ($n_{ЧР} - q_{ЧР} - \varphi$). Информация представлялась в следующих координатах: ось Y — величина $q_{ЧР}$ кажущегося заряда ЧР; ось X — фаза φ возникновения ЧР. Каждый импульс ЧР фиксировался в виде точки ($q_{ЧР}$; φ) и информация, определяющая частоту повторения ЧР $n_{ЧР}$, накапливалась в течение времени измерения. Такая форма спектра содержит полную информацию о характеристиках ЧР. Однако размерность ($n_{ЧР} - q_{ЧР} - \varphi$)-спектра — высока, что снижает эффективность распознавания. Поэтому проводилось снижение этой размерности путем преобразования в двух-

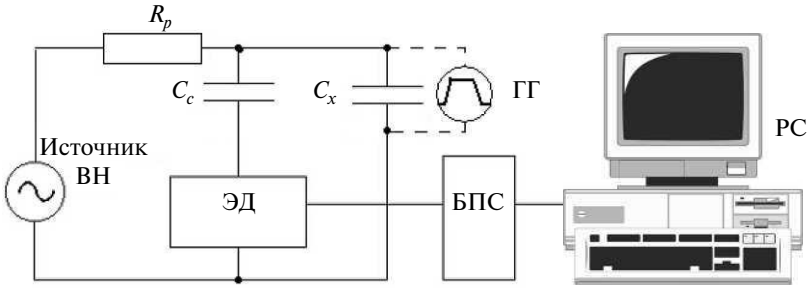


Рис. 3. Измерительная схема регистратора характеристик ЧР:

R_p — защитное сопротивление (150 кОм); C_x — измеряемый объект (модельный образец, стержень статорного паза), его емкость измерялась непосредственно перед проведением эксперимента и составляла от 10 до 30 пФ; C_c — соединительная емкость (250 пФ); ГГ — градуировочный генератор; ЭД — активный измерительный импеданс; РС — измеритель характеристик ЧР

мерные распределения ($q_{ЧРмакс} - \varphi$), ($q_{ЧРср} - \varphi$), ($n_{ЧР} - \varphi$) за счет разбиения временной оси на определенное количество интервалов, в которых рассчитывались соответствующие параметры ЧР.

Следующий этап заключался в расчете и извлечении различительных признаков спектров ЧР. Существенным условием здесь было то, что признаки, как и первоначальные амплитудно-фазовые спектры, должны различаться между разными источниками ЧР. Размерность признакового пространства максимально минимизировалась, поскольку при этом сокращалось количество требуемых измерений и увеличивалась статистическая устойчивость результатов распознавания. В ранее существовавших методиках [6] выбор производился, главным образом, на основе прошлого опыта, интуиции или простого предположения. Такой подход существенно снижал качество распознавания. В разработанной программе эта цель достигается использованием дискриминантного анализа при расчете и выборе статистических признаков (от 1-го до 4-го центральных моментов распределений ($q_{ЧРмакс} - \varphi$), ($q_{ЧРср} - \varphi$) – ($n_{ЧР} - \varphi$) и дополнительных, вводимых впервые, признаков, определяющих взаимное расположение импульсов ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения, таких как: коэффициенты асимметрии по фазе возникновения (Ф) и количеству импульсов ЧР разной полярности (Q)

$$\Phi = \frac{\left(\varphi^-_{max} - \varphi^-_{min}\right) - \left(\varphi^+_{max} - \varphi^+_{min}\right)}{\tau};$$

$$\Phi_{ср} = \frac{\varphi^-_{ср}}{\tau} - \frac{\varphi^+_{ср}}{\tau};$$

$$\Phi_{max} = \frac{\varphi^-_{max}}{\tau} - \frac{\varphi^+_{max}}{\tau};$$

$$Q = \frac{\sum q_i^- \Big/ \sum n_i^-}{\sum q_i^+ \Big/ \sum n_i^+}$$

и коэффициенты корреляции (CC) для соответствующих распределений

$$CC_{Q_{ср}} = \frac{\sum\left(q^+_{ср} - \bar{q}^+_{ср}\right)\left(q^-_{ср} - \bar{q}^-_{ср}\right)}{\sqrt{\left(q^+_{ср} - \bar{q}^+_{ср}\right)^2\left(q^-_{ср} - \bar{q}^-_{ср}\right)^2}};$$

$$CC_{Q_{max}} = \frac{\sum\left(q^+_{max} - \bar{q}^+_{max}\right)\left(q^-_{max} - \bar{q}^-_{max}\right)}{\sqrt{\left(q^+_{max} - \bar{q}^+_{max}\right)^2\left(q^-_{max} - \bar{q}^-_{max}\right)^2}};$$

$$CC_N = \frac{\sum\left(N^+ - \bar{N}^+\right)\left(N^- - \bar{N}^-\right)}{\sqrt{\left(N^+ - \bar{N}^+\right)^2\left(N^- - \bar{N}^-\right)^2}},$$

где индексы «–» и «+» относятся к параметрам спектров ЧР соответствующей полярности, τ — продолжительность полупериода.

Характеристические признаки формируют базу данных, которая использовалась для установления канонических дискриминантных функций (рис. 4) при определении границ кластеров для каждого типа обучающих ЧР. Качество разработанных решающих правил распознавания оценивалось по контрольной выборке, в которую входили модельные экзаменационные образцы с известными по геометрическим размерам и расположению дефектами, а также реальные образцы статорной изоляции (стержни, катушки, статорная обмотка в сборе) на этапе сдаточных испытаний.

Исследование ЧР на реальных образцах изоляции статорной обмотки проводилось на этапе сдаточных испытаний в заводских условиях. Целью испытаний была оценка качества изготовленной изоляции и определение с использованием разработанной программы распознавания типов технологических дефектов с последующим их исправлением путем оптимизации технологических режимов на стадии изготовления изделий. Дополнительно испытания реальных образцов изоляции позволили подтвердить работоспособность разработанной методики распознавания дефектов в производственных условиях. Особый интерес представляли испытания по регистрации ЧР в изоляции отбракованных стержней. В частности, одной из основных причин отбраковки является высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции (критерий отбраковки — $\Delta tg\delta > 0{,}5$ %).

При измерении ЧР в изоляции отбракованного стержня было установлено, что амплитудно-фазовые спектры ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения симметричны. Величина $q_{ЧРмакс}$ составляла 3100 пКл при 3,6 кВ и 10000 пКл при

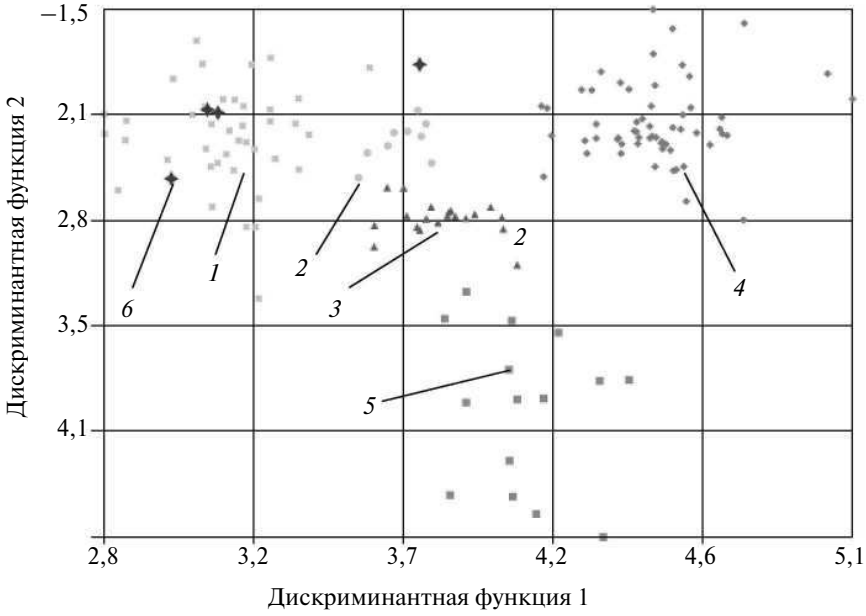


Рис. 4. Диаграмма рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций (точками «Добавленные данные» отмечены данные по ЧР в изоляции стержне с повышенными значениями диэлектрических потерь для гидрогенератора типа СВ 484/110):

1 — «пора в изоляции»; *2* — «дефект пазового покрытия»; *3* — «отслоение в изоляции»; *4* — «дефект полупроводящего лобового покрытия»; *5* — «нормальные условия»; *6* — «добавленные данные»

4,5 кВ. Эти значения высоки, что свидетельствует о наличии серьезного повреждения исследуемой изоляции. На рис. 4 представлена диаграмма рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций, где приведены точки («Добавленные данные»), характеризующие амплитудно-фазовые спектры ЧР в изоляции исследуемого стержня.

Как следует из представленных результатов, эти точки наиболее близко располагаются к центроиду кластера *1* «Пора в изоляции». Следовательно, предполагаемый дефект изоляции испытываемого стержня с высокой вероятностью представляет собой нарушение сплошности корпусной изоляции в виде газовой поры. Препарирование корпусной изоляции данного стержня продемонстрировало наличие таких пор.

Оптимизация технологического процесса (ужесточение контроля процесса намотки слюдосодержащих лент) и замена материала внутреннего проводящего слоя привели к снижению диэлектрических потерь изоляции стержней и, как следствие, к снижению интенсивности ЧР. Величина $q_{ЧР макс}$ становится существенно ниже, она не превышает 2300 пКл при 3,6 кВ и 3100 пКл при 4,5 кВ. Следовательно, можно предположить, что дефекты в системе изоляции отсутствуют или их размеры существенно уменьшились.

Таким образом, было получено практическое подтверждение обоснованности применения разработанной методики распознавания дефектов по статистическим характеристикам ЧР при проведении приемо-сдаточных испытаний статорной обмотки высоковольтных электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ энергоэффективности экономики и развития электроэнергетики России [Текст] // Рынок электротехники.— 2007. № 1(5).— С. 25–37.

2. **Stone, G.R.** Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings [Текст] / G.R. Stone [et al.] // I EEE Trans. on Industry

Application.— 2006. Vol. 42, № 1.— P. 195–200.

3. **Кучинский, Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях [Текст] / Г.С. Кучинский.— Л.: Энергия, 1979.— 224 с.

4. **ГОСТ 20074–83.** Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов [Текст] // М.: Изд-во стандартов, 1983.— 20 с.

5. **IEC 60034–27.** Rotating Electrical Machinesю Part 27: Partial Discharge Off-line Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machinery [Текст].— 2005.— 44 p.

6. **Caprara, A.** Partial Discharge Source Recognition in VPI Machines [Текст] / A. Caprara [et al.] // Proc. 10th Insucon Int. Conf.— Birmingham, 2006.— P. 236–240.

УДК 621.314.572

О.Б. Шонин

НАБЛЮДАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЛАВАЮЩИХ КОНДЕНСАТОРАХ В СХЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СБАЛАНСИРОВАННОГО РЕЖИМА ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Растущий спрос на мощный частотно-регулируемый электропривод предопределяет интенсивное развитие высоковольтных (ВВ) преобразователей частоты (ПЧ), необходимых для обеспечения высокой эффективности управления объектами значительной единичной мощности и достижения соответствующего энергосберегающего эффекта [1]. Другая область применения ВВ ПЧ — повышение качества напряжения с помощью элементов FACTS [2] и обеспечение стабильности энергетических систем, например с помощью гидроаккумулирующих станций на базе машин двойного питания и ПЧ с двусторонним потоком энергии [3].

В связи с ограниченными значениями рабочих напряжений быстродействующих элементов силовой электроники, таких, как IGBT/IGCT-модули, ВВ ПЧ должны выполняться на базе многоуровневых преобразователей, структура которых зависит от способа деления напряжения между его элементами. Различают каскадные преобразователи, преобразователи с фиксирующими диодами и преобразователи с плавающими/переключаемыми конденсаторами — flying capacitor converter (FCC). Преобразователи FCC-типа [4] — наиболее перспективная структура с точки зрения наращивания числа уровней и, тем самым, повышения качества напряжения. Преимущество преобразователей состоит в равномерном распределении потерь в полупроводниковых элементах, возможности непосредственного подключения к сети без согласующего трансформатора, возможности компенсации отклонений напряжений на конденсаторах от номинальных значений за счет коррекции разрядно-зарядных процессов в конденсаторах.

Важная задача создания и эффективного использования ВВ преобразователей — обеспечение сбалансированного распределения напряжений на конденсаторах как в статическом, так и динамическом режимах работы. Отклонение от заданных уровней напряжений на конденсаторах может привести к ухудшению гармонического состава тока в обмотках приводного двигателя, увеличению потерь, возникновению пульсаций электромагнитного момента, а также к перенапряжениям на силовых полупроводниковых приборах, которые могут вызвать отключение преобразователя защитой или выход прибора из строя. Проблема небаланса напряжений характерна для многоуровневых преобразователей всех типов.

Наиболее эффективный способ поддержания номинальных значений напряжений на переключаемых конденсаторах ПЧ FCC-типа связан с использованием замкнутой системы регулирования, обеспечивающей стабилизацию напряжений путем корректировки параметров разрядно-зарядных процессов в конденсаторах. Для получения текущих значений напряжений в такой системе требуется установка высоковольтных датчиков на каждом из конденсаторов. В случае трехфазного четырехуровневого инвертора потребуется шесть датчиков. Увеличение числа датчиков с ростом числа уровней приводит к увеличению затрат и снижению надежности преобразователя. В нашей работе ставится задача: оценить напряжения на переключаемых конденсаторах по результатам измерения выходного напряжения инвертора и использовать эти оценки в схеме стабилизации сбалансированного режима ПЧ.

Структура L-уровневого преобразователя FCC-типа образована ячейками, состоящими из (L–2) конденсаторов и (L–1) пар комплементарных ключей. При использовании современных IGBT-модулей минимальное число ступеней напряжения в преобразователях, рассчитанных на напряжение 6 кВ, равно четырем.

Рассмотрим работу одной фазы преобразователя (рис. 1), состоящей из плавающих конденсаторов C_1, C_2 и трех пар комплементарных ключей, состояние которых описывается переменными s_k и $\overline{s_k}$ (индекс k = 1, 2, 3 означает номер верхнего ряда ключей). Если ключ k замкнут и $s_k = 1$, то дополнительный ключ разомкнут и $\overline{s_k} = 0$.

Фазное напряжение инвертора u связано с напряжением звена постоянного тока U_{dc} и напряжениями конденсаторов U_{C1} и U_{C2} законом Кирхгофа:

$$u(t) = (2s_3(t) - 1)U_{dc}/2 - (s_2(t) - s_1(t))U_{C1} - \\ - (s_3(t) - s_2(t))U_{C2}. \quad (1)$$

Номинальные напряжения на конденсаторах должны иметь значения $U_{C1} = U_{dc}/3$ и $U_{C2} = 2U_{dc}/3$. При наличии возмущений в системе эти величины становятся функциями времени.

Естественная балансировка напряжений на конденсаторах при высоких показателях качества выходного напряжения [5] достигается за счет выбора метода ШИМ — «phase shifted pulse width modulation» (PS-PWM) [6]. В этом методе используется фазовый сдвиг между сигналами несущей частоты, число которых равно числу ключей в фазе ПЧ. Возможные сочетания состояний ключей преобразователя, использующего этот метод, приведены в таблице, в которой символы «↑» и «↓» соответствуют заряду/разряду конденсаторов, символ «–» обозначает неизменность напряжения на конденсаторе.

Состояние ключей $s_k(t)$, k = 1, 2, 3, задается управляющими импульсами, которые формируются в результате сравнения модулирующего сигнала $u_m(t) = m \cdot \sin(\omega t)$ с тремя сигналами — $u_{S1}(t)$, $u_{S2}(t)$, $u_{S3}(t)$ — несущей частоты ω_S единичной амплитуды, сдвинутыми на треть периода $T_S = 2\pi/\omega_S$ (рис. 2). Эффективная частота переключений выходного напряжения втрое превышает частоту развертывающего сигнала $\omega_e = 3\omega_s$. При выполнении условия $\omega_S >> \omega$ модулирующий сигнал $u_m(t)$ в пределах периода T_S можно считать постоянным. На рис. 2 показаны состояния ключей $s_k(t)$, фазное напряжение инвертора $u(t)$, полученное при постоянном значении модулирующего сигнала $u_m = 0{,}8$. При изменении управляющего напряжения имеет место чередование зарядно-разрядных комбинаций состояния ключей. Если длительности этих комбинаций одинаковы, то напряжения на конденсаторах в среднем остаются неизменными.

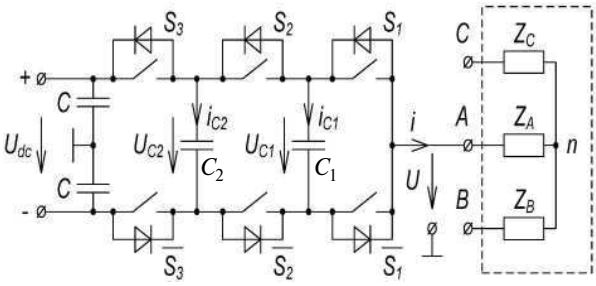


Рис. 1. Структура фазы A четырех уровневого инвертора с плавающими конденсаторами C_1 и C_2

Используя соотношение (1) и таблицу состояний ключей, найдем алгоритм для определения напряжений на конденсаторах по результатам прямых измерений фазного напряжения инвертора и использования полученных оценок в системе стабилизации сбалансированного режима работы четырехуровневого инвертора.

Существует восемь возможных схем подключения нагрузки к звену постоянного тока в соответствии с восьмью комбинациями состояний

Состояние ключей преобразователя

Комбинация	Состояние ключа			Динамика напряжений	
	s_1	s_2	s_3	U_{C1}	U_{C2}
1	0	0	0	–	–
2	0	0	1	↓	–
3	0	1	0	↑	↓
4	0	1	1	–	↓
5	1	0	0	–	↑
6	1	0	1	↓	↑
7	1	1	0	↑	–
8	1	1	1	–	–

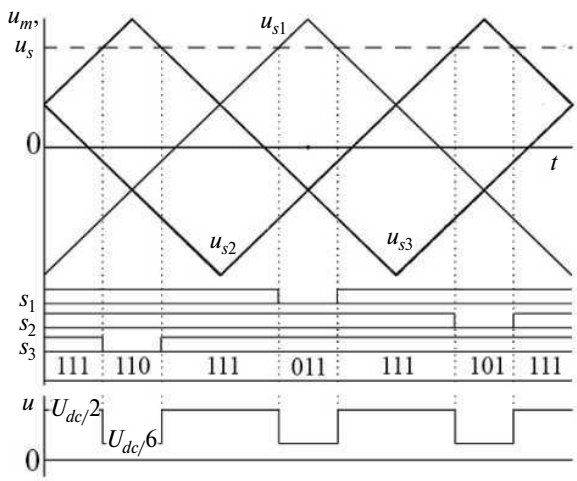


Рис. 2 Комбинации состояний ключей при формировании фазного напряжения инвертора в случае $u_m = 0{,}8$

ключей, указанных в таблице. Каждый из двух конденсаторов может подключаться к нагрузке независимо от другого только в двух случаях из восьми. Еще в двух случаях оба конденсатора отключены от силовой цепи. Для двух оставшихся комбинаций имеет место совместное подключение конденсаторов C_1 и C_2 к нагрузке.

Рассмотрим состояния ключей, при которых в формировании напряжения инвертора $u(t)$ участвует только один конденсатор. Это комбинации *2*(100) и *7*(011) для конденсатора C_1 и комбинации *5* (001) и *4* (110) для конденсатора C_2. Введем в рассмотрение переменную $h_n(t)$, отражающую состояние дешифратора указанных комбинаций. Если входные переменные $s_1(t)$, $s_2(t)$ и $s_3(t)$ образуют нужную комбинацию *n*, то $h_n = 1$, в противном случае $h_n = 0$. Здесь индекс *n* соответствует нумерации комбинаций состояния ключей, указанных в таблице. Используя формулу (1), запишем вклад в выходное напряжение инвертора $u(t)$ импульсных последовательностей $u_2(t)$ и $u_7(t)$, соответствующих комбинациям *2* (100) и *7* (011):

$$u_2(t) = u(t)h_2(t) = \left(-U_{dc}/2 + U_{C1}(t)\right)h_2(t); \quad (2)$$

$$u_7(t) = u(t)h_7(t) = \left(U_{dc}/2 - U_{C1}(t)\right)h_7(t). \quad (3)$$

Амплитуды импульсных последовательностей $u_2(t)$ и $u_7(t)$ в отсутствие возмущений принимают значения соответственно $-U_{dc}/6$ и $U_{dc}/6$. В случае небаланса имеет место амплитудная модуляция этих последовательностей изменяющимся напряжением $U_{C1}(t)$. Напряжения $u_2(t)$ и $u_7(t)$ представляют собой чередование пакетов импульсов и пауз при длительности пакета, равном полупериоду модулирующего сигнала (рис. 4). Для увеличения числа выборок объединим несовпадающие во времени последовательности $u_2(t)$ и $u_7(t)$:

$$u_{72}(t) = u(t)h_{72}(t) = \left(U_{dc}/2 - U_{C1}(t)\right)h_{72}(t);$$

$$h_{72}(t) = h_7(t) - h_2(t). \quad (4)$$

Напряжение $u_{72}(t)$ рассматривается как амплитудно-модулированный импульсный сигнал переменной длительности. Частота следования импульсов примерно равна несущей частоте f_S. Напряжения на конденсаторах $U_{C1}(t)$ и $U_{C2}(t)$ — медленные функции времени с граничной частотой спектра $f_b = 0{,}1$–4 Гц в зависимости от параметров нагрузки и параметров ШИМ напряжения. Для выделения из полученного напряжения $u_{72}(t)$ модулирующего сигнала $u^*_{72}(t)$ используется экстраполятор нулевого порядка с последующим сглаживанием блоком измерения среднеквадратичного значения с интервалом T_s усреднения порядка периода несущего сигнала ШИМ.

По оценке $u^*_{72}(t)$ огибающей импульсной последовательности $u_{72}(t)$ находят оценку напряжения на конденсаторе $U^*_{C1}(t)$ согласно формуле

$$U^*_{C1}(t) = U_{dc}/2 + u^*_{72}(t). \quad (5)$$

Для определения напряжения на конденсаторе C_2 используют комбинации *4*(110) и *5*(001):

$$u_4(t) = u(t)h_4(t) = \left(-Udc/2 + U_{C2}(t)\right)h_4(t); \quad (6)$$

$$u_5(t) = u(t)h_5(t) = \left(Udc/2 - U_{C2}(t)\right)h_5(t). \quad (7)$$

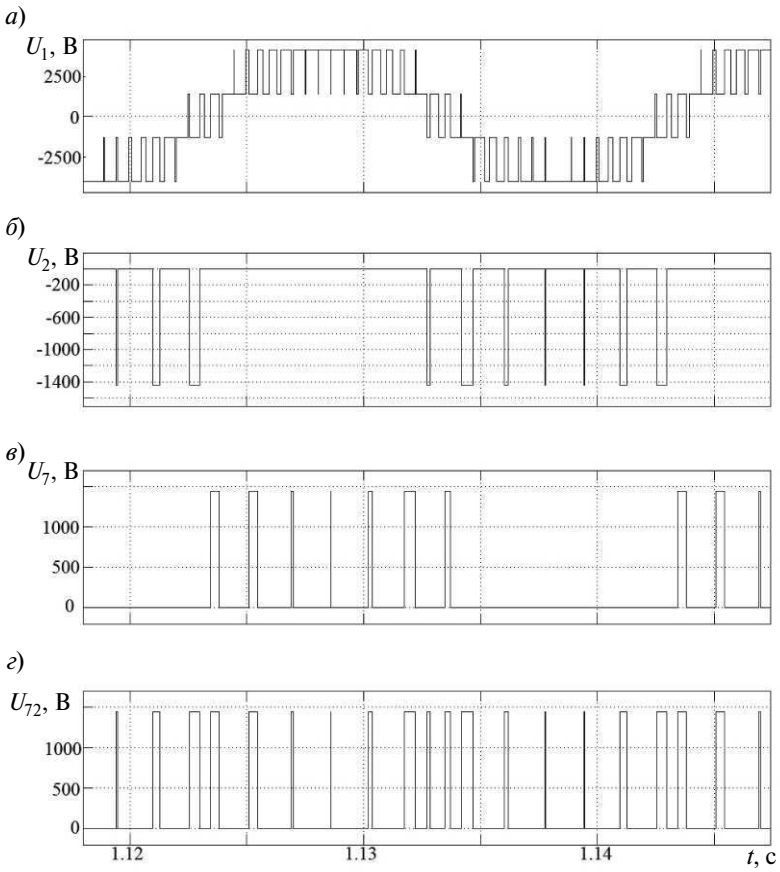


Рис. 3. Фазное напряжение $u(t)$ преобразователя (*а*) и напряжения импульсных последовательностей: $u_2(t)$ (*б*), $u_7(t)$ (*в*) и $u_{72}(t)$ (*с*)

Логические переменные $h_4(t)$ и $h_5(t)$ принимают значения 1 или 0 в зависимости от того, совпадает сочетание переменных s_1, s_2, s_3 со сравниваемыми комбинациями 4 и 5 или нет. Далее формируется последовательность $u_{45}(t)$ путем объединения несовпадающих во времени импульсных последовательностей $u_4(t)$ и $u_5(t)$:

$$u_{45}(t) = u(t)h_{45}(t) = \left(-U_{dc}/2 + U_{C2}(t)\right)h_{45}(t),$$

$$h_{45}(t) = h_4(t) - h_5(t). \qquad (8)$$

Затем вычисляется оценка напряжения $U^*_{C2}(t)$ на конденсаторе C_2 по выходному сигналу интерполятора $u^*_{45}(t)$:

$$U^*_{C2}(t) = U_{dc}/2 + u^*_{45}(t). \qquad (9)$$

В сигналах, соответствующих комбинациям *6* (101) и *3* (010), содержится информация о разности напряжений на конденсаторах $\Delta\bar{U}_{C12} = U_{C1} - U_{C2}$, которая может быть использована для уточнения оценок U^*_{C1} и U^*_{C2}. Повторяя процедуры выделения соответствующих импульсных последовательностей $u_6(t)$, $u_3(t)$ и их последующего объединения $u_{63}(t)$, получим

$$\Delta U^*_{C21}(t) = U_{dc}/2 + u^*_{63}(t), \qquad (10)$$

где $u_{63}(t) = u(t)\left(h_6(t) - h_3(t)\right)$ — импульсная последовательность; $u^*_{63}(t)$ — выходной сигнал экстраполятора.

Уточнение напряжений на конденсаторах производится по формулам

$$U_{C1} = \frac{1}{2}\left(U_{C1}^{*} + U_{C2}^{*} - \Delta U_{C21}^{*}\right);$$

$$U_{C2} = \frac{1}{2}\left(U_{C1}^{*} + U_{C2}^{*} + \Delta U_{C21}^{*}\right). \qquad (11)$$

Рассмотрим применение предложенного метода оценки текущих значений напряжений на плавающих конденсаторах в схеме стабилизации сбалансированного режима четырехуровневого инвертора.

В сбалансированном режиме первая группа высших гармоник спектра выходного напряжения инвертора находится в окрестности частоты $3f_S$. При небалансе в спектре напряжения появляются гармоники комбинационных частот, которые группируются вокруг частоты несущего сигнала f_S. Время перехода в сбалансированное состояние зависит от скорости выделения энергии указанных гармоник в нагрузке. Поэтому свойства процесса балансировки зависят как от параметров ШИМ, так и от параметров нагрузки. Включение *RLC*-фильтра последовательного типа параллельно нагрузке позволяет снизить инерционность процесса за счет быстрого выделения энергии небаланса в *R*-элементе фильтра, настроенного на частоту несущего сигнала f_S. Фильтрация высших гармоник увеличивает токовую нагрузку ключей, вызывает дополнительные потери, снижает надежность и увеличивает общую стоимость устройства.

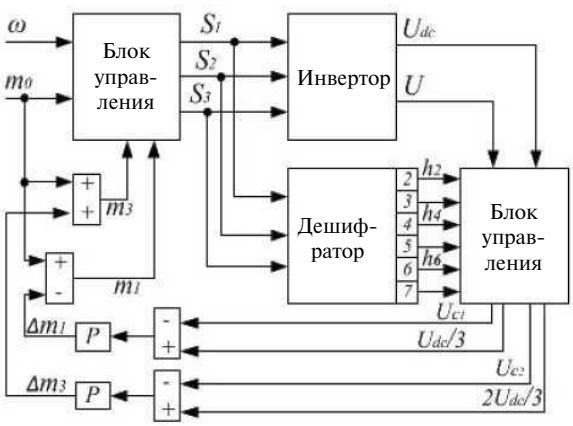


Рис. 4. Блок-схема стабилизации режима четырехуровневого инвертора с наблюдателем напряжений на плавающих конденсаторах

Эти недостатки устраняются с помощью сравнительно простой схемы стабилизации напряжений (рис. 4), работа которой основана на амплитудной коррекции длительности зарядных/разрядных процессов, ответственных за баланс напряжений. В предложенной схеме вместо одного модулирующего сигнала, общего для всех ячеек фазы, используются три индивидуальных модулирующих сигнала для каждой из трех ячеек. Амплитудная коррекция длительности зарядных/разрядных процессов осуществляется путем изменения в незначительных пределах коэффициентов модуляции m_k (k = = 1, 2, 3) этих сигналов управления в зависимости от отклонений текущих значений напряжений конденсаторов от требуемых значений. Выбор того или иного IGBT-модуля в качестве исполнительного органа и знака управляющего воздействия сделан на основе анализа чувствительности небаланса напряжений к приращениям амплитуд модулирующих сигналов, выполненного с помощью компьютерной модели четырехуровневого инвертора, построенной в среде Simulink Matlab:

$$m_1 = m_0 - K_p(U_{dc}/3 - u_{C1}),$$

$$m_3 = m_0 + K_p(2U_{dc}/3 - u_{C2}), \qquad m_2 = m_0,$$

где K_p — коэффициент пропорционального регулятора; m_0 — коэффициент модуляции, определяющий режим работы привода.

Схема определения напряжений на конденсаторах (см. рис. 4) включает блок формирования логических переменных h_2, h_4, h_6 и блок вычислений, алгоритм которого задается формулами (2)–(11). Предложенная схема была интегрирована в компьютерную модель ПЧ на базе 12-пульсного выпрямителя, образованного двумя параллельными 6-пульсными мостами, накопительного конденсатора и четырехуровневого инвертора, осуществляющего скалярное частотное управление асинхронного двигателя, момент сопротивления которого пропорционален квадрату скорости вращения приводного объекта. Напряжение звена постоянного тока принято равным U_{dc} = 8640 В, напряжение

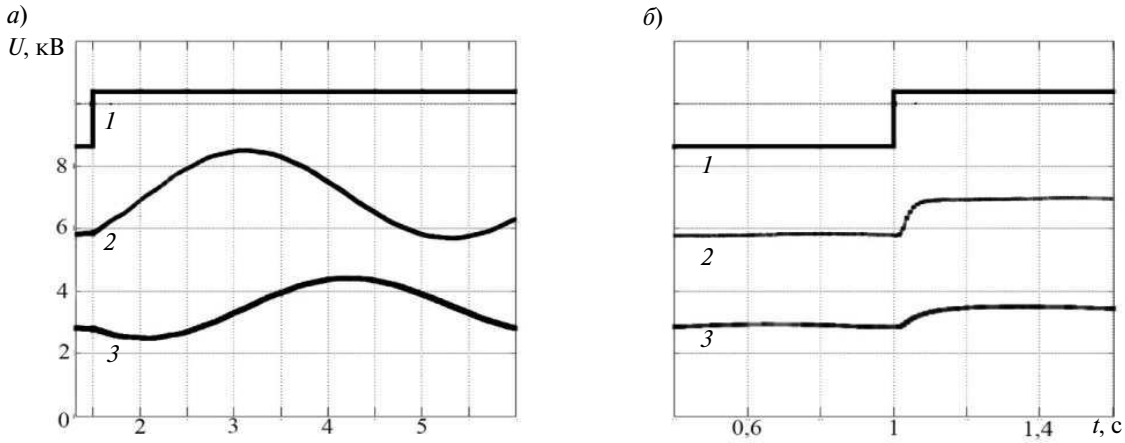


Рис. 5. Напряжения на плавающих конденсаторах (кривые *2* и *3*) в случае ступенчатого изменения напряжения звена DC (кривая *1*) при отключенной (*а*) и включенной (*б*) схеме стабилизации

на конденсаторе C_1 = 900 мкФ составляет U_{C1} = 2860 В, на конденсаторе C_2 = 400мкФ — U_{C2} = 5720 В. При частоте ШИМ f_s = 600 Гц эффективная частота переключений составляет f_{se} = 1800 Гц. Напряжение и мощность нагрузки U = 6 кВ и P = 1250 кВт. Рассматривалась динамика напряжений на плавающих конденсаторах при *RL*-нагрузке инвертора, вызванная ступенчатым приращением напряжения в звене постоянного тока на 20 %. Влияние системы стабилизации на характер изменения напряжений $U_{C1}(t)$ и $U_{C2}(t)$ при наличии возмущения показано на рис. 5

Сравнение полученных оценок (рис. 5, *а*) с результатами прямых измерений напряжений показало, что их различие не превышает 0,5 %. Это подтверждает работоспособность предложенной схемы наблюдателя и возможность ее использования в системе стабилизации напряжений на переключаемых конденсаторах. Из сравнения графиков, представленных на рис. 5, *а*, *б*, следует, что включение схемы стабилизации в структуру блока управления работой преобразователя позволяет более чем на два порядка уменьшить время реакции на внешнее возмущение, в результате которого в инверторе устанавливается новый сбалансированный режим. Это свидетельствует об эффективности предложенного способа стабилизации.

Результаты работы могут быть суммированы следующим образом.

Качество выходного напряжения, энергетическая эффективность и другие функциональные характеристики многоуровневых преобразователей частоты на плавающих конденсаторах в значительной мере определяются системой стабилизации напряжений на конденсаторах. Работа предложенной схемы основана на амплитудной коррекции зарядных/разрядных процессов в конденсаторах путем изменения амплитуд индивидуальных модулирующих сигналов IGBT-модулей по сигналам обратной связи. Для уменьшения числа высоковольтных датчиков в такой системе предложена схема косвенного определения этих напряжений по измеренным значениям выходного напряжения инвертора. Эффективность такого подхода возрастает с увеличением числа уровней преобразователя. Увеличение числа уровней может быть связано с необходимостью повышения качества энергии преобразователя либо с переходом на другой уровень выходного напряжения. Предложенная схема оценки напряжений может быть составной частью алгоритма наблюдателя на базе динамической модели асинхронного двигателя, использующей измеренные токи нагрузки. В этом случае необходимость в высоковольтных датчиках напряжений отпадает. Это позволяет повысить надежность и снизить стоимость преобразователя частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Браславский, И.Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст] / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков— М.: Academia, 2004. - 249 с.

2. **Hingorani, G.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems [Текст] / G. Hingorani, L. Gyugyi— USA, New York: IEEE Press.— 2000.

3. **Pronin, M.** A Pumped Storage Power Plant with Double-Fed Induction machine and cascaded Frequency Converters [Текст] / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev // Proceedings of the 14-th European Conference on Power Electronics and Applications.— UK, Burmingham, 2011.

4. **Gateau, G.** Multicell converters: Active control and observation of flying-capacitor voltages [Текст] / G. Gateau, M. Fadel, P. Maussion, R. Bensaid, T.A. Meynard // IEEE Transactions on Industrial Electronics.— 2002. Vol. 49. № 5.

5. **Кудрявцев, А.В.** Оптимизация широтно-импульсной модуляции многоуровневых преобразователей частотно-регулируемого электропривода [Текст] / А.В. Кудрявцев, О.Б. Шонин// Записки Горного института.— 2011. Т. 195.— С. 263–267.

6. **Holmes, D.** Pulse width modulations for power converters [Текст] / D. Holmes, T. Lipo.— USA, NewYork: IEEE Press, 2003.

УДК 669.1.017:669.018.44:669.018.28:621.74.011

Г.П. Анастасиади, С.Ю. Кондратьев, А.С. Орыщенко, С.Н. Петров, М.Д. Фукс

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОВ «НАГРЕВ — ОХЛАЖДЕНИЕ» НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛИТОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА 45Х26Н33С2Б2

Режимы работы оборудования нефтехимических и металлургических производств предъявляют чрезвычайно высокие требования к конструкционным материалам, используемым для его изготовления [1]. Одними из наиболее сложных являются условия эксплуатации змеевиковых систем установок пиролиза [2]. Основной эксплуатационный фактор в этом случае — температура, причем как ее максимальное значение (до 1150 °С), так и наличие технологических циклов «нагрев — охлаждение», связанных с необходимостью остановок оборудования для регламентных работ (выжигание кокса, ремонт и др.).

При таких условиях эксплуатации материалы вынуждены работать в различных термических режимах: анатермическом — при нагреве с непрерывно повышающейся температурой, изотермическом — при постоянной температуре, кататермическом — при непрерывно снижающейся температуре [3]. Следствием этого является нестабильность структуры применяемых для изготовления высокотемпературных установок литых жаропрочных сплавов из-за возникающих интенсивных диффузионных потоков химических элементов [4–6]. Соответственно, достоверное прогнозирование работоспособности сплавов, в том числе остаточной, становится серьезной проблемой. В связи с этим необходима экспериментальная оценка жаропрочных свойств используемых сплавов в различных условиях эксплуатации.

Целью нашей работы было исследование длительной прочности широко применяемых в нефтехимической промышленности литых жаропрочных жаростойких сплавов системы Fe-Cr-Ni в условиях, имитирующих реальный режим эксплуатации змеевиковых систем высокотемпературных установок.

Материал исследования — жаропрочный сплав 45Х26Н33С2Б2, разработанный ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [7]. Сплав выплавляли в индукционной печи емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (ГОСТ 977–88). Фактический химический состав (в масс. %) исследованного сплава следующий:

C	46
Si	73
Mn	1,31
Cr	25,5
Ni	35,6
Nb	1,60
W	0,59
Mo	0,31
Ti	0,21
N	0,05
Fe	Ост.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145–81 на оригинальной установке, изготовленной на базе нагружающей машины АИМА-2 и электрической печи типа СШОЛ с нагревательной спиралью из фехралевой проволоки марки 0Х27ЮТ. Точность измерения температуры испытываемого образца составляла ± 2 °С. Образцы (рис. 1) изготавливали

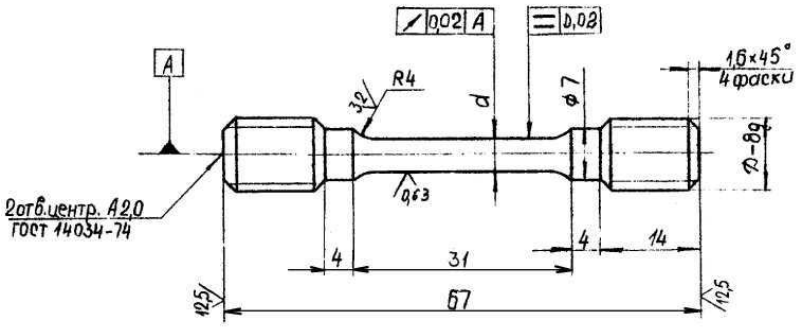


Рис. 1. Образец для испытаний на длительную прочность (ГОСТ 10145–81; d = 6,0±0,05 мм, D = М10)

в соответствии с ГОСТ 10145–81 «Металлы. Методы испытания на длительную прочность» и СТП 90.067–87, являющимся стандартом предприятия ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (№ 140, тип 6). Анализ изломов образцов после испытаний выполняли на растровом электронном микроскопе «SEM 535». Структуру сплава исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D FEG.

Испытания на длительную прочность проводили при температуре 1150 °С. Определяли длительную прочность сплава в литом состоянии и после предварительной термической обработки по режиму: выдержка при 1150 °С длительностью 2, 50 или 100 ч с последующим охлаждением с печью. Предварительная термическая обработка имитировала рабочую сессию установки пиролиза различной длительности с медленным охлаждением при технологической остановке.

Длительная прочность при температуре 1150 °С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом и предварительно термообработанном состояниях

Состояние сплава	Время до разрушения, ч, при напряжении	
	10 МПа	12 МПа
Литое	106	55
После предварительной термической обработки по режиму:		
t = 1150°С, τ = 2 ч, охлаждение с печью	67	36
t = 1150°С, τ = 50 ч, охлаждение с печью	58	32
t = 1150°С, τ = 100 ч, охлаждение с печью	49	15

Результаты испытаний на длительную прочность при 1150 °С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии и после предварительной высокотемпературной выдержки различной длительности с последующим охлаждением с печью приведены в таблице и на рис. 2. Видно, что даже кратковременная предварительная выдержка с последующим охлаждением с печью существенно снижает длительную прочность литого сплава. Так, уже после 2 часов предварительной выдержки значения длительной прочности сплава снижаются в 1,5–2,0 раза относительно литого состояния. При этом характерно, что дальнейшее увеличение времени предварительной выдержки до 50 и 100 часов оказывает существенно меньшее влияние на механические свойства сплава. Следовательно, отрицательное влияние на длительную прочность сплава оказывают как продолжительность выдержки при температуре эксплуатации, так и медленное охлаждение до комнатной температуры, причем последнее — в большей степени.

Анализ структуры и фазового состава сплава 45Х26Н33С2Б2, результаты которого подробно рассмотрены в наших предыдущих публикациях [4–6], показал, что как в литом состоянии, так и после выдержки при 1150 °С и последующего охлаждения с печью в сплаве присутствуют: γ-твердый раствор с отчетливо выраженной дендритной структурой и неоднородным распределением Si, Cr, Fe, Mn; эвтектические колонии карбидов M_xC_y с неоднородным распределени-

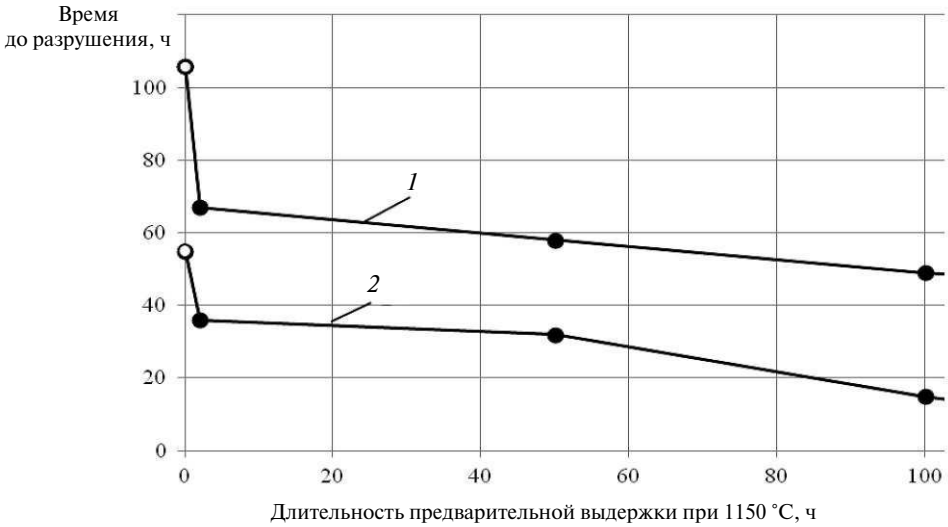


Рис. 2. Влияние времени предварительной выдержки при 1150 °С при последующем охлаждении с печью (●) на длительную прочность при 1150 °С литого (○) сплава 45Х26Н33С2Б2 при напряжениях 10 (*1*) и 12 (*2*) МПа

ем основного элемента (хром); включения, состоящие из нитрида титана и карбида ниобия. Однако высокотемпературная выдержка приводит к значительным качественным и количественным изменениям в структуре сплава по сравнению с литым состоянием, которые заключаются в трансформации всех структурных составляющих и отдельных фаз.

Так, одновременно с уменьшением степени химической неоднородности γ-твердого раствора после высокотемпературной выдержки изменяется его объемная доля в структуре сплава за счет процессов выделения — растворения промежуточных фаз. Рис. 3 [5] показывает, что после 2 ч выдержки при 1150 °С объемная доля промежуточных фаз в структуре сплава резко возрастает по сравнению с литым состоянием. С увеличением выдержки до 50 ч количество промежуточных фаз постепенно уменьшается почти до исходного, и дальнейшая выдержка незначительно изменяет соотношение структурных составляющих в сплаве. Установлено [4–6], что уже после 2 ч выдержки в структуре литого сплава наблюдается постепенное превращение эвтектического карбида $(CrFeNi)_7C_3$ в карбид $(CrFeNi)_{23}C_6$. В результате этого превращения избыточный для $M_{23}C_6$ углерод образует выделения карбидов $(FeCr)_mC_n$, которые в виде дисперсных включений располагаются в матрице преимущественно вблизи крупных эвтектических карбидов (рис. 4). При длительности выдержки более 2 ч происходит последовательное образование промежуточных интерметаллидных фаз различного состава с частичным растворением карбидов хрома и ниобия.

Для сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150°С и охлаждения с печью характерно выраженное фрагментирование структуры (рис. 5).

Полученные нами экспериментальные данные [4–6], а также результаты других исследователей [8–13] позволяют считать, что фраг-

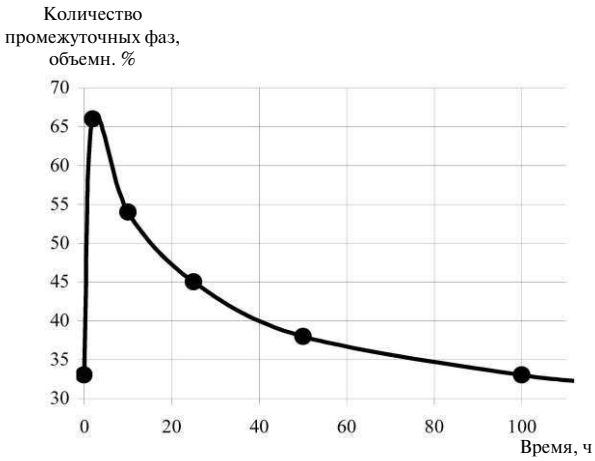


Рис. 3. Влияние длительности выдержки при 1150 °С на количество промежуточных фаз в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после охлаждения с печью [5]

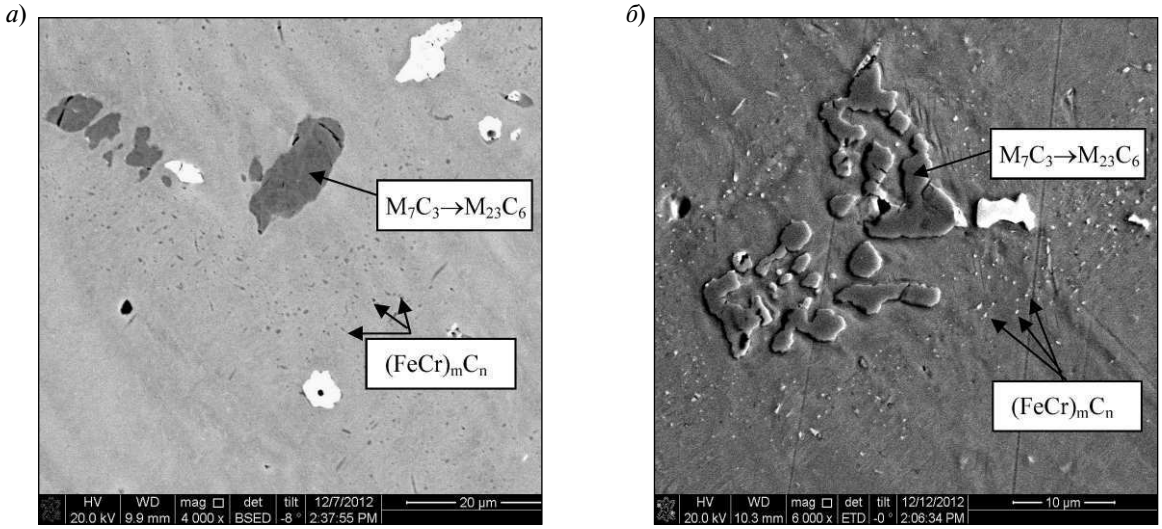


Рис. 4. Структура в обратно отраженных электронах (*а*) и во вторичных электронах (*б*) сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 2 ч и последующего охлаждения с печью (РЭМ, ×4000 (*а*), ×6000 (*б*))

ментирование структуры сплава происходит в результате термической полигонизации вследствие фазового наклепа сильно легированного твердого раствора. Действительно, выявленные структурные изменения свидетельствуют о протекании различных фазовых превращений в сплаве 45Х26Н33С2Б2 при термическом воздействии. Причем они происходят не только при высокотемпературной выдержке, но и в процессе медленного охлаждения с печью, которое может приводить к возникновению значительных внутренних напряжений в сплаве. Так, в работах [8, 9] показано, что при снижении температур в интервале 900–600 °С в Fe-Cr-Ni-сплавах исследуемой концентрационной области происходит карбидное превращение $M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$, а в [10] установлен переход в карбиде M_7C_3 орторомбической кристаллической решетки в гексагональную. Известно также, что при охлаждении таких сплавов в том же интервале температур в их структуре возможно образование различных интерметаллидных фаз (σ, *G*, *Z*, η, χ, Лавеса) вследствие уменьшения растворимости основных легирующих элементов в матричном γ-твердом растворе [11–13]. Соответственно изменяются и кристаллографические параметры матрицы. Возникающие в результате структурных изменений значительные внутренние напряжения приводят к фрагментированию структуры и, как следствие, снижению пластичности сплава.

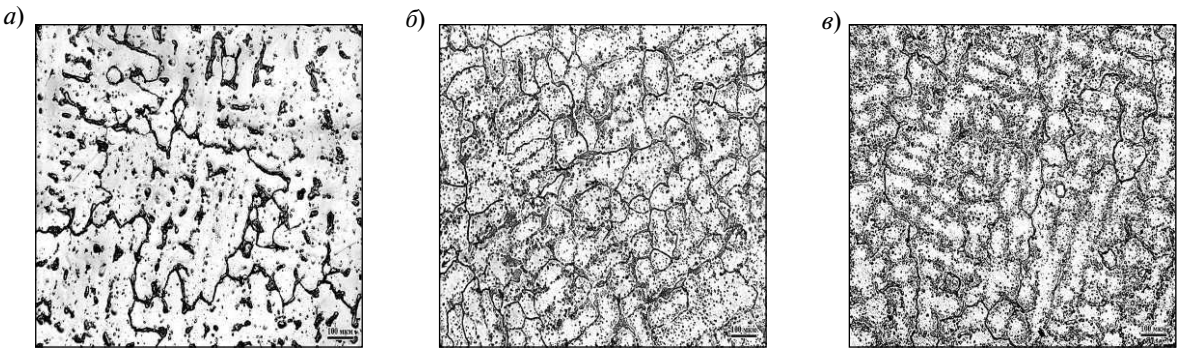


Рис. 5. Микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (*а*) и после выдержки при 1150 °С длительностью 25 (*б*) и 50 ч (*в*) и охлаждения с печью (×100) [5]

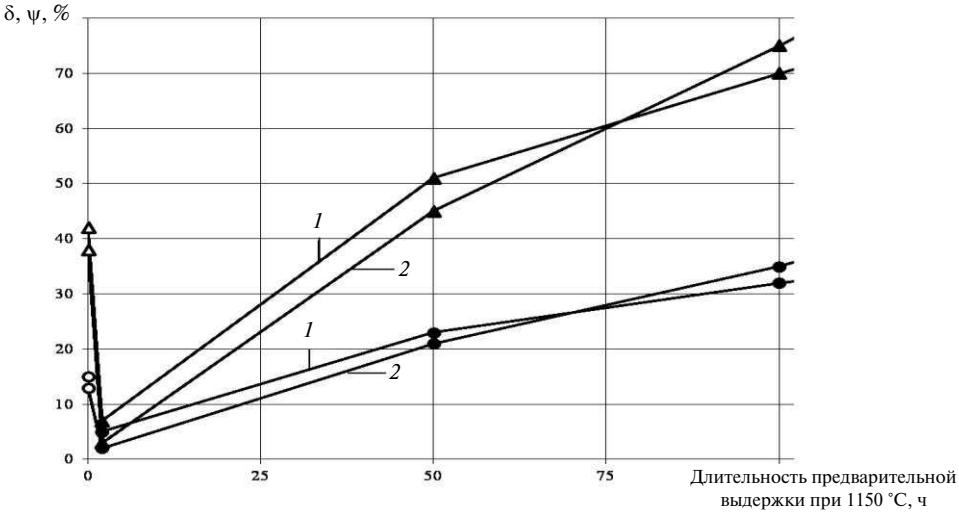


Рис. 6. Влияние времени предварительной выдержки при 1150 °С с последующим охлаждением с печью (●, ▲) на относительные удлинение δ (○, ●) и сужение ψ (△, ▲) в испытаниях на длительную прочность литого (○, △) сплава 45Х26Н33С2Б2 при 1150 °С и напряжениях 10 (*1*), 12 (*2*) МПа

На рис. 6 показано влияние предварительной термической обработки на пластические характеристики сплава 45Х26Н33С2Б2 при испытаниях на длительную прочность при 1150 °С. Видно, что предварительная высокотемпературная выдержка длительностью 2 ч резко снижает пластичность сплава, а увеличение выдержки до 50 и 100 ч повышает ее по сравнению с литым состоянием.

Анализ изломов образцов сплава после испытаний на длительную прочность при 1150 °С показал, что во всех случаях характер разрушения — вязкий, преимущественно межзеренный, а поверхность имеет дендритную морфологию (рис. 7). Однако излом образца, подвергнутого предварительной выдержке в течение 2 ч при 1150 °С, значительно более однороден, а диаметр шейки — минимальный по сравнению как с литым, так и предварительно термообработанными по другим режимам. Видно также, что увеличение длительности предварительной выдержки до 50 и 100 ч приводит к большей локализации деформации в месте разрушения образца и большей неоднородности и вязкости излома.

Таким образом, результаты наших экспериментальных исследований и литературные данные позволяют заключить, что интенсивные структурные изменения, протекающие в литом сплаве 45Х26Н33С2Б2 в течение кратковременной (2 ч) выдержки при 1150 °С и особенно в процессе последующего медленного охлаждения, приводят к снижению его пластических свойств в испытаниях на длительную прочность и, как следствие, уменьшению жаропрочности. Увеличение длительности изотермической выдержки до 50 и 100 ч сопровождается разупрочнением сплава за счет процессов растворения исходных и промежуточных карбидных и интерметаллидных фаз. Вследствие разупрочнения при длительной высокотемпературной выдержке превращения, протекающие в сплаве при последующем охлаждении, не приводят к существенному снижению пластичности. Однако разупрочнение сплава после предварительной высокотемпературной выдержки в течение 50 и 100 ч снижает длительную прочность сплава по сравнению с литым состоянием, оставляя ее практически на уровне образца, термообработанного с кратковременной выдержкой (2 ч).

Для оценки уровня жаропрочности исследованного сплава с учетом отрицательного влияния промежуточных охлаждений от рабочей до комнатных температур целесообразно сопоставить экспериментально полученные значения его длительной прочности при 1150°С с аналогичной характеристикой известных жаропрочных сплавов.

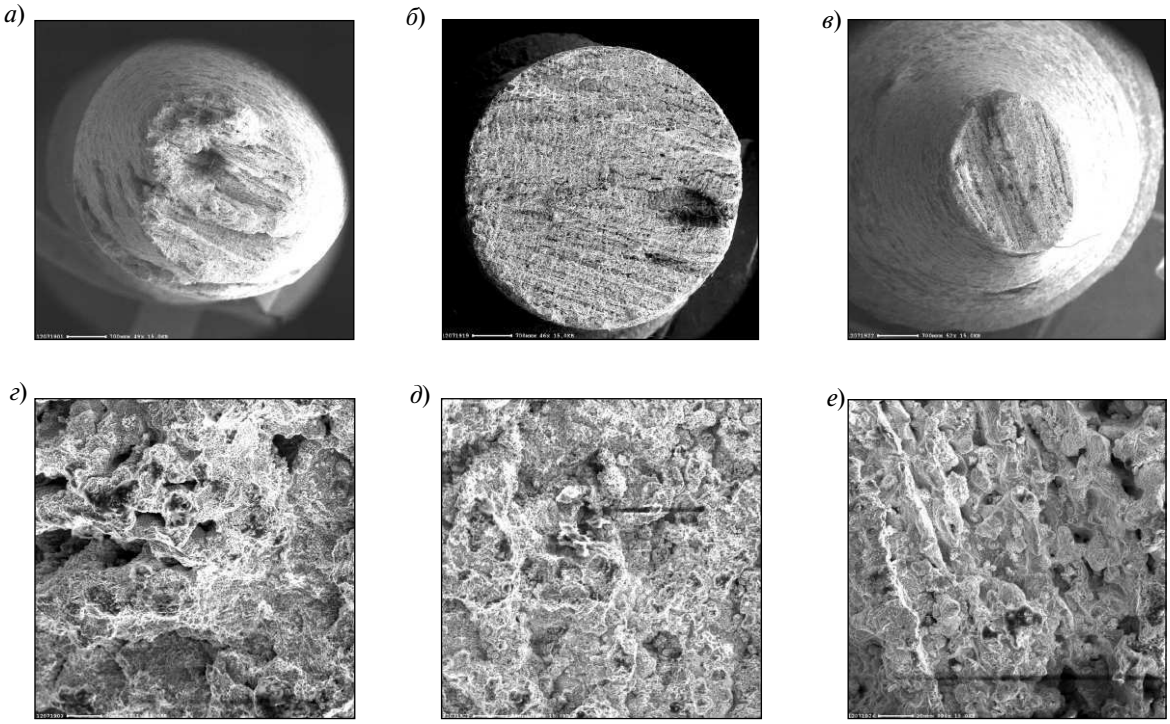


Рис. 7. Излом после испытаний на длительную прочность (T = 1150 °С, σ = 12 МПа) образцов сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (*а*, *г*) и после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2 (*б*, *д*) и 100 ч (*в*, *е*) и последующего охлаждения с печью (×50 (*а*–*в*), ×1000 (*г*–*е*))

На рис. 8 представлена условная параметрическая диаграмма [14, 15] для сплава Х28Н48В5, построенная по данным [16] с использованием значений длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °С. На этом же рисунке показаны значения длительной прочности исследованного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Величину параметра для каждого испытания определяли по формуле

$$P_{\text{дп}} = T\left(\lg \tau_{\text{к}} + c\right)10^3, \qquad (1)$$

где T — температура испытания, К; $\tau_{\text{к}}$ — время до разрушения, ч; c — постоянная. Величину постоянной c принимали равной 20. Из полученных результатов следует, что по уровню жаропрочности сплав 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии соответствует сплаву Х28Н48В5. После предварительной высокотемпературной выдержки при температуре 1150 °С и охлаждения с печью значения длительной прочности исследованного сплава находятся несколько ниже по сравнению с литым состоянием, однако все экспериментальные точки лежат в области длительной прочности сплава Х28Н48В5.

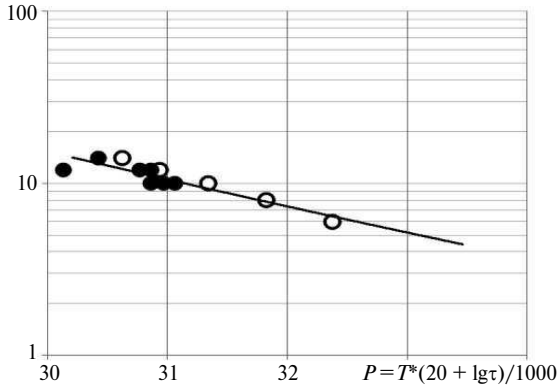


Рис. 8. Параметрическая диаграмма длительной прочности сплавов Х28Н48В5 (прямая линия) и 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (○) и после предварительной выдержки при 1150 °С различной длительности (●) и последующего охлаждения с печью

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что кататермический режим эксплуатации при остановках высокотемпературных установок для проведения регламентных работ приводит к снижению длительной прочности сплава

45Х26Н33С2Б2. Это свидетельствует о необходимости минимизации технологических остановок оборудования. Однако даже с учетом этого обстоятельства исследованный сплав по длительной прочности не уступает более легированным никелем и вольфрамом жаропрочным сплавам.

Основные результаты выполненных исследований можно сформулировать так:

Определена длительная прочность при температуре 1150 °С сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии и после предварительной выдержки при 1150 °С длительностью 2–100 ч и последующего охлаждения с печью. Установлено отрицательное влияние на длительную прочность сплавов на Fe-Cr-Ni основе предварительной выдержки при температуре эксплуатации с последующим медленным охлаждением.

Причина снижения рабочих характеристик жаропрочных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni — протекание в них фазовых превращений как при температуре эксплуатации, так и в процессе медленного охлаждения до комнатной температуры. При этом кататермический режим (непрерывное охлаждение) оказывает большее отрицательное влияние на длительную прочность сплавов по сравнению с изотермическим, особенно в начальный период эксплуатации.

Для увеличения ресурса работы высокотемпературного оборудования, изготовленного из жаропрочных жаростойких сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni, необходимо регламентировать режим технологических циклов «нагрев — охлаждение».

По уровню жаропрочности сплав 45Х26Н33С2Б2 не уступает таким жаропрочным высоколегированным сплавам, как Х28Н48В5, и является перспективным для изготовления высокотемпературных установок с температурой эксплуатации 1100–1200 °С.

Исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орыщенко, А.С.** Жаростойкие жаропрочные сплавы [Текст] / А.С. Орыщенко.— СПб.: Наука, 2011.

2. **Орыщенко, А.С.** Разработка жаростойких сплавов для элементов конструкции радиантной части змеевиков высокотемпературных установок нефтесинтеза [Текст] / А.С. Орыщенко // Вопросы материаловедения.— 2006.— № 1 (45).— С. 147–159.

3. **Масленков, С.Б.** Стали и сплавы для высоких температур (в 2-х книгах) [Текст]: Справочник / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова.— М.: Металлургия, 1991.

4. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45С-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 1. Литое состояние [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 1(142).— С. 155–163.

5. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45С-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 2. Влияние высокотемпературной выдержки [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 2 (147). Т. 1.— С. 217–228.

6. **Рудской, А.И.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45С-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 3. Механизм и кинетика фазовых превращений [Текст] / А.И. Рудской, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 3 (154). Т. 2.— С. 143–150.

7. **Орыщенко, А.С.** Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург.— 2008. № 2.— С. 66–68.

8. **Piekarski, B.** Creep-resistant austenitic cast steel [Текст] / B. Piekarski, J. Kubicki // Archives of Foundry Engineering.— 2008. Vol. 8, № 2.— P. 115–120.

9. **Buchanan, K.G.** Crystallography and Morphology of Niobium Carbide in As-Cast HP-Niobium Reformer Tubes [Текст] / K.G. Buchanan, Milo V. Kral // Metallurgical and Materials Transactions A.— 2012. Vol. 43, № 6.— P. 1760–1769.

10. **Kaya, A.A.** Microstructure of HK40 alloy after high-temperature service in oxidizing/carburizing environment: II. Carburization and carbide transformations [Текст] / A.A. Kaya // Materials Characterization.— 2002. Vol. 49, № 1.— P. 23–34.

11. **Sourmail, T.** Precipitates in creep resistant austenitic stainless steels [Текст] / T. Sourmail // Materials Science and Technology.— 2001. Vol. 17, № 1.— P. 1–14.

12. **Garbiak, M.** Precipitation kinetics in austenitic 18Cr-30Ni-Nb cast steel [Текст] / M. Garbiak, R. Chyliňska // Archives of Foundry Engineering.— 2008. Vol. 8, № 3.— P. 27–30.

13. Sigma Phase Formation and Embrittlement of Cast Iron-Chromium-Nickel (Fe-Cr-Ni) Alloys [Текст] // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering.— 2008. Vol. 7, № 2.— P. 127–145.

14. **Угорский, А.Э.** О параметрических методах температурно-временной экстраполяции предела длительной прочности [Текст] / А.Э. Угорский // Проблемы прочности.— 1986. № 1.— С. 40–43.

15. **Le May, I.** Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data [Текст] / I. Le May // Journal of Engineering Materials and Technology.— 1979. Vol. 101, № 4.— P. 326–330.

16. Марочник стали для машиностроения [Текст] / НИИМ.— М.: Изд-во НИИ информации по машиностроению, 1965.— 594 с.

УДК 621.771

А.М. Золотов, Р.А. Паршиков, Н.Ю. Боклаг, С.В. Паршин, Е.В. Трутнев

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ В *S*-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

Целью настоящей работы было изучение кинематики течения металла при комбинированном процессе экструзии и равноканального углового прессования (РКУП) в *S*-образном канале и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) в металле заготовок, подвергнутых этому процессу.

Схема процесса приведена на рис. 1

Особенностью этого комбинированного процесса является возможность получения длинномерных заготовок из различных материалов с использованием процессов интенсивной пластической деформации (РКУП в *S*-образном канале), что представляет большой практический интерес [1, 2].

Моделирование процесса проводилось с помощью программного комплекса «Multidef», реализующего метод конечных элементов (МКЭ) и позволяющего решать термоэластопластические задачи.

При моделировании процесса экструзии рассматривалось течение металла в условиях осесимметричной деформации, а при моделировании процесса РКУП — течение металла в условиях плоско-деформированного состояния ($\varepsilon_z = 0$).

Так как процессы деформирования при экструзии и РКУП — нестационарны, они разбивались на ряд шагов по времени, для каждого из которых определялось НДС в металле для текущего момента времени.

Поскольку условия деформирования при экструзии и РКУП различаются, моделируя комбинированный процесс его разбивали условно на два перехода: процесс экструзии заготовок и процесс РКУП в *S*-образном канале.

Кривые пластичности для исследуемых материалов определялись экспериментально методом осадки образцов (рис. 2).

В модели коэффициент трения на контактной поверхности между заготовкой и инструментом задавался равным 0,2.

Сетка конечных элементов состояла из 600 изопараметрических квадратичных элементов с 1941 узлами.

Геометрия матрицы для экструзии представлена на рис. 3.

На рис. 4 и 5 отражены стадии процесса течения металла при РКУП в *S*-образном канале.

Как видно из геометрии элементов сетки, в результате экструзии зона, прилегающая к оси заготовки, в основном деформируется за счет удлинения вдоль оси. А зоны, прилегающие к контактной поверхности матрицы, подвергаются, кроме линейных, еще и значительным сдвиговым деформациям, что связано с трением на контактной поверхности и углом захода матрицы.

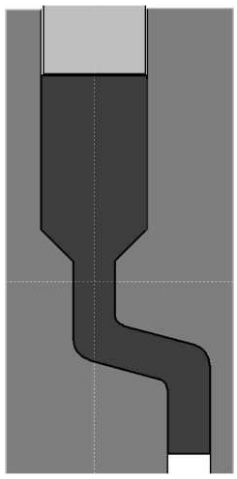


Рис. 1. Схема комбинированного процесса экструзии и равноканального углового прессования в *S*-образном канале

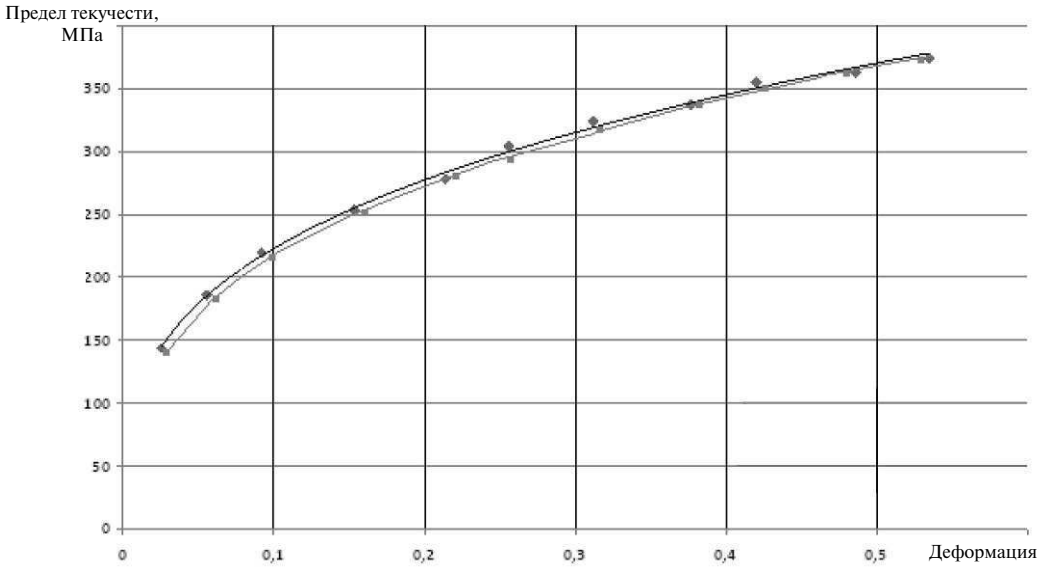


Рис. 2. Кривые теккучести меди при осадке образцов
(——— — HCP — 99,5 %; ——— — OFE — 99,9 %).

После 27-й стадии процесс в дальнейшем до его окончания развивается как стационарный.

На рис. 6–16 представлены распределения параметров напряженно-деформированного состояния металла в заготовке при экструзии.

Как видно из рис. 10, в результате экструзии в металле заготовки накапливаются пластические деформации, достигающие значений порядка 140–200 %.

При моделировании процесса РКУП рассматривалось течение металла в условиях плоско-деформированного состояния ($\varepsilon_z = 0$). Поскольку процесс деформирования при РКУП нестационарен, он разбивался на ряд шагов по времени, для каждого из которых определялось НДС в металле для данного момента времени.

На рис. 17 приведена геометрия *S*-образного канала и значения геометрических параметров.

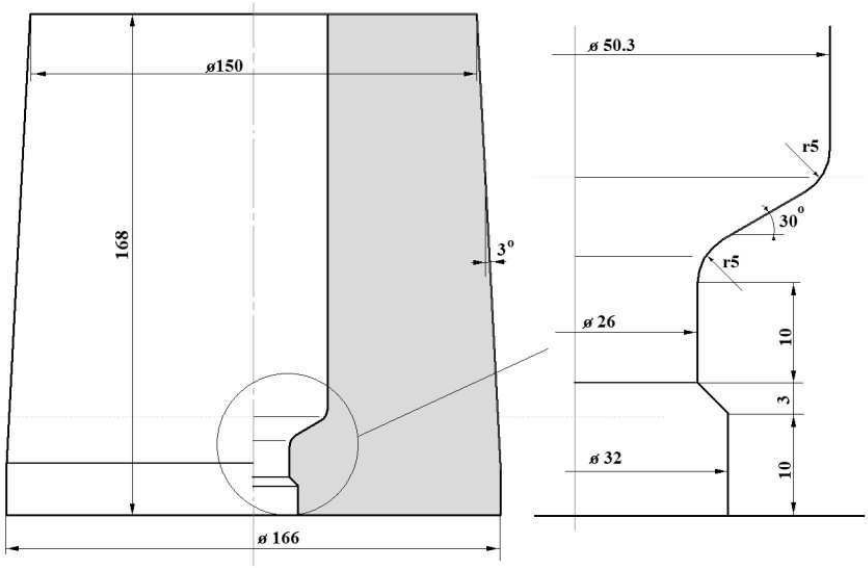


Рис. 3. Геометрия матрицы для экструзии

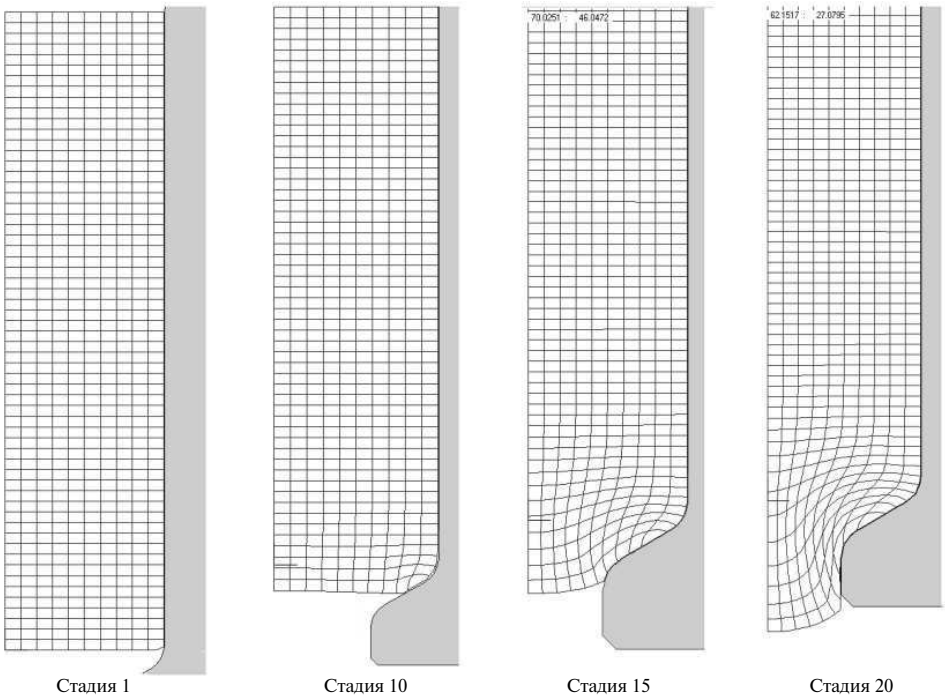


Рис. 4 Стадии процесса экструзии заготовки (стадии 1–20)

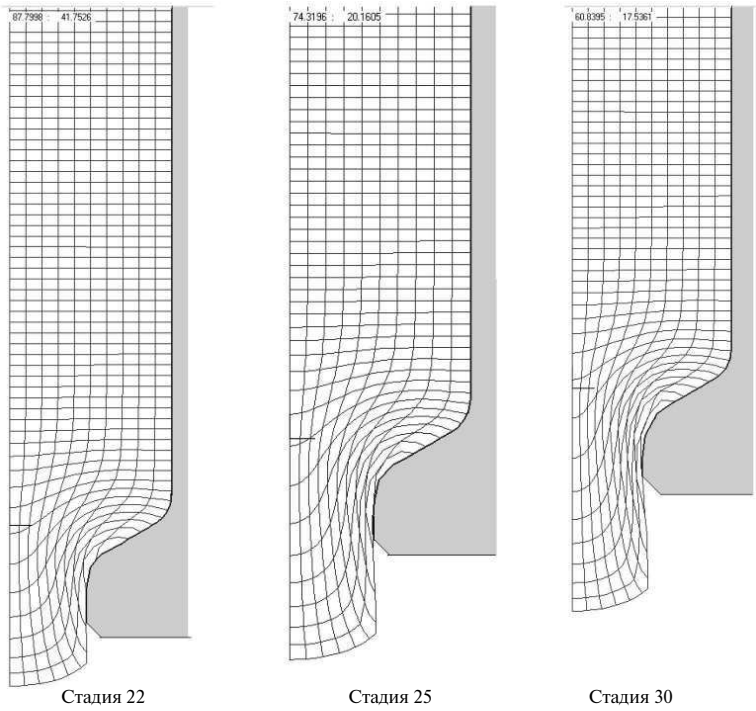


Рис. 5. Стадии процесса экструзии заготовки (стадии 22–30)

Рис. 6. Распределение радиальных деформаций ε_r в образце при экструзии

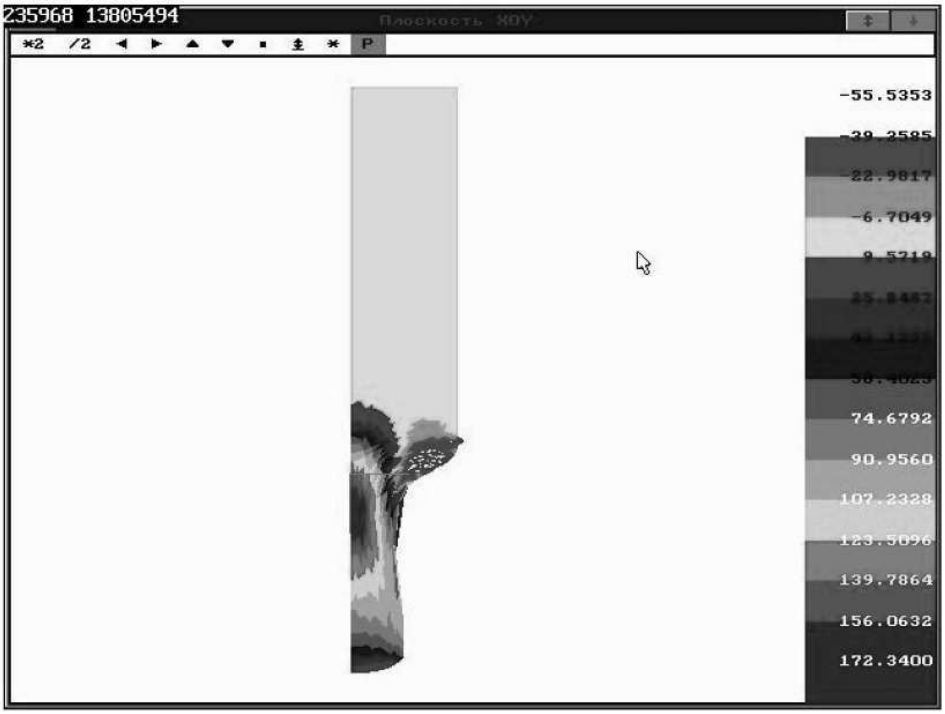


Рис. 7. Распределение деформаций ε_z в образце при экструзии

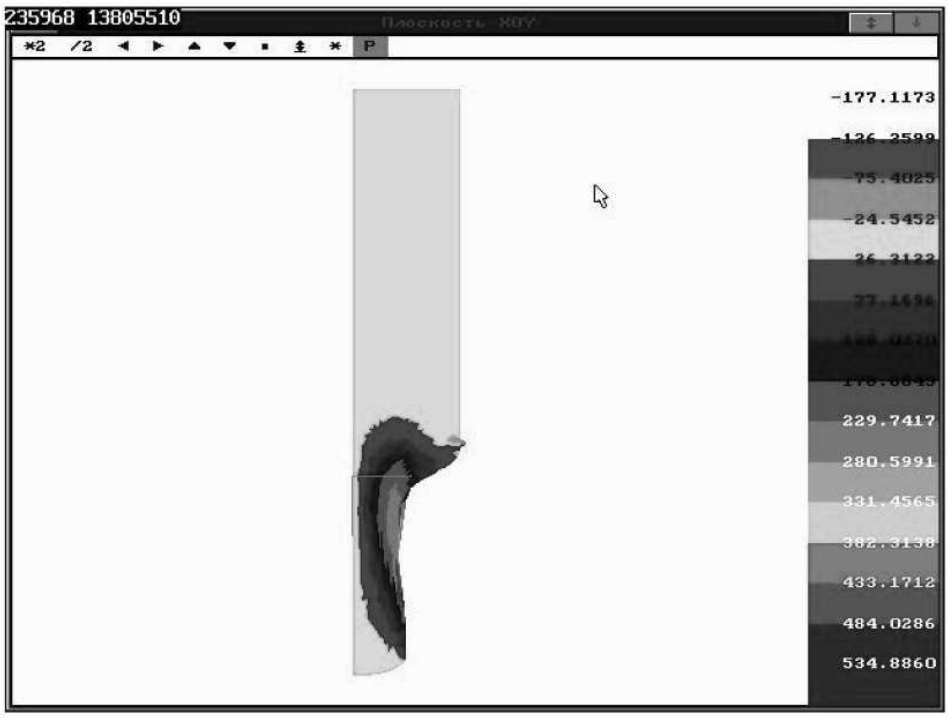


Рис. 8. Распределение тангенциальных деформаций ε_θ в образце при экструзии

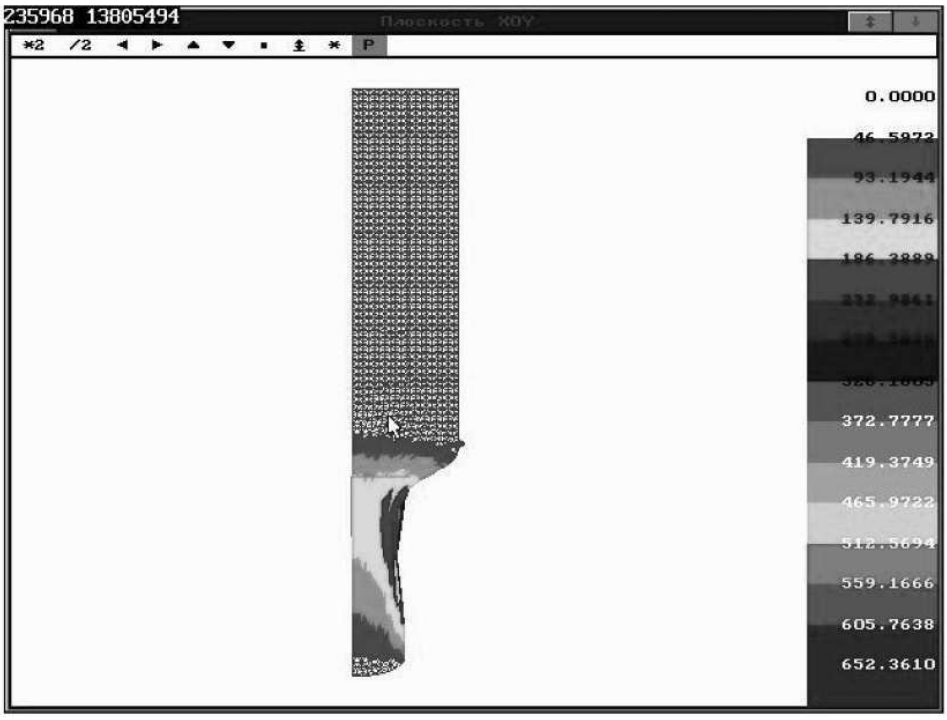


Рис. 9. Распределение сдвиговых деформаций γ_{rz} в образце при экструзии

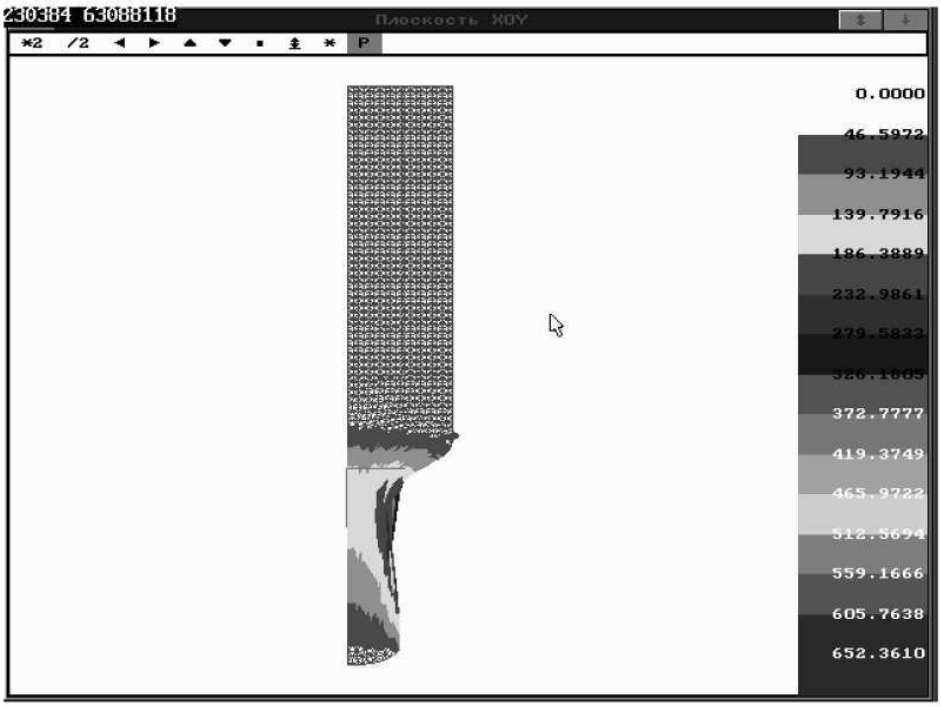


Рис. 10. Распределение интенсивности деформаций ε_i в образце при экструзии

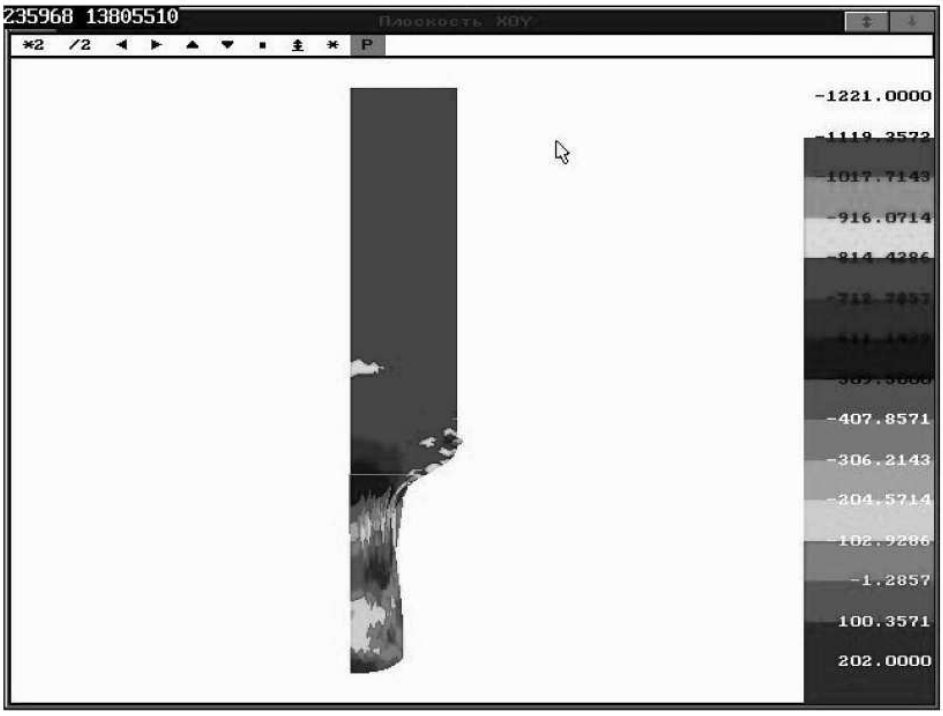


Рис. 11. Распределение радиальных напряжений σ_r в образце при экструзии

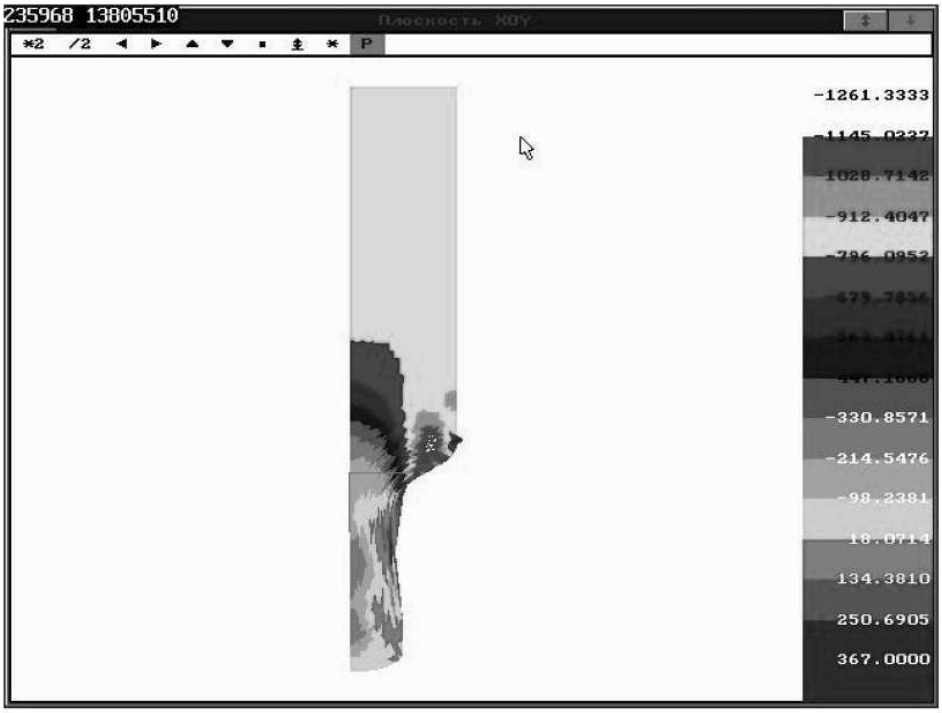


Рис. 12. Распределение напряжений σ_z в образце при экструзии

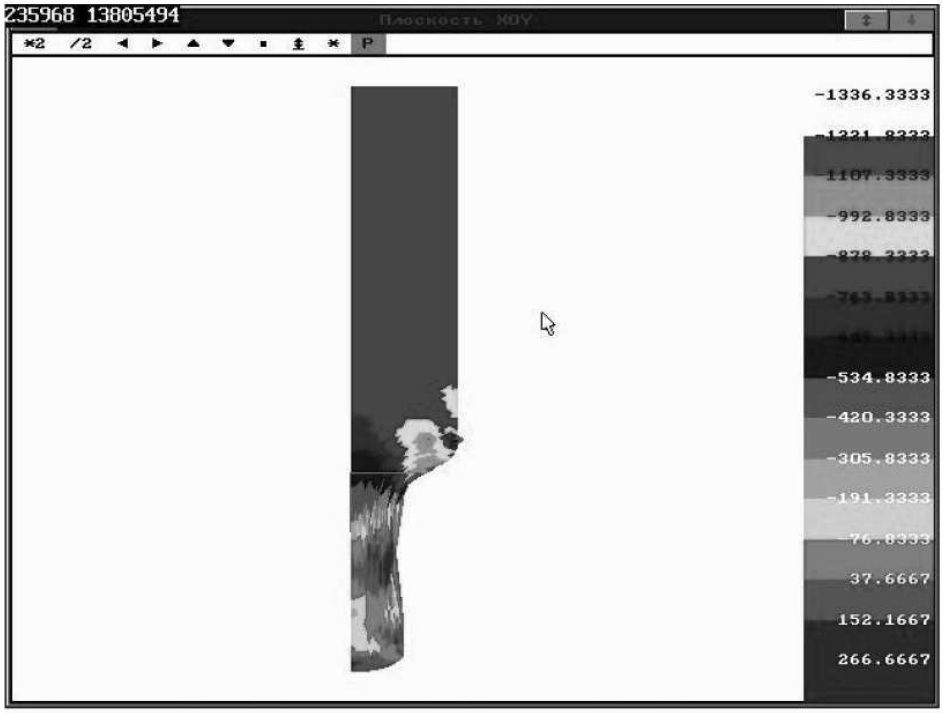


Рис. 13. Распределение тангенциальных напряжений σ_θ в образце при экструзии

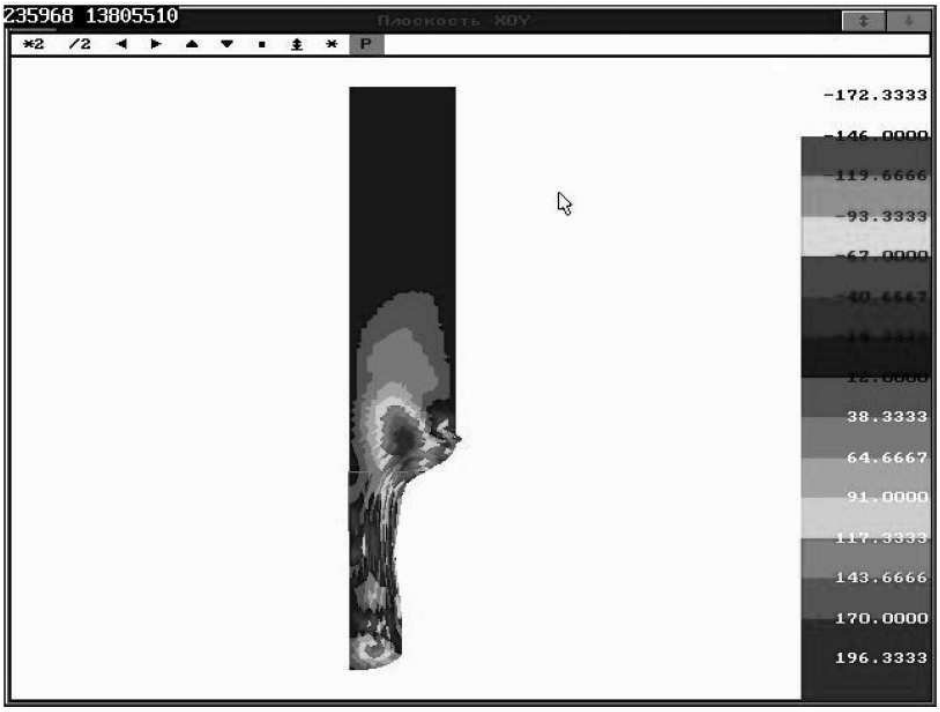


Рис. 14. Распределение касательных напряжений τ_{rz} в образце при экструзии

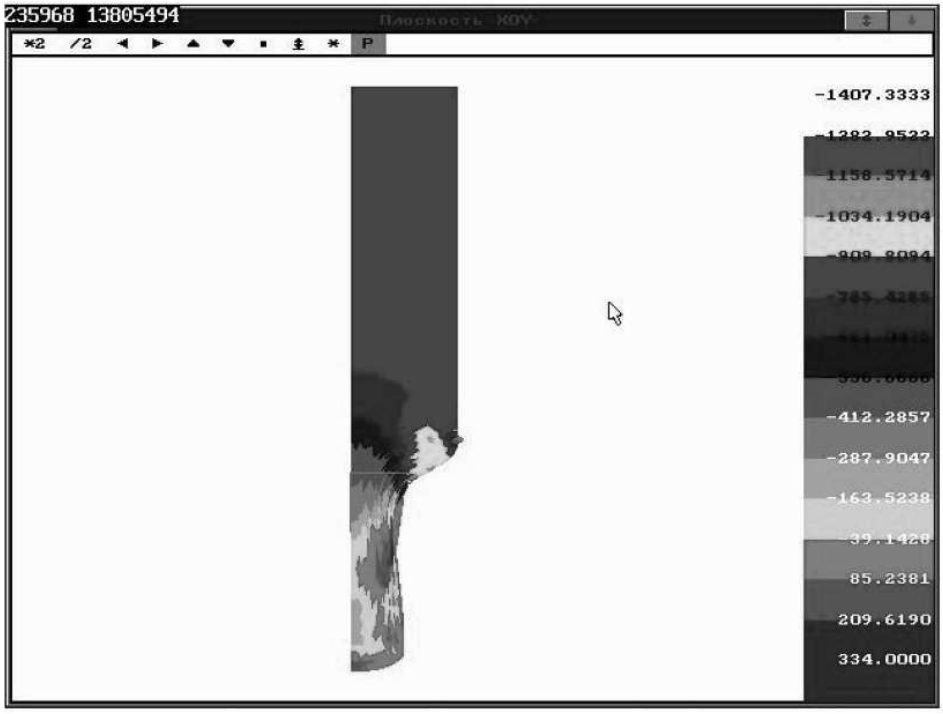


Рис. 15. Распределение средних напряжений σ_0 (гидростатического давления) в образце при экструзии

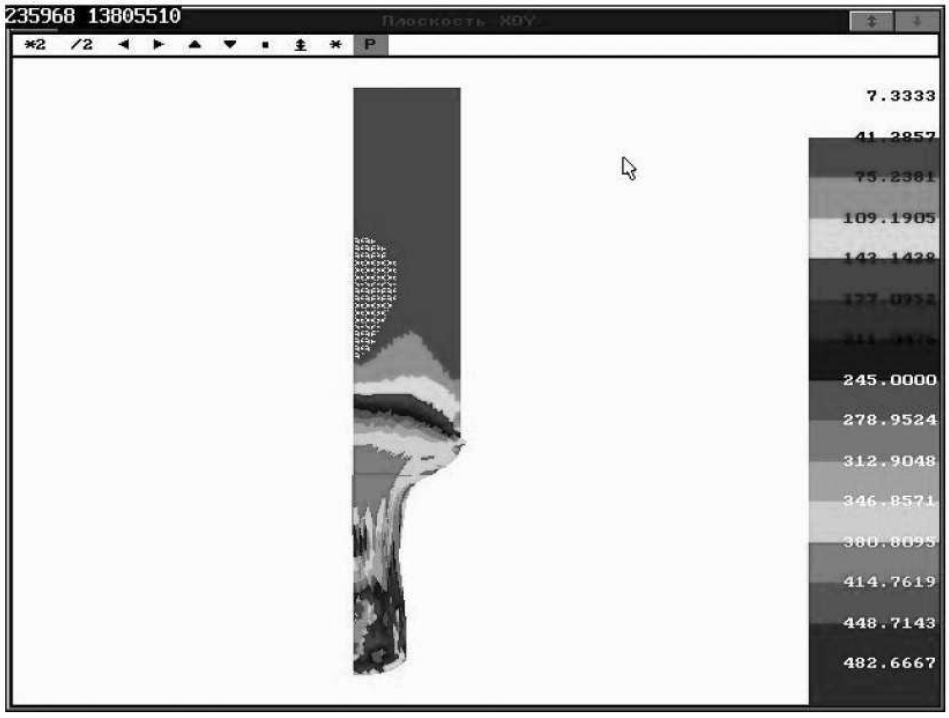


Рис. 16. Распределение интенсивности напряжений σ_i в образце при экструзии

В модели коэффициент трения на контактной поверхности между заготовкой и инструментом задавался равным 0,2. Сетка конечных элементов состояла из 420 изопараметрических квадратичных элементов с 1365 узлами.

На рис. 18 представлены стадии процесса течения металла при РКУП.

Как видно из представленных стадий процесса течения металла, он имеет несколько характерных этапов. В начале процесса течения (рис. 18, стадии 10 и 20) происходит изгиб образца в канале. Затем образуется так называемый «нос» на передней части заготовки (рис. 18, стадии 20 и 30).

После прохождения передней частью заготовки горизонтальной части канала ее вершина упирается в вертикальную стенку нижней части канала (стадия 32), возникает новая зона контакта на этой поверхности, которая постепенно расширяется по мере продвижения заготовки в канале (стадии 34–60). Возникает второй изгиб заготовки. Контакт в горизонтальной зоне канала происходит только по нижней стенке, т. е. верхний угол еще не заполнен.

Далее происходит последовательное заполнение нижней части канала, а горизонтальная часть канала заполняется полностью, т. е. в ней возникает двухсторонний контакт (стадии 65–80).

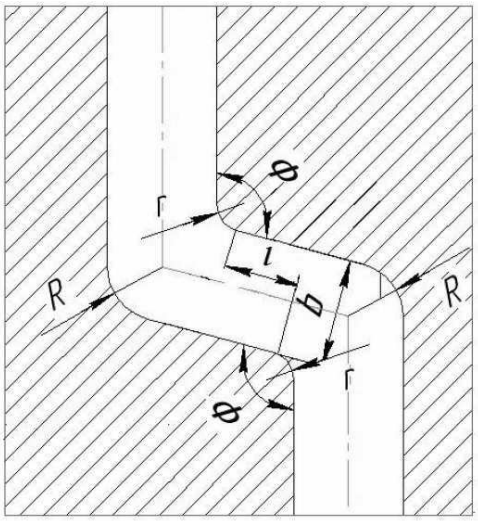


Рис. 17. Геометрия *S*-образного канала и значения геометрических параметров: Ф = 105°, R = 10 мм, r = 5 мм, b = 20 мм, l = 10 мм

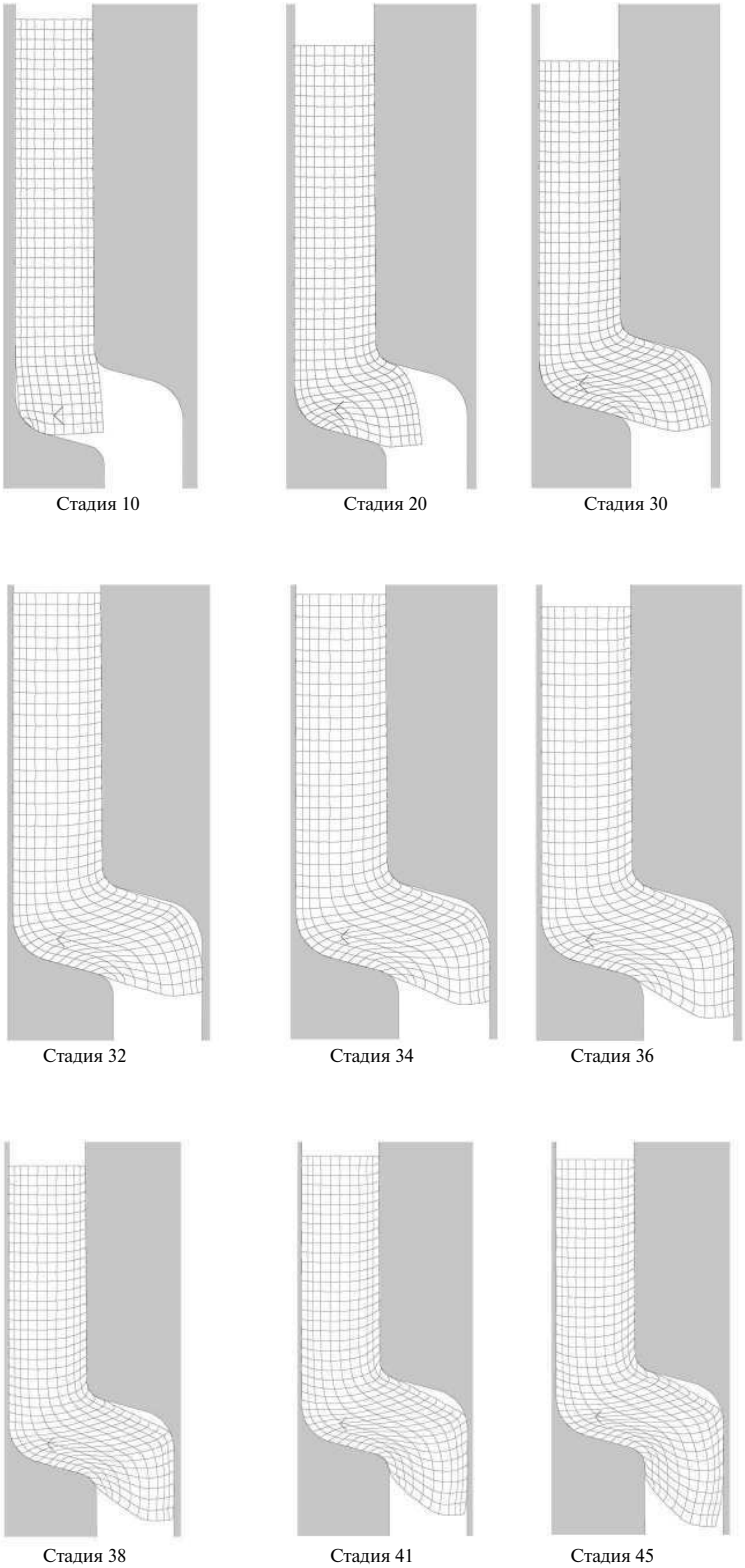


Рис. 18. Стадии процесса течения металла при РКУП в *S*-образном канале

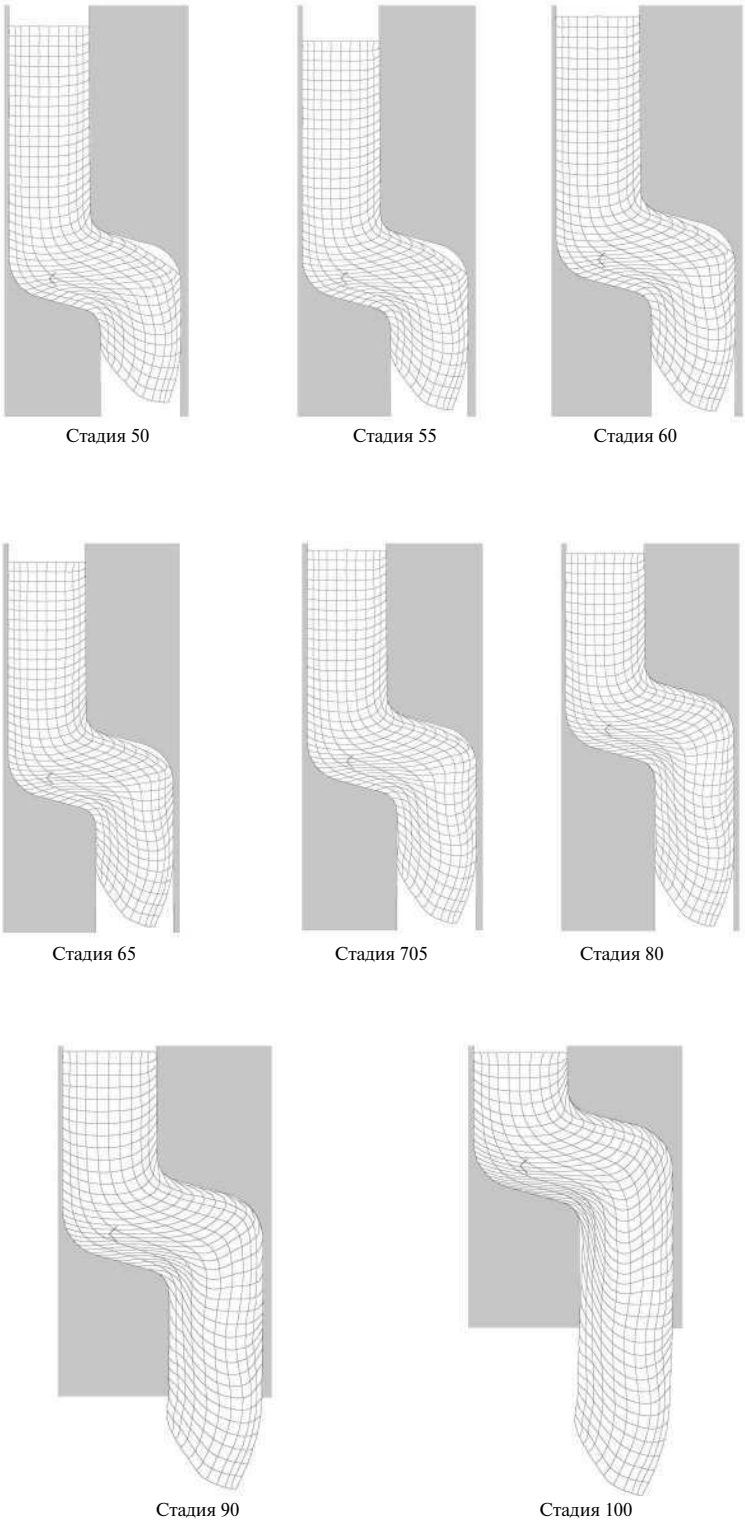


Рис. 18. Окончание

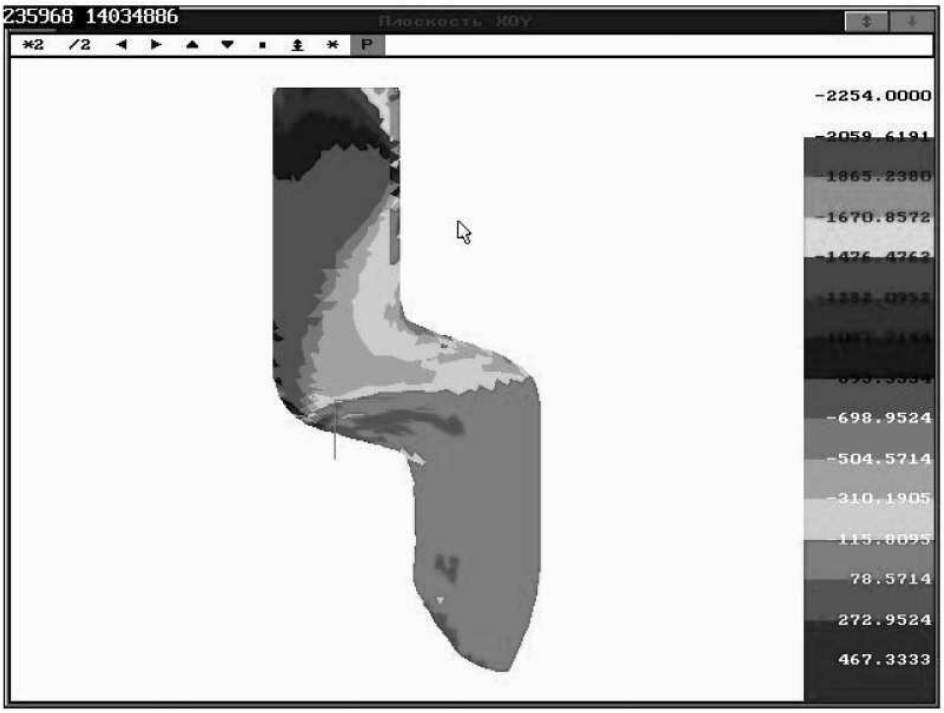


Рис. 19. Распределение напряжений σ_x в заготовке при РКУП

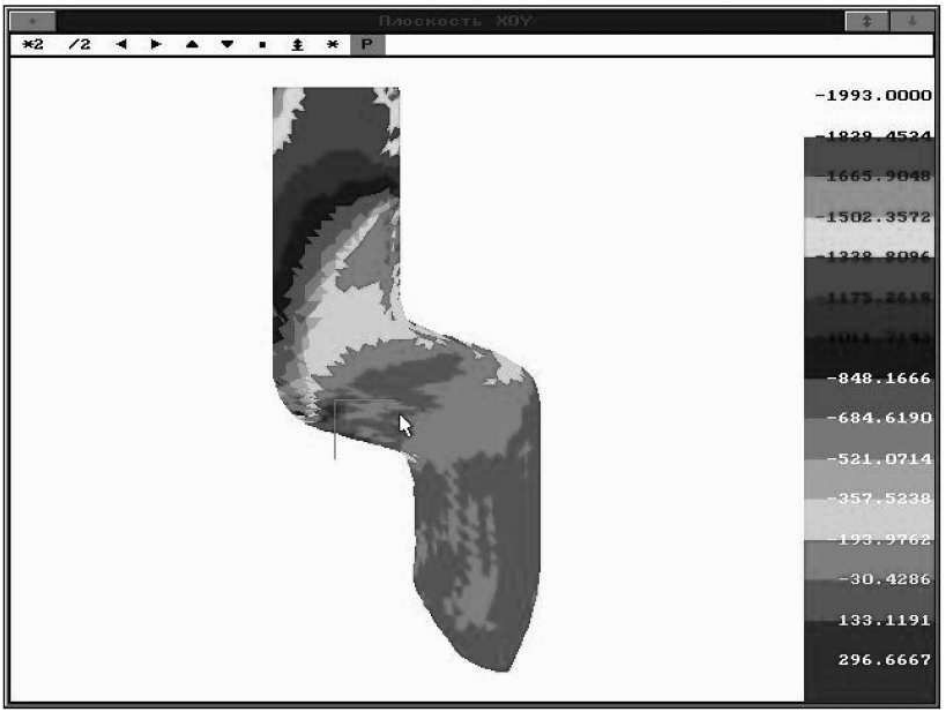


Рис. 20. Распределение напряжений σ_y в заготовке при РКУП

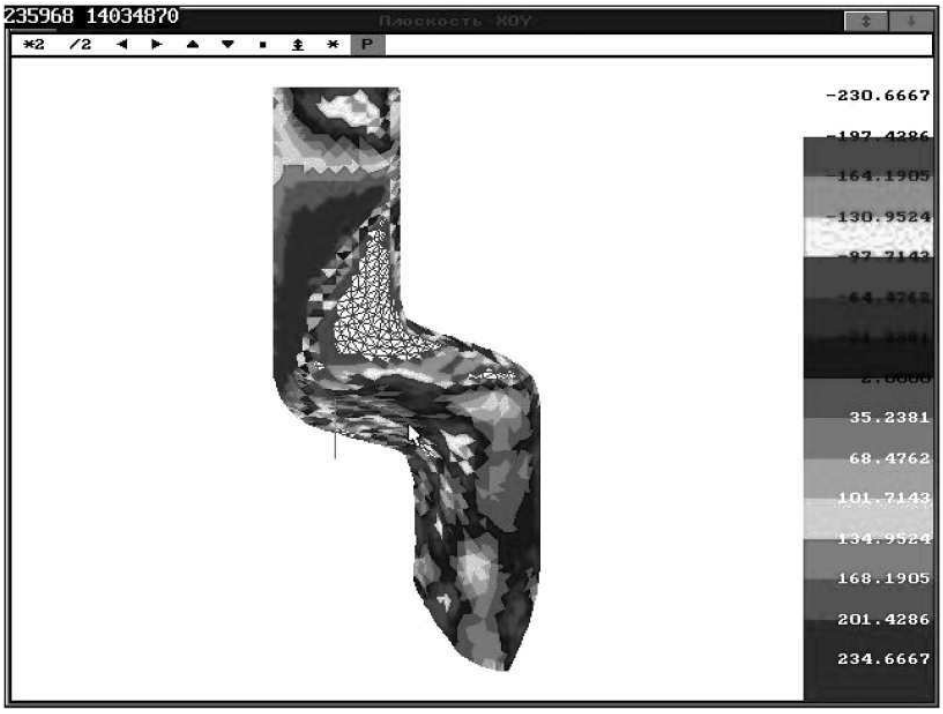


Рис. 21. Распределение сдвиговых напряжений τ_{xy} в заготовке при РКУП

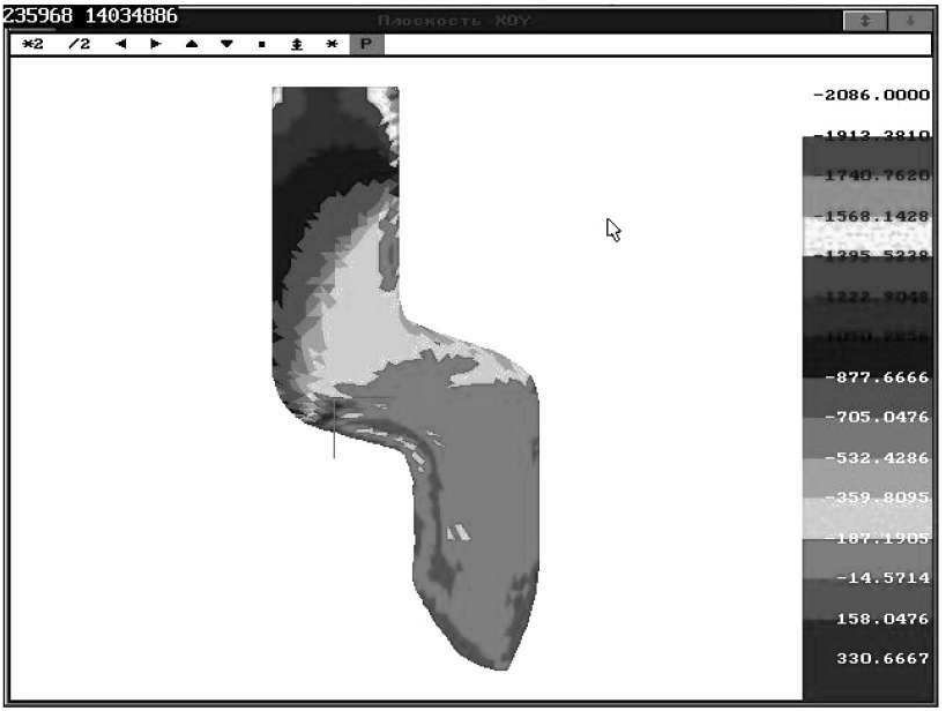


Рис. 22. Распределение напряжений σ_z в заготовке при РКУП

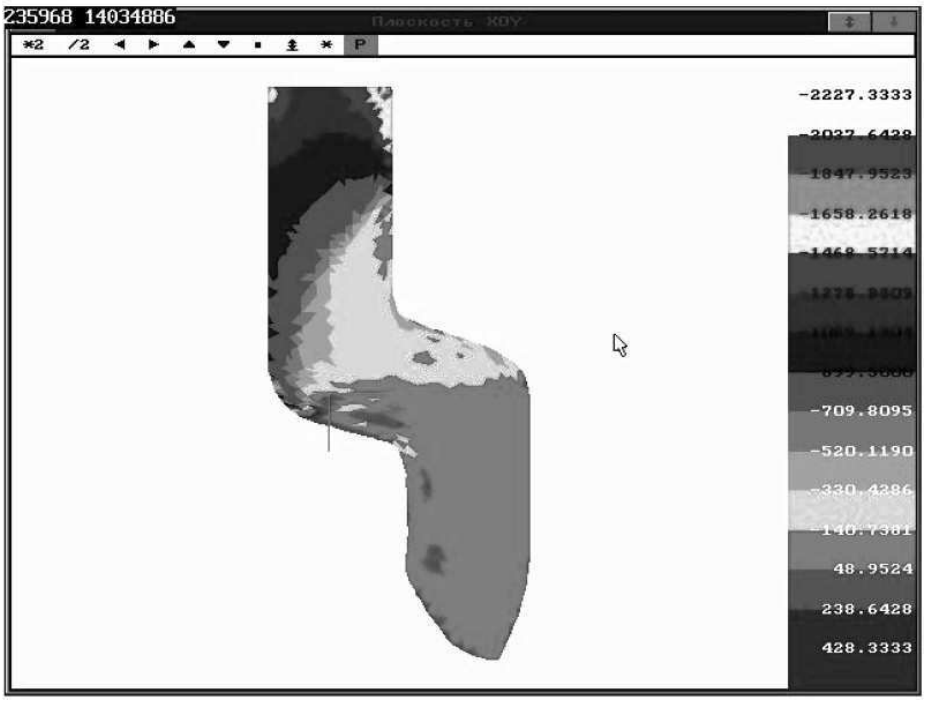


Рис. 23. Распределение средних напряжений σ_0 (гидростатического давления) в заготовке при РКУП

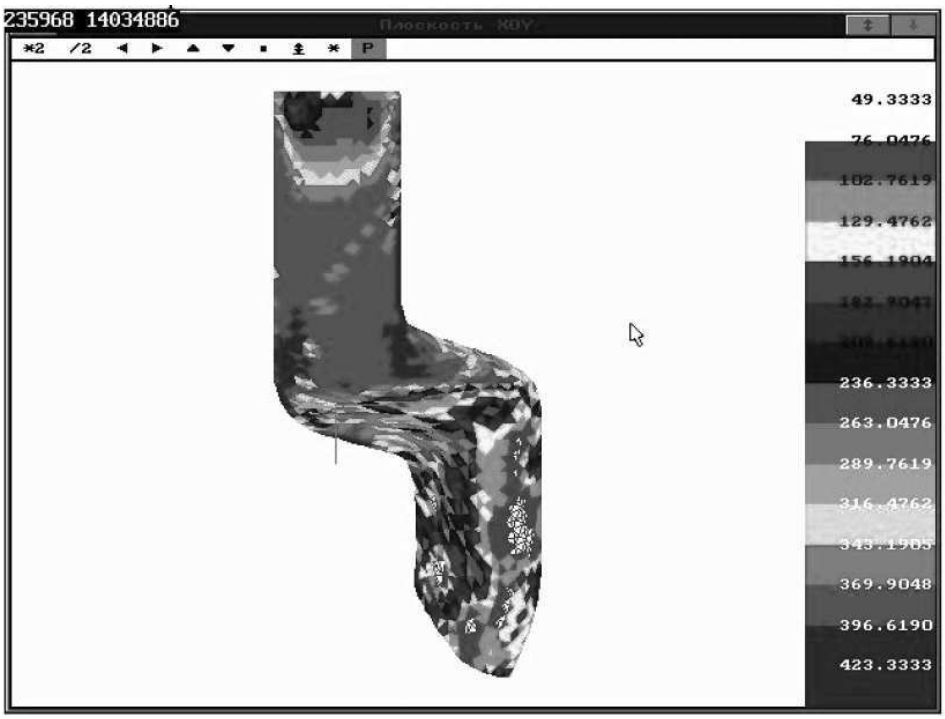


Рис. 24. Распределение интенсивности напряжений σ_i в заготовке при РКУП

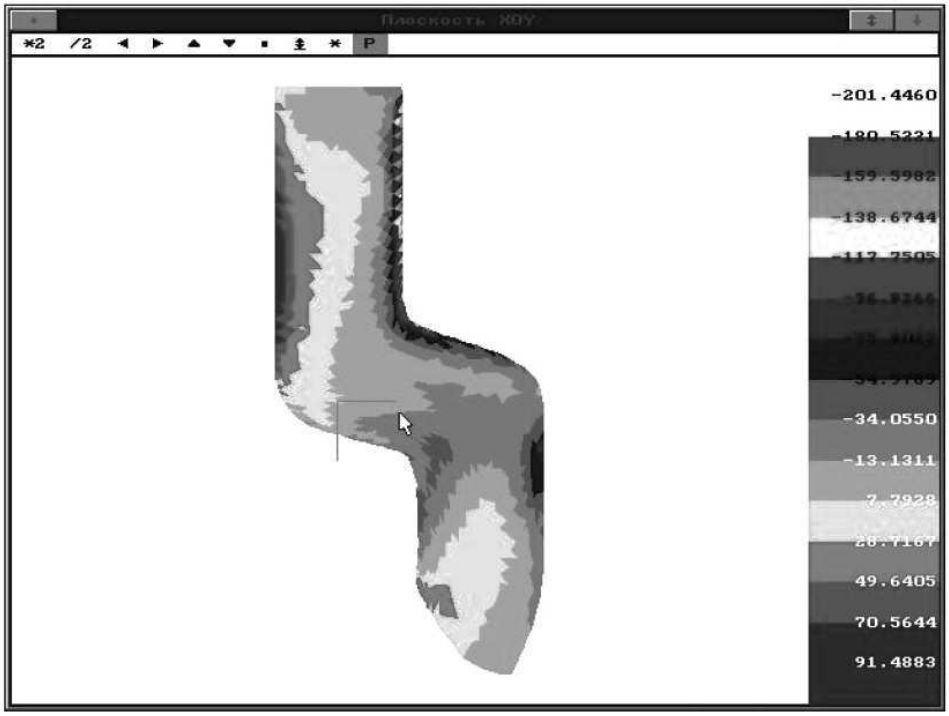


Рис. 25. Распределение деформаций ε_x в заготовке при РКУП

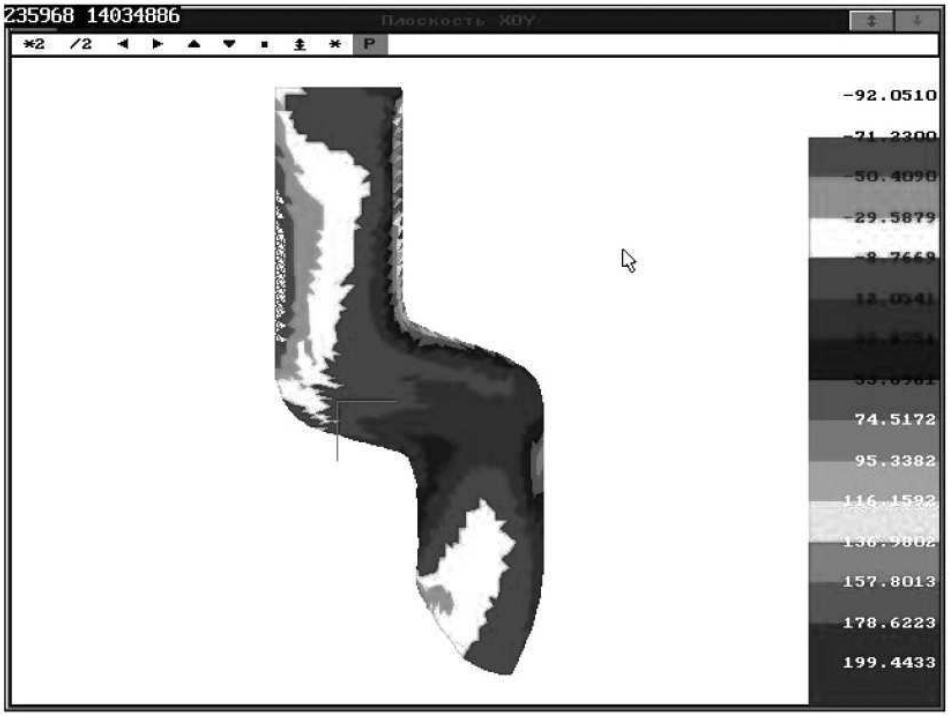


Рис. 26. Распределение деформаций ε_y в заготовке при РКУП

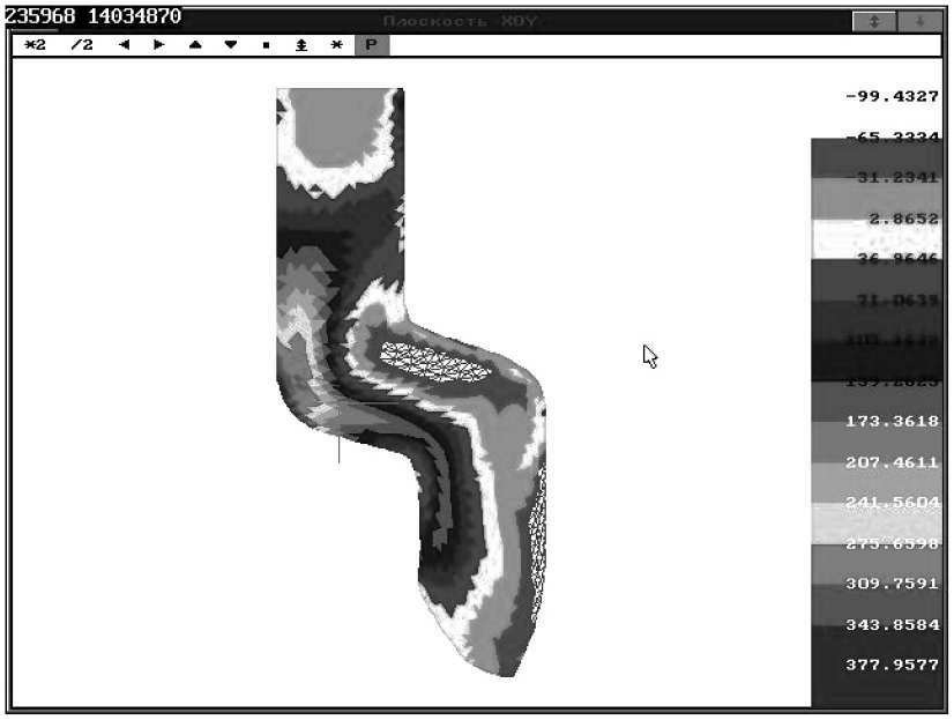


Рис. 27. Распределение сдвиговых деформаций γ_{xy} в заготовке при РКУП

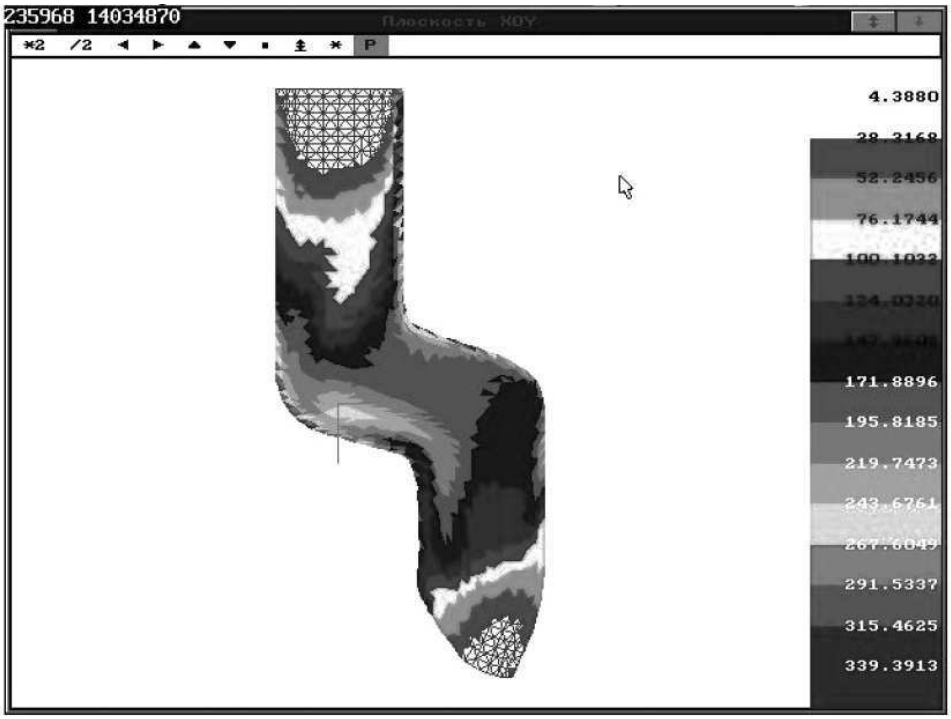


Рис. 28. Распределение интенсивности деформаций ε_i в заготовке при РКУП

После этого этапа, как можно судить по геометрии сетки конечных элементов, в образце создаются почти равномерные сдвиговые деформации (стадия 100). Такое деформированное состояние сохраняется до конца процесса.

На рис. 19–28 представлено распределение параметров напряженно-деформированного состояния в заготовке.

Рис. 28 демонстрирует, что при прохождении канала данной формы в заготовке накапливаются деформации в пределах 170–240 %. Таким образом, суммарные накопленные деформации в заготовке при комбинированном процессе экструзии и РКУП в *S*-образном канале могут достигать 300–400 %, что должно существенно сказаться на структуре и свойствах получаемых заготовок. Кроме того, следует учесть: данный процесс позволяет получать длинномерные заготовки, что имеет значительный практический интерес.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рудской, А.И.** Наноструктурированные металлические материалы [Текст] / А.И. Рудской.— СПб.: Наука, 2011.— 207 с.

1. **Рудской, А.И.** Анализ особенностей деформирования заготовок методами интенсивной пластической деформации [Текст] / А.И. Рудской, А.М. Золотов, Р.А. Паршиков, Е.С. Смирнов // Металлообработка.— 2009. № 6(54).— С. 41–43.

УДК 669.295:669.018

М.А. Скотникова, Е.В. Миронова,
Н.А. Крылов, А.В. Соколов

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РАСПАД ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ПОЛИМОРФНОМ $\alpha \leftrightarrow \beta$-ПРЕВРАЩЕНИИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ТИТАНА

Развитие научно-технического прогресса в области создания изделий из труднообрабатываемых материалов, в частности полиморфных титановых сплавов, требует совершенствования существующих и разработки принципиально новых, научно-обоснованных, контролируемых технологических процессов, учитывающих структурные и фазовые превращения в материале заготовки.

Известно, что общая концентрация вакансий в кристаллах, возрастает с увеличением температуры и степени деформации. Следует заметить, что при одинаковой температуре, например, 882 °С, в ОЦК-кристаллической решетке, равновесная концентрация вакансий на 8 порядков меньше по сравнению с ГПУ-решеткой в связи с разной энергией их образования.

Таким образом, при условии структурной преемственности при нагреве во время полиморфного превращения по сдвиговому механизму переходных металлов с ГПУ-решеткой (Ti, Zr, Hf) высокотемпературное их состояние с ОЦК-решеткой оказывается вакансионно-пересыщенным и, следовательно, метастабильным.

Особенности полиморфного превращения в титановых сплавах

Фазовые переходы в сплавах на основе титана очень разнообразны и изучены еще недостаточно полно. Практически во всех случаях причиной их развития в твердом состоянии является полиморфизм этого металла. Представления о полиморфных превращениях развиваются в настоящее время исключительно с кинетических позиций на основе термодинамического подхода. Отдельные авторы считают, что полиморфный переход подобен конденсации или затвердеванию жидкостей при флуктуационном изменении энергии отдельных частиц [1]. Вызывает интерес «полевая» теория, предполагающая, что новая фаза может образоваться из старой путем коллективного движения атомов под действием определенного поля, параметры которого изменяются от значений, характерных для одной фазы, до значений другой на некоторой протяженности, где происходит их самосогласованное перемещение [2]. Достаточно широко распространено представление о сдвиговом характере полиморфных превращений в твердом состоянии. Возникающие при таком сдвиге когерентность сосуществующих фаз и упругие поля напряжений служат причиной автокаталитического процесса превращения, значительно снижающего энергетический порог [3–5].

Отдельные авторы считают, что величина энергетических барьеров для зарождения и роста новой фазы связана со степенью релаксации напряжений в решетке, а это ведет к расщеплению единого по природе превращения на ряд стадий по температурам, в результате чего возникает целый спектр «превращений», различающихся по температурам, степеням релаксации напряжений, кинетике и морфологическим признакам фаз [4].

Таким образом, рассмотрев закономерности полиморфных превращений, исследователи пришли к выводу о возможности сложного протекания такого рода трансформаций и получения при этом широкого набора структур сплавов в зависимости от их состава, степени переохлаждения, исходного состояния и ряда других факторов.

Полиморфный переход у иодидного титана развивается при температуре 882 °С и связан с преобразованием гексагональной плотноупакованной решетки (α-фаза) в кубическую объемно-центрированную (β-фазу). В технически чистом титане интервал полиморфного превра-

щения составляет уже около 30 °С [6] и возможно расширение этого интервала до 100–120 °С в связи с наличием примесей [7]. Считается, что объемные изменения при фазовых превращениях, связанных с полиморфным переходом, невелики и составляют всего 0,17±0,1 % [8], несмотря на то, что при переходе из гексагональной плотноупакованной решетки в объемно-центрированную они достигают 8 %. Следовательно, при этом развивается какой-то процесс, снижающий разность объемов фаз.

При рентгеновских исследованиях титановых сплавов обнаружена стадийность развития фазового перехода [9, 10]. Авторы выделяют три стадии $\alpha\rightarrow\beta$-превращения: зарождение β-частиц при нагреве происходит по сдвиговому механизму, затем переход развивается простым ростом фаз до соприкосновения, а заканчивается собирательной рекристаллизацией.

Таким образом, имеющиеся литературные данные говорят о сложном ходе полиморфного превращения в чистом титане и связанных с ним фазовых $\alpha\leftrightarrow\beta$-переходов в титановых сплавах, обусловливающих возникновение разнообразных метастабильных фаз ($\alpha_{м}$, α', α'', ω, $\beta_{м}$) [11] из-за стадийности этих трансформаций вплоть до мартенситного превращения и стадийного его распада при нагреве.

Кристаллогеометрическая модель вакансионного пересыщения высокотемпературной ОЦК-модификации титана

В практическом металловедении титана известен ряд экспериментальных результатов, полученных в температурно-временном интервале перехода ГПУ-титана в его ОЦК-модификацию, которые, к сожалению, не нашли пока еще достаточно полного научного объяснения. Окончательно не поняты: аномально-высокая диффузионная подвижность атомов титана при нагреве в β-области вблизи точки полиморфного превращения [12]; весьма низкая (0,17 %) по сравнению с расчетной величина изменения удельного объема элементарной кристаллической решетки [8]; существование даже в чистом титане некоторого температурного интервала $\alpha\rightarrow\beta$-превращения [6, 13]; снижение теплового разупрочнения металла при переходе в β-область [14] во время высокотемпературных испытаний с повышением температуры нагрева.

Известно [12], что для достижения термодинамической стабильности любой фазовой составляющей, определяемой свободной энергией Гиббса (F), возможны два пути: усиление энергии их межатомного взаимодействия с конфигурацией электронов, имеющих минимальную энергию возбуждения (энтальпию U) при абсолютном нуле, или увеличение энтропийного фактора системы S (мобильность системы), так как

$$F = U - TS. \qquad (1)$$

Безусловна взаимозависимость этих двух регулирующих механизмов, но первый преобладает в сплавах на основе ОЦК-кристаллов Nb, Mo, Ta, W с сильными межатомными связями, а второй — в плотноупакованных ГПУ- и ГЦК-кристаллах на основе Ti, Zr, Cu, Al со слабыми связями между атомами. Сохранение целостности в последних может быть обеспечено благодаря достаточной подвижности атомов основы. Как видно по данным таблицы, в плотноупакованных решетках количество окта- и тетраэдрических пор, приходящихся на один атом основы в элементарной ячейке, ($Z_{оп}/Z$; $Z_{тп}/Z$), недостаточно для реализации такой мобильности системы. Поэтому, вероятно, определяющей является низкая (0,4–0,7 эВ) энергия образования вакансий. Именно вакансионное пересыщение и их упорядочение в плотноупакованных системах обусловливает гибкое и своевременное (температурно-временное) регулирование межатомного взаимодействия за счет кристаллогеометрического способа упрочнения (изменение геометрии взаимодействия). Склонностью плотноупакованных кристаллов к вакансионному пересыщению можно объяснить, во-первых, существование большого количества метастабильных фаз в сплавах на основе Cu, Al, Ti; во-вторых, формирование, например в сталях, значительно более широких по сравнению с ОЦК-Fe твердорастворных областей на основе ГЦК-Fe. Известно, что общая концентрация вакансий, особенно в ГПУ-кристаллах с низкой энергией их образования (см. таблицу), зависит не только от температуры и степени деформации, но и от наличия примесных атомов [2].

Концентрация вакансий будет расти, если примеси в зоне их расположения уменьшают энергию межатомного взаимодействия.

Влияние кристаллогеометрии элементарной ячейки на концентрацию формирующихся в ней вакансий

Кристаллогеометрия элементарной ячейки ряда металлов	ГПУ Ti, Zr, Hf	ГЦК Al, Cu, Ag	ОЦК Mo, W, V
Энергия образования вакансий U_f, эВ	0,4–0,7	1,0–1,7	2,0–3,0
Концентрация вакансии C_v (1115 °K)	$4{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	$1{,}4\cdot10^{-11}$
Число атомов в элементарной ячейке, Z	6	4	2
Радиус $r_{оп}$ октаэдрической поры в элементарной ячейке в зависимости от радиуса $r_ш$ атома	$r_{оп} = 0{,}417\ r_ш$	$r_{оп} = 0{,}417\ r_ш$	$r_{оп}(x, z) = 0{,}115\ r_ш$ $r_{оп}(y) = 0{,}633\ r_ш$
Число октаэдрических пор в элементарной ячейке, $Z_{оп}$	6	4	6
Радиус $r_{тп}$ тетраэдрической поры в элементарной ячейке в зависимости от радиуса $r_ш$ атома	$r_{тп} = 0{,}225\ r_ш$	$r_{тп} = 0{,}225\ r_ш$	$r_{тп} = 0{,}291\ r_ш$
Число тетраэдрических пор, $Z_{тп}$	12	8	12
Характеристика энтропии, $Z_{оп}/Z$	1	1	3
Характеристика энтропии, $Z_{тп}/Z$	2	2	6

Все полиморфные металлы в периодической системе элементов Д.И. Менделеева можно разделить согласно кристаллогеометрии их превращения во время нагрева на три основные группы [15]:

1 группа — ОЦК → ГЦК(Fe, Mn, Cd, La, Yb);

2 группа — ГПУ→ ОЦК (Ti, Zr, Hf, Tl, Gd);

3 группа — ГПУ→ ГЦК (Co, Tb, Sr).

Кроме того, известно, что с повышением температуры в металлах экспоненциально возрастает равновесная концентрация вакансий (C_v), но до разного уровня в соответствии с типом кристаллической решетки и энергией необходимой для образования в ней вакансий (U_f):

$$C_v(T) \approx \exp(-\ U_f / kT). \qquad (1)$$

Согласно данным работы [16] с переходом от ГПУ к ОЦК-кристаллической решетке в последовательности ГПУ → ГЦК → ОЦК возрастает энергия образования в них вакансий U_f, эВ, (см. таблицу): соответственно (0,4–0,7) → → (1,0–1,7) → (2,0–3,0). При этом оценка концентрации равновесных вакансий по формуле (1), например при температуре 882 °C (1155 K), указывает на снижение C_v на несколько порядков в последовательности ($4{,}1\cdot10^{-3}$) → ($1{,}4\cdot10^{-6}$) → → ($1{,}4\cdot10^{-11}$).

Следует заметить, что общая концентрация вакансий, особенно в ГПУ-кристаллах с низкой энергией их образования, зависит не только от температуры и степени деформации, но и от наличия примесных атомов [12]. Концентрация вакансий будет расти, если примеси в зоне их расположения уменьшают энергию межатомного взаимодействия.

Таким образом, при условии структурной преемственности при нагреве во время полиморфного превращения по сдвиговому механизму переходных металлов с ГПУ-решеткой (Ti, Zr, Hf) высокотемпературное их состояние с ОЦК-решеткой оказывается вакансионно-пересыщенным и, следовательно, метастабильным.

В работах [17, 18] обосновано положение о том, что кристалл в сильно возбужденном состоянии становится, по существу, суперпозицией нескольких структур, а количество разрешенных структурных состояний в системе значительно превышает количество атомов. Такое состояние в кристалле, названное атом-вакансионным, обусловливает возникновение в нем «метастабильных» фаз, в которых междоузлия кристалла становятся конкурентноспособными по отношению к основным узлам решетки. Известно [19], что в ОЦК-решетке наиболее устойчивыми вакансионными комплексами являются тетравакансии. О возможности упорядочения в сплавах с ОЦК-решеткой, в которых могут возникать две вставленные одна в другую (по типу CsCl) подрешетки, высказывалось мнение (на основании анализа

методом дифференциальной геометрии) и в работе [20].

Таким образом, можно полагать, что в титане и сплавах на его основе при нагреве и переходе через точку начала полиморфного превращения возникает аномальное пересыщение вакансиями их ОЦК-модификации. Устойчивость такого двухкомпонентного твердого раствора (атомы металла — вакансии) в определенном температурно-временном интервале может быть обусловлена упорядоченным распределением вакансий.

Известно [21], что ОЦК-решетка титана в высокотемпературном состоянии обладает смешанным типом межатомных связей. В ней на дальнодействующее металлическое взаимодействие с газом из коллективизированных *d*-, *s*-элементов происходит наложение короткодействующих валентных *p*-связей (рис. 1). Металлическое взаимодействие (с координационным числом K = 8) происходит по объемным диагоналям куба <111> (рис. 1, *а*), а ковалентные связи образуются вдоль его ребер <100> (K = 6) — см. рис. 1, *б*. Как было отмечено выше, в условиях вакансионного пересыщения ОЦК-решетки наиболее устойчивыми и энергетически выгодными конфигурациями являются тетравакансии, которые связаны с центральным атомом под углом 109,5°. Вероятно, в такой ситуации изменяется электронное взаимодействие между соседними атомами титана (рис. 1, *в*), который располагаясь в четвертой группе таблицы Д.И.Менделеева, наряду с углеродом и кремнием, может формировать алмазоподобную решетку и образовывать $s{\cdot}p^3$ гибридные орбитали вдоль <111> с координационным числом K = 4 [22].

Такая конфигурация связей типа алмаза — энергетически выгодная [23, 24]. Вакансионно пересыщенный и упорядоченной пространственно, состоящей из 8 элементарных ОЦК-ячеек (рис. 2, *а*) может быть суперпозиция двух кристаллических подрешеток, вставленных одна в другую: металлической (рис. 2, *б*), образующей решетку алмаза с параметром $a_{алмаз} = 2a_{\beta}$, и вакансионной (рис. 2, *в*) с ω(ГПУ)-решеткой ($a_{\omega} = \sqrt{2}\, a_{\beta}$, $c_{\omega} = (\sqrt{3}/2)a_{\beta}$).

Таким образом, алмазоподобное состояние можно рассматривать как кристаллогеометрический способ упрочнения металлов с метастабильной ОЦК-решеткой в условиях температурно-временного вакансионного пересыщения за счет усиления ковалентных связей вдоль <111> диагоналей куба.

Существование температурно-временного пересыщения вакансиями высокотемпературной ОЦК-модификации позволяет понять до сих пор дискуссионную [12] причину отклонения от закона Аррениуса их коэффициентов самодиффузии (*D*). Для титана, например, *D* аномально увеличивается в интервале температур 900–1200 °С. В предположении, что вакансии являются второй компонентой в твердом растворе на основе титана, становится понятным, почему полиморфное α→β-превращение, даже в чистом титане, протекает не при постоянной температуре, а в интервале температур [6, 13].

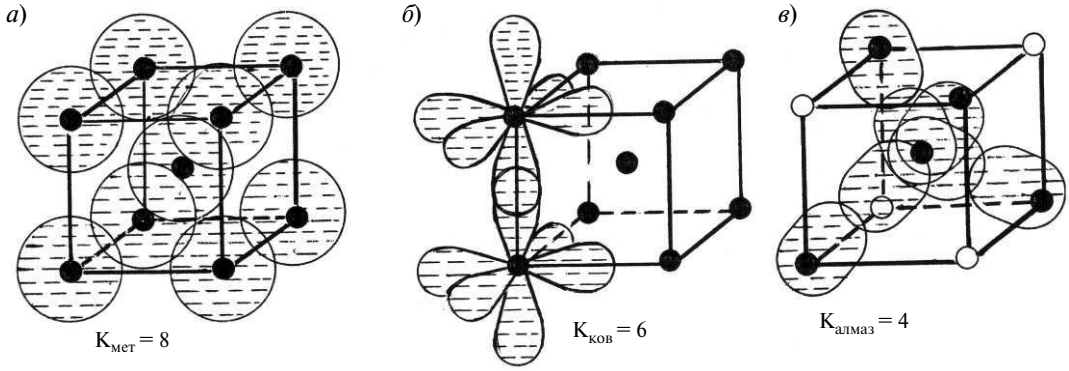


Рис. 1. Металлическое (*а*), ковалентное (*б*) и гибридное (*в*) межатомное электронное взаимодействие в ОЦК-кристаллической решетке в нормальном (*а*, *б*) и вакансионно-пересыщенном (*в*) состояниях

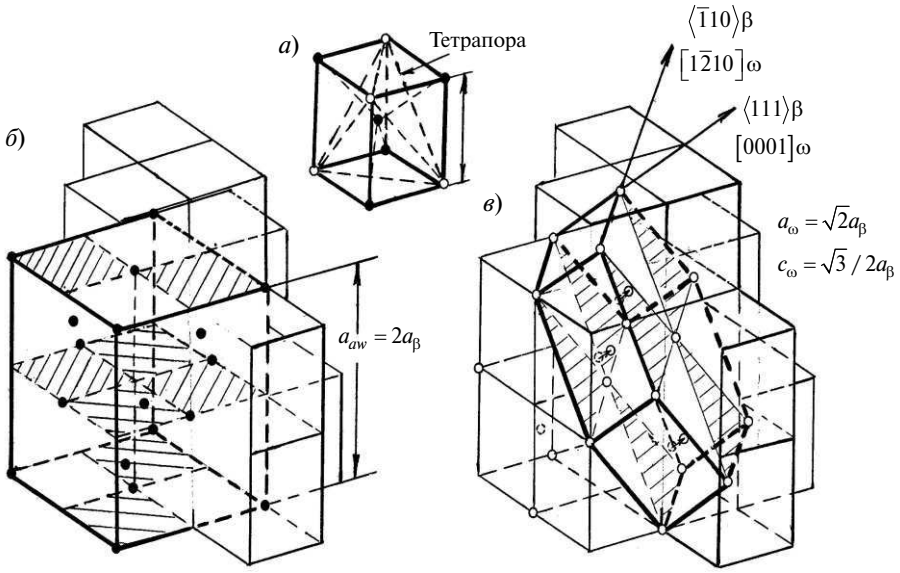


Рис. 2. Вакансионно-пересыщенная и упорядоченная ОЦК-решетка (*а*) как суперпозиция двух кристаллических подрешеток, вставленных одна в другую: металлической (*б*), образующей решетку алмаза, и вакансионной (*в*) с ω-решеткой

В чистых металлах и твердых растворах замещения известны [25] два возможных диффузионных механизма возвращения системы к термодинамическому равновесию — по-Френкелю и по-Киркендаллу. Эффект Френкеля предполагает конденсацию избыточных вакансий — образование одномерных, двухмерных или трехмерных вакансионных комплексов, приводящих к «распуханию» объема металла (например, в сплавах титана — $\beta_{перес}$-твердого раствора). Эффект Киркендалла предполагает встречное перераспределение дислоцированных атомов и вакансий при сохранении объема системы в целом. Поток дислоцированных атомов обычно направлен в сторону растущей фазовой составляющей.

Фаза $\beta_{перес}$, зародившись из α-фазы по сдвиговому механизму [26] и оказавшись в условиях сильного вакансионного пересыщения, претерпевает «распухание», уменьшающее разность удельных объемов фаз (объемную дилатацию) в точке полиморфного превращения, которая по литературным данным составляет только 0,17 %. Нагрев такого $\beta_{перес}$-твердого раствора не сопровождается фазовым наклепом, что объясняет трудность измельчения зерна титана и его сплавов при нагреве путем фазовой перекристаллизации.

Такой метастабильный, пересыщенный вакансиями ОЦК-твердый раствор, вероятно, стремится перейти в более равновесное состояние по механизму многостадийного распада [27] от образования вакансионных сегрегатов, зон типа Гинье — Престона — Багаряцкого, до появления когерентных с металлической матрицей вакансионных предвыделений с ω(ГПУ)-решеткой и далее перераспределение на вакантные места дислоцированных атомов, т. е. «схлопывание» металлической и вакансионной подрешеток. Очевидно, $\beta_{перес}$-твердый раствор будет иметь наибольшее «распухание» в ω-состоянии и наименьшее — после схлопывания двух подрешеток. Заключительной стадией превращения $\beta_{перес} \rightarrow \rightarrow \beta_р$ является гомогенное распределение атомов и вакансий в уже равновесной ОЦК-решетке.

Многостадийность α→β-превращения и существование ω-состояния β-фазы в условиях температурно-временного ее вакансионного пересыщения подтверждают экспериментальные результаты, до сих пор не нашедшие достаточно полного объяснения. Так, в работе [13] обращается внимание, что по литературным данным даже для чистого титана температурный интервал α→β-превращения (ΔT) колеблется в широких пределах от 30 до 200 °С, а изменение величины удельного объема фазового превращения ($\Delta V/V$) колеблется в пределах от 0,09 до 0,24 %. Причем уменьшение ΔV происходит после длительного (десятичасового) высокотемпе-

ратурного β-отжига в вакууме ($5 \cdot 10^{-4}$ Па) [13]. Как показано в работе [28] по результатам исследования высокотемпературного внутреннего трения технически чистого титана ВТ1–0, ВТ-00, при нагреве и охлаждении возникает гистерезис амплитудной зависимости внутреннего трения (δ). Отжиги при температурах выше $T_{пп}$ снижают величину δ. В работе [12] при нагреве был замечен пик внутреннего трения в высокотемпературном состоянии ОЦК-урана, который исчезал после выдержки длительностью 0,5 ч при температуре выше $T_{пп}$. Рассмотренные выше кинетические изменения физических параметров можно интерпретировать как снятие со временем вакансионного пересыщения и формирование высокотемпературной равновесной $\beta_р$-фазы.

Исследование свойств высокотемпературного вакансионно-пересыщенного ОЦК-твердого раствора

Известно, что вакансии бывают тепловой и деформационной природы. Поэтому можно ожидать проявление эффекта кристаллогеометрического упрочнения во время проведения высокотемпературных испытаний металлов в ОЦК-состоянии. На рис. 3 представлены температурные зависимости механических свойств двух чистых полиморфных металлов – железа и титана [14].

Следует отметить принципиальное различие в поведении металлов вблизи температур их полиморфного превращения в условиях термодинамической нестабильности: пластифицирование в титане и охрупчивание в железе. Во время испытания в чистом металле α-Fe с ОЦК-кристаллической решеткой кристаллогеометрическое ее упрочнение, вероятно, протекает накануне полиморфного α→γ-превращения начиная с 800 °С вплоть до $T_{пп}$ (911 °С). В ГЦК-состоянии в γ-Fe снимается вакансионное пересыщение и наступает релаксационное разупрочнение. В чистом α-Ti с ГПУ-решеткой перед полиморфным α→β-превращением начиная с 500 °С развивается свойственное ему тепловое разупрочнение [29] вплоть до $T_{пп}$ (882 °С). Уже первые порции $\beta_{перес}$-фазы с ОЦК-решеткой оказываются в условиях вакансионного пересыщения, что способствует кристаллогеометрическому ее упрочнению (формированию алмазоподобной решетки) и торможению теплового разупрочнения.

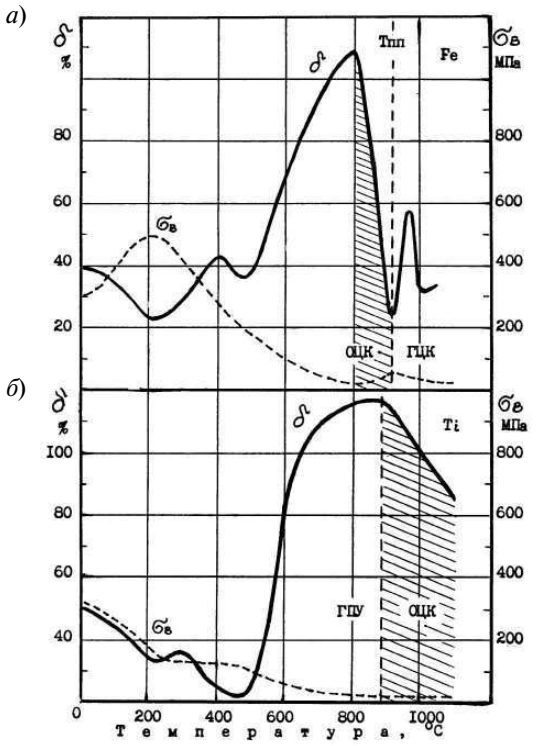


Рис. 3. Температурные зависимости относительного удлинения и предела прочности железа (*а*) и титана (*б*)

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы.

1. Установлена причина трудности измельчения зерен при нагреве полиморфного титана и его сплавов путем фазовой перекристаллизации. Причина заключается в температурно-временном вакансионном пересыщении и «распухании» высокотемпературной β-фазы, позволяющих *сохранить* сокращающийся при нагреве в точке полиморфного превращения удельный объем элементарной ОЦК-ячейки, который по литературным данным снижается только на 0,17 %. В результате нагрев негомогенных β-твердых растворов не сопровождается фазовым наклепом и измельчением.

2. Построена кристаллогеометрическая модель высокотемпературного вакансионно-пересыщенного состояния ОЦК-твердого раствора, формирующегося в результате полиморфного превращения при нагреве из плотноупакованной ГПУ-модификации.

3. Установлено, что в период нагрева титана и его сплавов прямое полиморфное $\alpha \rightarrow \beta$-превращение начинается по сдвиговому механизму. При этом высокотемпературная ОЦК-фаза, наследуя точечные дефекты низкотемпературной плотноупакованной ГПУ-модификации, оказывается вакансионно-пересыщенным β-твердым раствором ($\alpha \rightarrow \beta_{перес.}$). Полное завершение полиморфного превращения и переход $\beta_{перес}$ в равновесное состояние ($\beta_{перес} \rightarrow \beta_р$) протекает по диффузионному многостадийному механизму распада от образования зон типа Гинье — Престона — Багаряцкого до появления когерентных с металлической матрицей вакансионных предвыделений, обладающих ω-решеткой, «схлопывания» металлической и вакансионной подрешеток и формирования равновесного ОЦК-твердого раствора.

4. Экспериментально установлено, что чистые полиморфные металлы на основе титана и железа в ОЦК-состоянии вблизи температур их полиморфного превращения претерпевают упрочнение и снижение пластичности в результате формирования вакансионно-пересыщенной и упорядоченной высокотемпературной их β-модификации.

5. Высокотемпературная вакансионно-пересыщенная ОЦК-модификация плотноупакованных при комнатной температуре ГПУ-металлов Ti, Zr, Hf временно стабилизируется за счет большей энтропии, чему способствует упорядочение в расположении атомов и точечных дефектов, а также снижение координационного числа в их кристаллической решетке. С этой точки зрения вакансионное упорядочение в высокотемпературной β-модификации (ω-состояние) и формирование алмазоподобной структуры из атомов основы с координационным числом K = 4 в металлах четвертой группы таблицы Д.И.Менделеева является одним из способов ее кристаллогеометрического упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Френкель, И.Я.** Кинетическая теория жидкостей [Текст] / И.Я. Френкель.— Л.: Наука, 1975.— 350 с.

2. **Ройтбурд, А.Л.** Особенности развития фазовых превращений в кристаллах [Текст] / А.Л. Ройтбурд // Проблемы современной кристаллографии.— М.: Мир, 1975.— С. 345–369.

3. **Кидин, И.Н.** Сдвиговый механизм полиморфного превращения при нагреве отожженного хромистого железа [Текст] / И.Н. Кидин, М.А. Штремель, В.И. Лизунов // ФММ.— 1966. Т. 21, № 4.— С. 585–593.

4. **Ройтбурд, А.Л.** О структурно-кинетических фазах полиморфных превращений [Текст] / А.Л. Ройтбурд, Э.В. Сафонов, А.В. Шалимова // Проблемы металловедения и физики металлов.— 1976. № 3.— С. 316–318.

5. **Курдюмов, Г.В.** О закалке нелегированного безуглеродистого железа [Текст] / Г.В. Курдюмов, М.Д. Перкас // Докл. АН СССР, 1956. Т. 3, № 4.— С. 818–820.

6. **Борисова, Е.А.** Металлография титановых сплавов [Текст] / Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун [и др.].— М.: Металлургия, 1980.— 464 с.

7. **Носова, Г.И.** Фазовые превращения в титановых сплавах [Текст] / Г.И. Носова.— М.: Металлургия, 1968.— 181 с.

8. **Садовский, В.Д.** Исследование фазовой перекристаллизации титана [Текст] / В.Д. Садовский, Г.А. Богачева, Л.В. Смирнов [и др.] // ФММ.— 1960, Т.10, № 3.— С. 397–403.

9. **Липчин, А.Н.** Фазовые и структурные превращения в титане [Текст] / А.Н. Липчин, В.С. Томсинский, В.М. Половников // Научные труды Пермского политехнического института.— 1973. № 131.— С. 30–36.

10. **Томсинский, В.С.** Исследования закономерностей фазовых превращений при нагреве закаленных сплавов титана [Текст] / В.С. Томсинский // Изв. вузов. Цветная металлургия.— 1977. № 5.— С. 123–128.

11. **Багаряцкий, Ю.А.** Метастабильные фазы в сплавах титана с переходными элементами [Текст] / Ю.А. Багаряцкий, Т.В. Тагунова, Г.И. Носова // Труды ЦНИИ чер. мет.— 1958. № 5.— С. 15–18.

12. Диффузия в металлах с объемно-центрированной решеткой [Текст]: Сб. статей / Пер. с англ.— М.: Металлургия, 1969.— 416 с.

13. Теплофизические свойства титана и его сплавов [Текст]: Справочник.— М.: Металлургия, 1965.— 103 с.

14. **Чечулин, Б.Б.** Титановые сплавы в машиностроении [Текст] / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.И. Гольдфайн.— Л.: Машиностроение, 1977.— 248 с.

15. **Постников, В.С.** Физика и химия твердого состояния [Текст] / В.С. Постников.— М.: Металлургия, 1978.— 544 с.

16. **Штремель, М.А.** Прочность сплавов. Дефекты решетки [Текст] / М.А. Штремель.— М.: Металлургия, 1982.— 280 с.

17. **Лихачев, В.А.** Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации [Текст] / В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Заминчук [и др.].— Киев: Наукова думка, 1989.— 320 с.

18. **Панин, В.Е.** Атом-вакансионные состояния в кристаллах [Текст] / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, Ю.А. Хон [и др.] // Изв. вузов. Физика.— 1982, № 12.— С. 5–10.

19. Дефекты в закаленных металлах [Текст]: Сб. статей / Сокр. перев. с англ.— М.: Атомиздат, 1969.— 386 с.

20. **Гейченко, В.В.** Теория упорядочения в сплавах с объемноцентрированной кубической решеткой, в которых может возникать несколько сверхструктур [Текст] / В.В. Гейченко, В.М. Даниленко, А.А. Смирнов // ФММ.— 1962. Т. 38. Вып. 3.— С. 321–326.

21. **Петрунько, А.Н.** Титан в новой технике [Текст] / А.Н. Петрунько, Ю.Т. Олесов, В.А. Дрозденко.— М.: Металлургия, 1979. 169 с.

22. Устойчивость фаз в металлах и сплавах [Текст]: Сб. статей / Пер. с англ.— М.: Мир, 1970.— 407 с.

23. **Ван Флек, Л.** Теоретическое и практическое материаловедение [Текст] / Л. Ван Флек.— М. : Атомиздат, 1975.— 472 с.

24. **Бокий, Г.Б.** Кристаллохимия [Текст] / Г.Б. Бокий.— М.: Наука, 1971.— 400 с.

25. **Френкель, Я.И.** Введение в теорию металлов [Текст] / Я.И. Френкель.— М.: Наука, 1972.— 424 с.

26. **Ильин, А.А.** Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах [Текст] / А.А. Ильин.— М.: Наука, 1994.— 304 с.

27. **Скотникова, М.А.** Исследование и разработка путей повышения вязко-пластических свойств крупногабаритных изделий из сплавов титана [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / М.А. Скотникова / Л., ЛГТУ.— 1990, 317 с.

28. **Григорович, В.К.** К электронной теории сплавов на основе титана циркония и гафния [Текст] / В.К. Григорович // Диаграммы состояния металлических систем— М. : Наука, 1968.— С. 156–157.

29. **Рагозин, Ю.И.** Энергетический анализ разрушения металлов [Текст]: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Ю.И. Рагозин / ИМЕТ.— М., 1966.— 16 с.

УДК 66.546.3

В.А. Лунев, И.А. Шишов,
П.А. Глухов, А.А. Беляев

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТОГО ЛИСТА НА СТАНЕ 5000.

Часть 1: ТЕПЛОПОТЕРИ НА ОПЕРАЦИЯХ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПРОКАТКЕ

Постановка задачи. При разработке компьютерных программ расчета и оптимизации режимов обжатий для прокатных станов необходима информация об энергосиловых параметрах прокатки. За основу расчетов усилий и моментов принимают экспериментальные сведения о сопротивлении деформации, зависящем от степени, скорости деформации и температуры, $K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$. Эти зависимости могут быть получены с достаточно высокой точностью на современных испытательных комплексах, например с использованием термомеханического симулятора Gleeble-3800 [1]. Корректное использование данных о значениях $K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ для расчета силы прокатки может быть обеспечено только при достоверной информации о распределении температур по объему деформируемого тела и о геометрии очага деформации. Особенно важны эти сведения при прокатке толстого листа, поскольку для этого случая распределения температур и деформаций крайне неравномерны по сечению проката.

Во многих работах отмечается, что изменение температуры толстого листа и особенности геометрии очага деформации при прокатке существенно зависят от характеристик оборудования станов, например от параметров работы установки гидросбива окалины [2], поэтому автоматический перенос существующих формул для расчета температур и уширения с одного стана на другие практически невозможен.

В предлагаемой статье рассматривается задача получения алгебраических соотношений для расчета среднемассовой температуры толстого листа во взаимосвязи со временем процесса при транспортировке сляба от нагревательной печи к клети прокатного стана. Полученные соотношения должны быть пригодны для использования в online-режиме работы системы управления станом (режим работы с регулировкой технологических параметров непосредственно в ходе прокатки).

Экспериментальная часть. Задача решалась при помощи пакета конечно-элементного моделирования Deform-3D. Охлаждаемый сляб был разбит на более чем 150000 конечных элементов. При этом 20 элементов располагались по высоте сляба, 75 элементов — по ширине и 100 — по длине. Расчеты выполнены для стали 10Г2ФБ, теплофизические свойства которой представлены в [3]. Для правильного решения тепловой задачи и поиска распределения температуры по объему металла с использованием конечно-элементной программы необходимо задать граничные условия в виде полей температур сляба на различных его поверхностях. Замеры температур выполняли в производственных условиях при помощи заводских и переносных ручных пирометров. Массив экспериментальных данных по температурам поверхности металла обрабатывали статистически; затем полученные зависимости вносили в программу Deform-3D, которая выполняла расчеты распределения температуры по объему металла путем решения уравнения теплопроводности. Среднемассовую температуру сляба в сечении определяли при помощи встроенной в Deform-3D специальной подпрограммы. Всего была обработана информация по температуре 23 слябов толщиной 315 мм и 28 слябов толщиной 250 мм. Температуру печного пространства в момент выдачи металла определяли при помощи печной термопары, температуру верхней поверхности металла перед клетью — стационарным пирометром клети, температуры верхней и нижней поверхностей при кантовке сляба после гидросбива — ручными переносными пирометрами.

Начальный градиент температур сляба при выдаче из печи не учитывали, поскольку проведенные ранее промышленные замеры температур по толщине находящегося в печи сляба подвижными термопарами показывали разницу температур поверхностных и центральных слоев не более 10–15 °С. Тепловые потери исследовали по трем участкам — при транспортировке от печи до гидросбива, при гидросбиве, при транспортировке от гидросбива до прокатной клети. Зависимости поверхностной температуры искали как функцию времени.

Аппроксимирующие функции для температуры поверхности слябов при транспортировке и гидросбиве выбирали в соответствии с рекомендациями [2]. Статистические характеристики полученных регрессий (в частности, коэффициент детерминации r^2) свидетельствуют о линейной зависимости потерь поверхностной температуры от основных технологических параметров в исследуемых интервалах. Получены зависимости потерь температуры от времени транспортировки в градусах (°С):

на участке от печи до гидросбива для верхней поверхности сляба

$$\Delta T_{\text{изл в}} = -24{,}64 + 0{,}0022\left(\frac{T}{100}\right)^4 + 0{,}8963t, \quad (1)$$

где t — время транспортировки;

то же для нижней поверхности

$$\Delta T_{\text{изл н}} = \Delta T_{\text{изл в}} + 0{,}278\,t; \quad (2)$$

на участке гидросбива для верхней и нижней поверхностей

$$\Delta T_{\text{гс}} = 120 - 0{,}615(H - 250), \quad (3)$$

где H — толщина сляба;

на участке транспортировки от гидросбива до прокатной клети для верхней поверхности

$$\Delta T_{\text{в}} = 0{,}0183\,T + 0{,}562t; \quad (4)$$

для нижней поверхности

$$\Delta T_{\text{н}} = \Delta T_{\text{в}} + 0{,}278t. \quad (5)$$

Так, к примеру, за время транспортировки слябов от нагревательной печи до прокатной клети, равное 130 с, потери поверхностной температуры сляба составляют 227°С для верхней поверхности и 267 °С — для нижней. Более высокие потери на нижней поверхности сляба вызваны дополнительным захолаживанием при контакте с роликами рольганга.

Расчет распределения температур по объему сляба при помощи программы Deform-3D. Задавая температуру поверхности при помощи найденных зависимостей от времени, регулировали температурные потери путем задания поверхностного отрицательного теплового потока (*Heat Flux*). Поток подбирали до тех пор, пока средняя температура в заданной точке поверхности, полученная в результате расчета по программе *Deform-3D*, не совпадала с граничными температурами по всем поверхностям.

Распределение температуры по объему сляба после 153 секунд с момента выдачи из печи представлено на рис. 1. Видно, что сляб имеет массивное ядро, которое почти не теряет температуры при транспортировке металла к прокатной клети, и захоложенные приповерхностные слои, так называемые «корочки», температура которых значительно ниже по сравнению с ядром. Средние значения поверхностных температур, рассчитываемые программой *Deform*, составляют $T_{\text{в}} = 995\,°C$; $T_{\text{н}} = 963\,°C$. Эти значения практически совпадают с поверхностными температурами, определенными при помощи соотношений (1)–(5).

Распределение температур по сечению сляба на различных стадиях подачи к прокатной клети представлено на рис. 2. На рисунке отчетливо видно наличие ядра и корочек и их изменение при подходе металла к клети — с течением времени температура ядра практически не изменяется, но толщина корочек возрастает. Это распределение

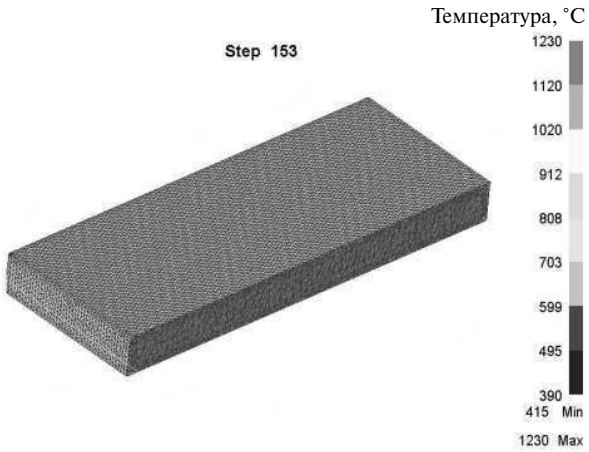


Рис. 1. Распределение температур по сечению сляба (разрез посередине длины сляба) толщиной 315 мм после транспортировки к гидросбиву в течение 153 с

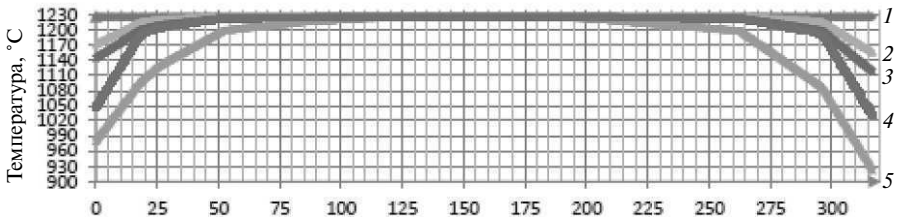


Рис. 2. Распределение температуры по толщине (0–315 м) сляба в различных сечениях на различных стадиях подачи к прокатной клети:

1 — выдача слитка из нагревательной печи; *2* — при транспортировке к камере гидросбива; *3* — перед камерой гидросбива; *4* — после камеры гидросбива; *5* — перед началом прокатки

температур и его изменение в процессе черновой прокатки достаточно важны для процессов структурообразования и формирования свойств микролегированных сталей. Суть в том, что выделение карбонитридов ниобия и ванадия, зависящее от их концентрации и стимулированное пластической деформацией, происходит обычно при 910–950 °С [1]. Этот вид упрочнения вероятнее всего начнется в приповерхностных участках сляба, что может вызвать существенное увеличение сопротивления деформации и, естественно, возрастание энергосиловых параметров прокатки.

Важным результатом выполненных расчетов можно считать получение исходного поля температур сляба непосредственно перед прокаткой, которое будет начальным условием для расчета изменения температур сляба при черновой прокатке.

Взаимосвязь среднемассовой температуры сляба с температурой его поверхности. По рис. 1 видно, что наиболее захоложенными местами являются кромки и торцы сляба. В момент захвата металла валками на захоложенных торцах и кромках возникают наибольшие усилия прокатки, поэтому информация о распределении среднемассовой температуры по длине и ширине листа необходима для оценки пиковых значений энергосиловых параметров.

Для оценки распределения температуры по объему металла анализировали температуры в девяти сечениях по длине и ширине сляба: по длине рассматривали передний конец, среднюю часть полосы и хвостовую; по ширине — среднюю часть и кромки. Все периферийные сечения принимали на расстоянии 100 мм от края сляба.

На рис. 3, *а–в* представлены графики изменения среднемассовой температуры начиная от выдачи из печи и до начала прокатки во взаимосвязи со временем для передней и средней частей сляба 315 мм. Видно, что на переднем конце полосы среднемассовая температура сляба понижается на 177 °С, а средней части — на 50 °С. По графикам на рис. 3 также видно, что зависимость падения среднемассовой температуры с течением времени при транспортировке сляба к прокатной клети можно считать линейной. Наряду с расчетными зависимостями среднемассовой температуры от времени, полученными расчетным путем при помощи программы *Deform-3D*, показаны линейные аппроксимации, которые для отдельных стадий перемещения металла от печи до прокатной клети имеют вид (для всех зависимостей T_0 — начальная среднемассовая температура операции):

на участке от печи до гидросбива для средней части сляба

$$\Delta T = -0{,}1626\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}9996; \qquad (6)$$

$$\Delta T = -0{,}4303\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}9985; \qquad (7)$$

то же для передней части сляба;

на участке гидросбива окалины для средней части сляба

$$\Delta T = -0{,}9601\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}9999, \qquad (8)$$

$$\Delta T = -5{,}1482\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}8683; \qquad (9)$$

а для передней части сляба на участке транспортировки от гидросбива до прокатной клети для средней части сляба

$$\Delta T = -0{,}3154\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}997, \qquad (10)$$

то же для передней части сляба

$$\Delta T = -1{,}1586\, t + T_0;\ r^2 = 0{,}9912. \qquad (11)$$

Проверка адекватности полученных моделей. Сложность проверки адекватности полученных моделей заключалась в невозможности прямых

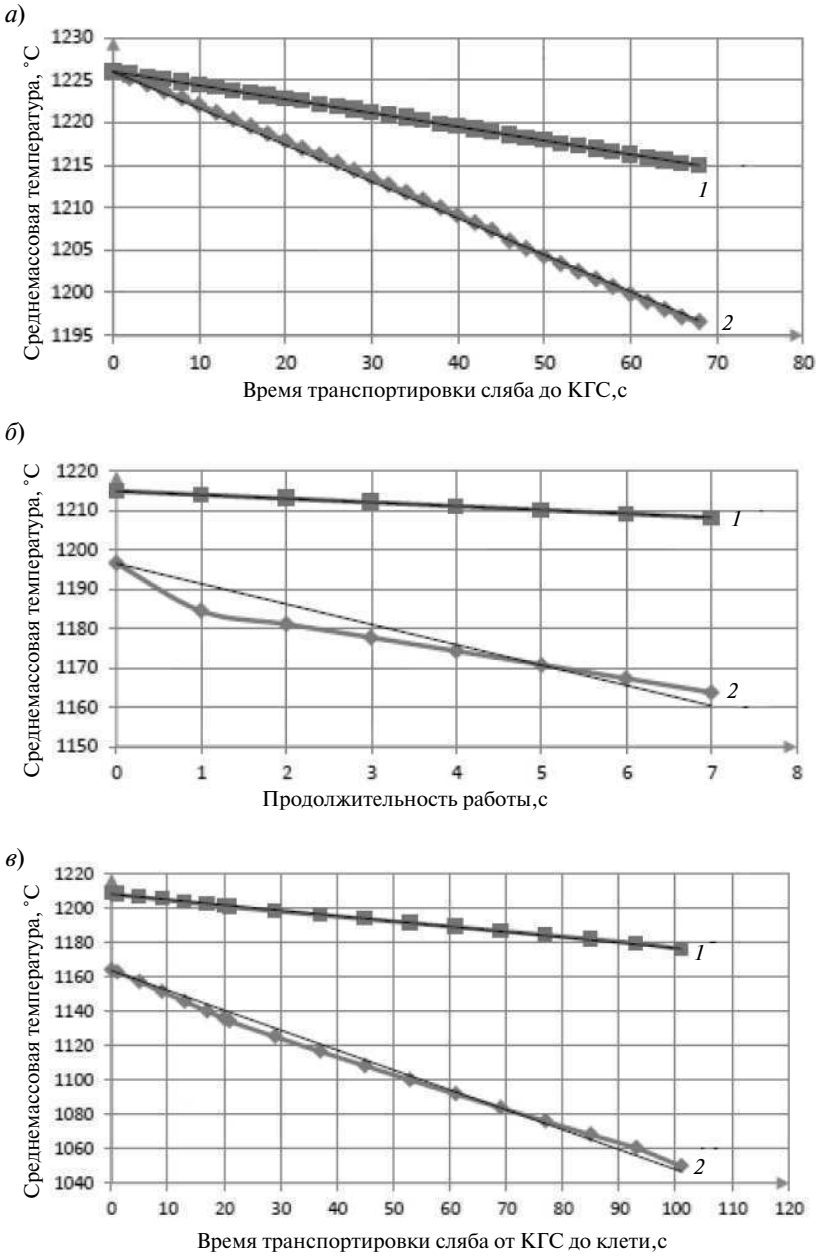


Рис. 3. Зависимости изменения среднемассовой температуры от времени при подаче сляба от нагревательной печи до прокатной клети по участкам:

а — от печи до камеры гидросбива; *б* — в камере гидросбива; *в* — от камеры гидросбива до прокатной клети; *1* — средняя часть сляба; *2* — передняя часть

замеров среднемассовой температуры для сравнения расчетных и экспериментальных данных. Среднемассовую температуру оценивали косвенным путем на основании зависимости от нее сопротивления деформации металла и, как следствие, усилия прокатки. Рассчитанную по зависимостям (6)–(11) конечную среднемассовую температуру сляба после прохождения им предварительных операций использовали для расчета усилия прокатки в первом, черновом, проходе. В этом случае совпадение расчетного и экспериментального значения усилий прокатки в первом проходе будет говорить об адекватности полученных моделей.

Для анализа черновой прокатки в пакете *Deform-3D* была создана конечноэлементная модель (рис. 4), в которую были заложены реальные геометрические, временные, температурные, скоростные и деформационные параметры процесса черновой прокатки. Модель сляба — пластичное тело, свойства которого задавали кривыми пластического течения, полученными экспериментально на комплексе Gleeble—3800 для стали марки 10Г2ФБ [4]. Также в модель закладывали упругие характеристики и теплофизические свойства данной стали, взятые по справочным данным [2]. Модель калибровали по температуре (за счет подбора соответствующих коэффициентов теплоотдачи и теплопотоков) так, чтобы поверхностные температуры в контрольных точках совпадали с показаниями пирометров.

Усилие прокатки в первом пропуске для слябов различной толщины, имеющих различные температуры выдачи и времена предварительных операций, рассчитывали с помощью стандартной подпрограммы пакета *Deform-3D*, позволяющей строить графики усилия прокатки в зависимости от времени (рис. 5).

На рис. 5 хорошо видны пиковые усилия, возникающие при прокатке захоложенных торцов в моменты захвата и выброса. Полученные графики усредняли по методике, используемой технологами стана, а именно учитывали только усилие установившегося процесса прокатки. Полученные средние значения усилий (21980 кН на верхнем валке, 21560 кН на нижнем валке) хорошо согласуются с непосредственно измеренным значением усилия 21780 кН.

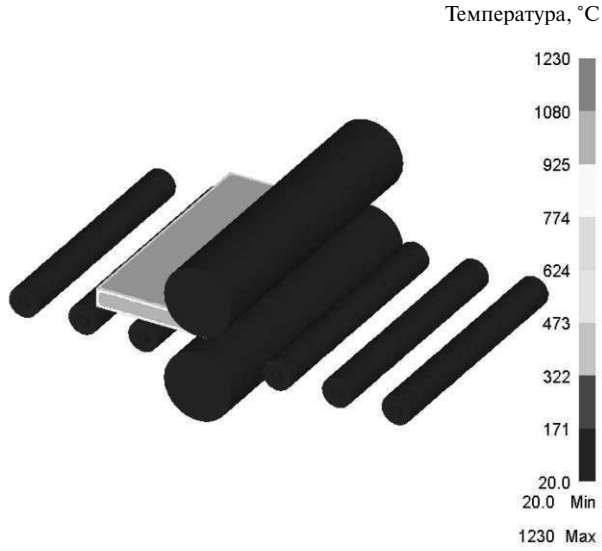


Рис. 4. Конечноэлементная модель процесса прокатки на стане 5000 ОАО «Северсталь»

Основной недостаток расчета усилий при помощи *Deform-3D* — невозможность его применения в системе автоматического управления станом из-за большого времени расчета (4–6 часов для одного прохода при использовании вычислительного сервера с двумя 6-ядерными процессорами CPU Intel E 5645 2400 ГГц), поскольку расчет всего цикла прокатки должен занимать не более 2 секунд. Поэтому для расчета усилия прокатки использовали также методику, изложенную в [4], способную обеспечить требуемое быстродействие. В этой методике для определения усилия прокатки используются соотношения:

для усилия прокатки

$$P_{\text{пр}} = p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} l, \qquad (12)$$

где площадь контактной площадки $F_{\text{к}} = b_{\text{ср}} l$ вычисляется как произведение средней ширины очага $b_{\text{ср}} = 0{,}5(b_0 + b_1)$ и длины дуги захвата $l = \sqrt{R\Delta h}$;

для среднего давления металла на валки

$$p_{\text{ср}} = n_{\text{з}} n_{\sigma} K, \text{ кН/м}^2, \qquad (13)$$

где K — сопротивление металла деформации, МПа; $n_{\text{з}}$ и n_{σ} — коэффициенты подпора и влияния трения, определяются в зависимости от формы очага деформации $l/h_{\text{ср}}$; для первого прохода можно принять $n_{\sigma} = 1$, поскольку очаг деформации — высокий [4], а $n_{\text{з}} = 2 - \sqrt{lh_{\text{сред}}}$.

Сопротивление металла деформации рассчитывали по методике [1], реализованной в виде программы *AusEvol*$^{+}$, созданной на основании обширной базы данных для микролегированных трубных сталей («химический состав — параметры обработки — структура — свойства»)*. Методика позволяет при известных значениях температуры, степени, скорости деформации и размере исходного зерна аустенита, найти сопротивление деформации. На рис. 6. показано сравнение рассчитанных по методике [1] и полученных экспериментально на комплексе

* Государственный контракт № 02.740.11.0822 на выполнение научно-исследовательских работ «Управление структурой и свойствами трубных микролегированных сталей при прокатке толстого листа с использованием методов физического и математического моде-лирования» (шифр заявки «2010-1.1-233-068-003»)

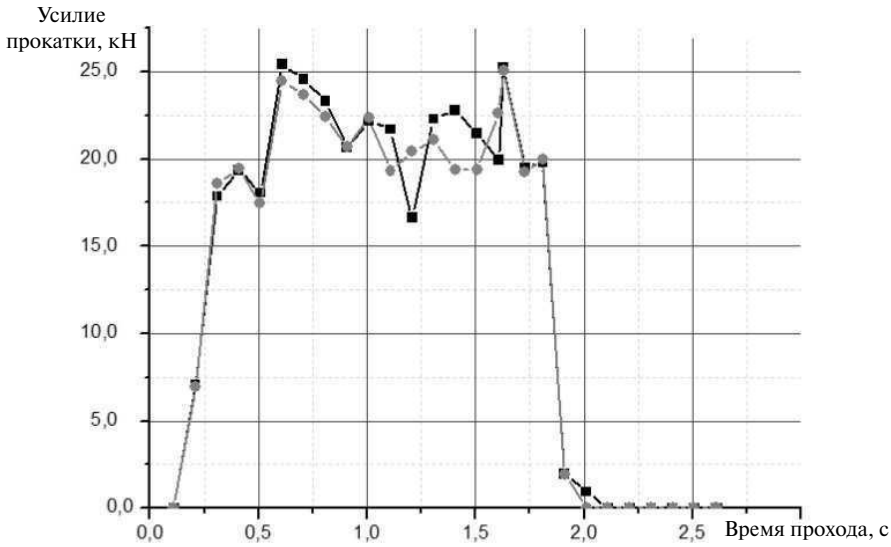


Рис. 5. Графики зависимости сил, действующих на валки стана в первом проходе при прокатке сляба толщиной h_0 = 250 мм, шириной b_0 = 1840 мм с абсолютным обжатием Δh = 26,9 мм: —■— — верхний валок; —●— — нижний валок

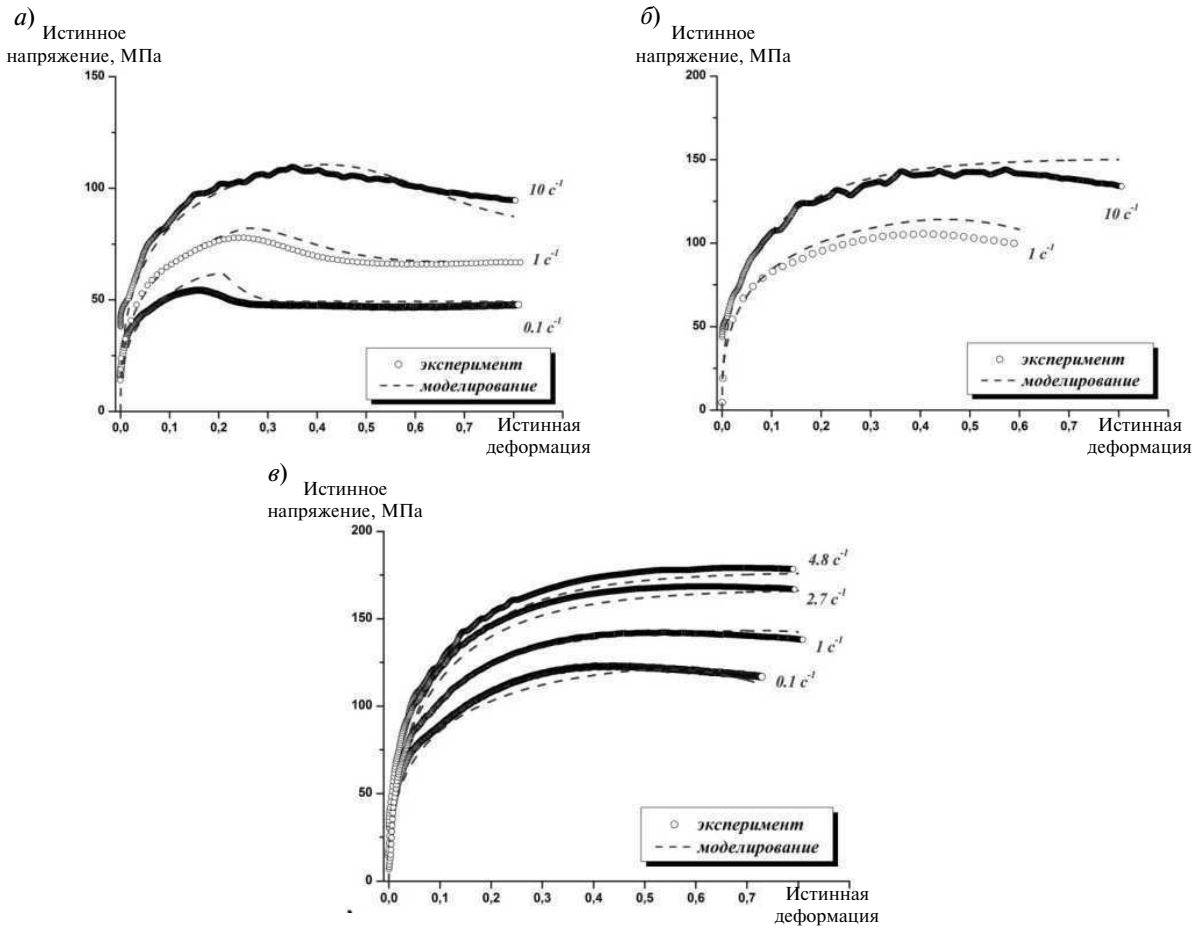


Рис. 6. Экспериментально измеренные на комплексе Gleeble — 3800 и рассчитанные по методике [1] кривые пластического течения при разных температурах: *а* — 1200 °С; *б* — 1100 °С;*в* — 1000 °С

Сравнение расчетных и фактических усилий прокатки

Толщина сляба, мм	$T_{выдачи}$, °C	Время транспортировки от печи до клети, с	Обжатие в первом проходе, мм	Исходная ширина сляба, мм	$T_{ср.расч.}$ перед клетью, °C	$P_{расч}$, кН	$P_{экспер}$, кН	Δ, %
250	1251	129	26,9	1840	1178	22900	21780	5
250	1214	168	33,5	1820	1168	29996	29597	1,3
313	1200	132	46,5	1850	1166	35380	33160	7
313	1200	128	46,8	1840	1165	36370	33310	9

Gleeble-3800 кривых пластического течения для микролегированной трубной стали, содержащей, %, 0,08 C, 0,2 Si, 1,47 Mn, 0,19 Mo, 0,042 Nb, 0,01 Ti, 0,064 V. По соотношениям (12), (13) определяли усилие прокатки $P_{расч}$, которые сравнивали с экспериментальными значениями усилий $P_{эксп}$, непосредственно измеренными на стане (см. табл.). В качестве температуры металла, непосредственно находящегося в очаге деформации, условно принимали среднемассовую температуру сляба перед началом прохода.

По данным таблицы видно, что ошибка расчета усилия прокатки не превышает 9 %. Следовательно, данная методика дает хороший результат и пригодна для встраивания в систему автоматического управления станом. Важным результатом также является возможность оценить среднемассовую температуру уже в процессе черновой и чистовой прокатки, решая обратную задачу — определение температуры на основании известных значений степени, скорости деформации и усилия прокатки. Решение обратной задачи дает возможность корректировки расчетной температуры непосредственно в процессе прокатки на основании усилия прокатки, измеренного в предыдущем проходе.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

Все потери поверхностных и среднемассовых температур на этапе предварительных операций в узком диапазоне параметров, характерных непосредственно для стана-5000, хорошо описываются простыми линейными зависимостями, пригодными для встраивания в систему автоматического управления станом с online-режимом работы.

Сляб остается толстым (в теплофизическом плане) телом на протяжении всех технологических операций его транспортировки от нагревательной печи до прокатной клети. Для него характерно наличие небольших захоложенных поверхностных корочек и массивного равномерно нагретого ядра, обладающего высокой инертностью, слабо реагирующего на внешние тепловые возмущения.

Используя значения среднемассовой температуры, рассчитанные по предложенным выражениям, можно достоверно определить усилие прокатки в первом черновом проходе. Вычисленную температуру можно использовать в качестве начального условия расчета циклов черновой и чистовой прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rudskoy, A.** Experimental Investigation and Modeling of Austenite Microstructure Evolution Processes Occurring in Line-pipe Steels under Hot Rolling [Текст] / A. Rudskoy, A. Vasilyev, N. Kolbasnikov, S. Sokolov, D. Sokolov // HUTNAD.— Spolka.— 2011. Vol. 78.— № 5.— P. 344–475.

2. **Коновалов, Ю.В.** Расчет параметров листовой прокатки [Текст]: Справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев.— М.: Металлургия, 1986.

3. Марочник сталей и сплавов [Текст]: Справочник / Ред. В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина.— М.: Машиностроение, 1989.— 640 с.

4. **Рудской, А.И.** Теория и технология прокатного производства [Текст] / А.И. Рудской, В.А. Лунев.— СПб.: Наука, 2008.— 527 с.

54.057; 54-162; 669-1

Т.С. Кольцова, А.Г. Насибулин,
Е.С. Васильева, В.В. Егоров

СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА МЕДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ

Углеродные наноструктуры имеют широчайшее многообразие их морфологических форм. Графеновые слои в них могут быть расположены перпендикулярно оси волокна, под углом к ней или параллельно [1]. В случае газофазного синтеза существование такого разнообразия форм углеродных структур имеет несколько вариантов объяснения, в числе которых: различная морфология поверхности наночастиц металла-катализатора [2]; кристаллографические особенности строения частиц [3]; содержание водорода в газовой фазе, влияющее на скорость роста углеродных наноструктур [4–6].

Как известно из научной литературы [5, 7], водород тормозит дезактивацию катализатора. При увеличении содержания водорода до определенного уровня эффект его воздействия преобладает над эффектом снижения количества непосредственного источника углерода — углеводорода. При дальнейшем увеличении содержания водорода ситуация меняется, и количество углеродных наноструктур резко уменьшается, так как согласно принципу Ле-Шателье равновесие реакции разложения углеводорода при добавлении в систему водорода сдвигается в сторону образования исходного углеводорода:

$$C_nH_m \leftrightarrow 0{,}5mH_2 + nC.$$

Кроме того, водород способен гидрировать карбиды металлов с образованием легких углеводородов. Благодаря этому свойству он также влияет и на образование углерода. Увеличение количества водорода снижает начальную скорость роста углеродных структур.

В случае использования CO в качестве углеродсодержащего газа в отсутствие водорода углерод отлагается преимущественно с образованием углеродных нанотрубок и углеродных пленок, у которых нет насыщенных связей на торцевых гранях. При разбавлении CO водородом образуются многостенные углеродные нанотрубки с коаксиально-коническим расположением плоскостей или углеродные нановолокна (УНВ) с «бамбуковым» строением. Таким образом, угол наклона конусов графита зависит от количества водорода в реакционной смеси [4].

В работах, посвященных использованию углеводородов (CH_4, C_2H_2, C_2H_4) для синтеза углеродных нанотрубок, влияние водорода описывается с точностью до наоборот: с уменьшением содержания углерода в газовой фазе, с одной стороны, уменьшается выход продукта, а с другой, улучшается его качество [5, 8, 9]. Это также зависит от материала катализатора и используемого углеродсодержащего газа.

Если зауглероживание происходит в среде чистого или разбавленного инертным газом углеводорода, то создаются благоприятные условия для возникновения зародышей фазы графита, блокирующей поверхность металла и вызывающей быструю дезактивацию катализатора. Значительное (в сотни раз) разбавление углеводорода водородом приводит к увеличению индукционного периода до нескольких часов [10].

В предшествующих работах [11–13] нами была показана возможность газофазного синтеза углеродных нановолокон из смесей этилен — водород и ацетилен — водород с использованием меди в качестве катализатора. Поэтому целью данной работы было изучение структуры и морфологии углеродных нановолокон, синтезированных на поверхности медных частиц, при изменении соотношения «водород : этилен» в газовой фазе.

Материалы и методика эксперимента

Углеродные наноструктуры на медных наночастицах были получены методом газофазного синтеза при температуре 940 °C с использованием этилена в качестве источника углерода. Соотношения C:H в этилен-водородной смеси составили 1:8; 1:9,5 и 1:11,5. Общий расход газов

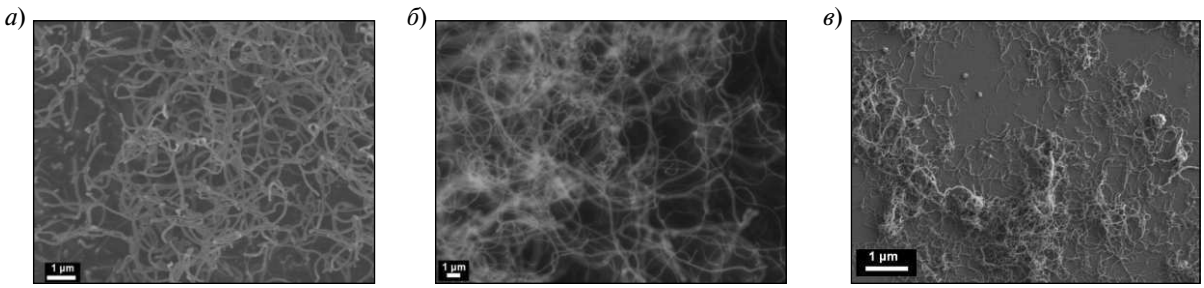


Рис. 1. СЭМ-изображения углеродных наноструктур, синтезированных при соотношениях C:H, равных 1:8 (*а*), 1:9,5 (*б*) и 11,5 (*в*)

составил около 400 см^3/мин, время синтеза — 20 мин.

Для исследования влияния соотношения углерод : водород в газовой фазе были проведены эксперименты по синтезу углеродных наноструктур на поверхности наночастиц меди со средним размером 80–100 нм.

Наночастицы были получены методом импульсного лазерного напыления на кремниевую подложку (параметры: 250 импульсов, частота 25 Гц, температура 700 °C). Электронно-микроскопические исследования проводились с помощью растрового (Leo DSM 982 Gemini и JEOL JSM-7500F) и просвечивающего электронного микроскопа (Philips CM200 FEG).

Результаты эксперимента

Как видно из рис. 1, при увеличении содержания водорода в газовой смеси диаметр углеродных структур несколько уменьшается. При соотношениях C:H, равных 1:8 и 1:9,5, средний диаметр УНВ составляет соответственно 90 и 75 нм. На СЭМ-изображении образца, синтезированного при соотношении 1:11,5, видно значительное уменьшение количества продукта, углеродное волокно, представленное на рис. 1, *в*, имеет диаметр 45 нм.

Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на малых увеличениях показано, что синтезированный углеродный продукт представляет собой графеновые слои (подобные были получены при синтезе на микронных частицах [11]) и углеродные нановолокна (рис. 2). Можно предположить, что медные частицы вместе с кварцевой подложкой сначала покрываются графеновыми слоями, а далее уже идет рост УНВ.

Адгезия углеродных структур с медью, по всей видимости, невелика, о чем свидетельтвует присутствие волокон, «оторванных» от медных частиц (рис. 3); можно предположить корневой механизм роста УНВ.

При более крупных увеличениях видно, что при большем содержании углерода в газовой фазе значительные изменения происходят именно на внешней стороне волокна (рис. 4).

Структура УНВ имеет две области: центральную, которая представляет собой графеноподобные слои, находящиеся под углом к оси симметрии, и «переферийную», углеродные

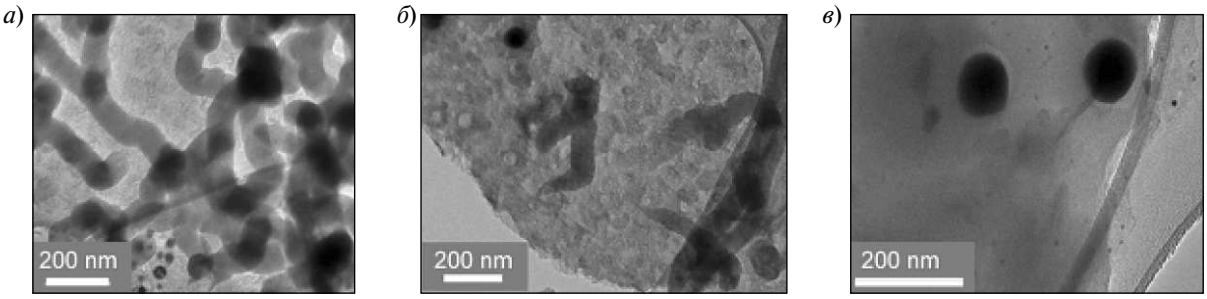


Рис. 2. ПЭМ-изображения при малых увеличениях углеродного продукта, синтезированного при 940 °C в течение 20 мин. Соотношения C:H равны 1:8 (*а*), 1:9,5 (*б*) и 1:11,5 (*в*)

слои в которой расположены параллельно к оси волокна.

Большее содержание углерода в газовой фазе приводит к образованию большего количества «перефирийных» слоев (как это видно на рис. 4).

Диаметр центральной зоны (в которой графеновые слои расположены под углом) составляет 45–50 нм в обоих случаях, в то время как диаметр волокна зависит от количества «периферийных» слоев, которые, по-видимому, «достраиваются» к волокну из газовой фазы.

Дальнейшее уменьшение содержания углерода в газовой фазе приводит к получению в основном графеновых слоев с небольшим количеством углеродных волокон и значительно меньшего числа графеновых слоев и центральной зоной в 20 нм (рис. 5).

Помимо количества «переферийных» углеродных слоев, количество углерода в газовой фазе в значительной степени определяет «центральную» структуру УНВ.

При соотношении C:H = 1:8 угол между углеродными слоями составляет 90 °.

Средний диаметр волокна, как было указано ранее, составил 90 нм. Как видим (рис. 6, *а*), в центре имеются пустоты, структура волокна представляет собой нечто среднее между «бамбуковым» волокном и «стопкой чашек» [1].

Увеличение соотношения углерод : водород до 1:9,5 приводит к уменьшению угла между графеновыми слоями до 70° (рис. 6, *б*). При этом

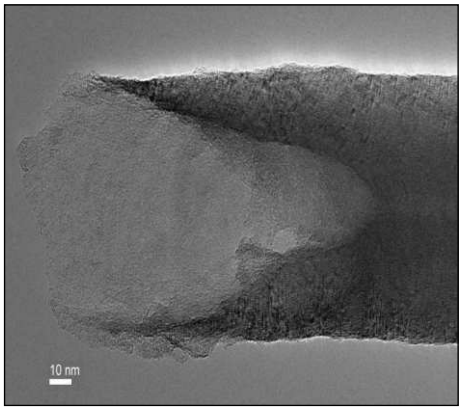
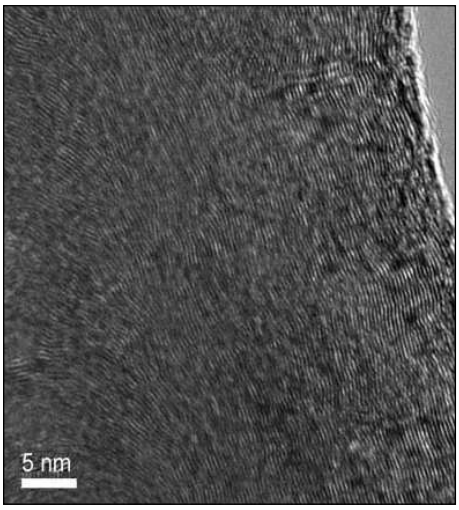


Рис. 3. ПЭМ-изображение «хвоста» углеродного нановолокна, оторвавшегося от каталитической частицы

волокно имеет более четкую «бамбуковую» структуру. Уменьшение содержания этилена в газовой фазе привело к снижению количества углеродного продукта за счет уменьшения количества «периферийных» углеродных слоев, располагающихся параллельно оси волокна. При понижении соотношения C:H до 1:11,5 наблюдается покрытие поверхности медных частиц и кварцевой подложки слоем углерода толщиной до десятка графеновых слоев.

Рост нановолокон большого диаметра при этом подавляется, однако в образце наблюдается незначительное количество углеродных волокон с заметно меньшим числом слоев (рис. 6, *в*).

а)



б)

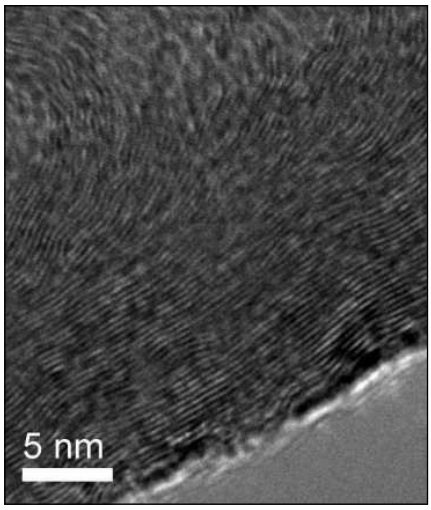


Рис. 4. ПЭМ-изображение структуры углеродного волокна, синтезированного при 940 °С в течение 20 мин. Соотношения C:H равны 1:8 (*а*); 1:9,5 (*б*)

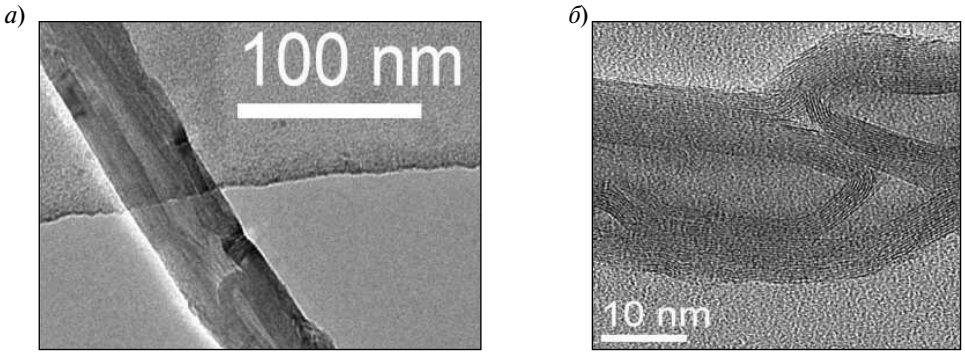


Рис. 5. ПЭМ-изображение структуры углеродного волокна, синтезированного при 940 °С, в течение 20 мин. Соотношение С:Н равно 1:11,5

Угол графеновых слоев уменьшается до 30°. Диаметр УНТ составляет 40–45 нм.

В связи с этим можно предложить следущий механизм проста углеродных структур на поверхности медных частиц. На первой стадии происходит восстановление оксида меди водородом. При введении этилена в систему происходит его разложение, при этом углерод, выделившийся на поверхности катализатора, покрывает его. В момент, когда происходит полное покрытие каталитической частицы углеродным слоем, графеновые слои «достраиваются» к выделившемся, образуя графены на подложке, и появляются центры кристаллизации графита на медной частице (рис. 7).

Согласно работам Чеснокова и Буянова [3, 14], рассматривающих рост углеродных наноструктур на медно-никелевом сплаве, образование зародышей графита должно происходить на гранях (111) из-за кристаллографического соответствия граней (111) ГЦК-решетки и плоскости (002) графита. Межплоскостное расстояние в направлении (111) составляет 0,208 нм (файл № 04–0836 картотеки ASTM). Наиболее близким по значению межплоскостного расстояния (а именно, 0,1808 нм) является направление (200). Согласно ПЭМ-изображению (рис. 8) расстояние между плоскостями медной частицы составило 0,200±0,01 нм, что ближе к данным по направлению (111).

Таким образом, можно считать, что в нашем случае (см. рис. 7) как раз наблюдаются углеродные плоскости (002), расположенные перпендикулярно граням меди (111).

После появления центров кристаллизации графита на гранях (111) начинается рост углеродных структур, сопровождающийся реконструкцией медной частицы. В этот период скорость выделения углерода возрастает и выходит на стационарный уровень. Форма кристалла металла существенно зависит от интенсивности выделения атомов углерода, их массопереноса и особенностей графитовой структуры [15]. Чем интенсивнее процесс, тем менее устойчива структура металлической частицы, в связи с чем возникает большое количество дефектов в струк-

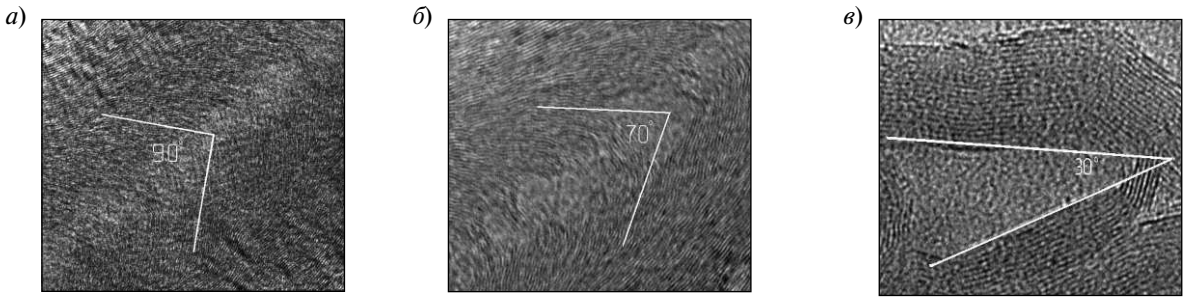


Рис. 6. ПЭМ-изображения углеродного продукта, синтезированного при 940 °С в течение 20 мин. Соотношения С:Н равны 1:8(*а*), 1:9,5 (*б*) и 1:11,5 (*в*)

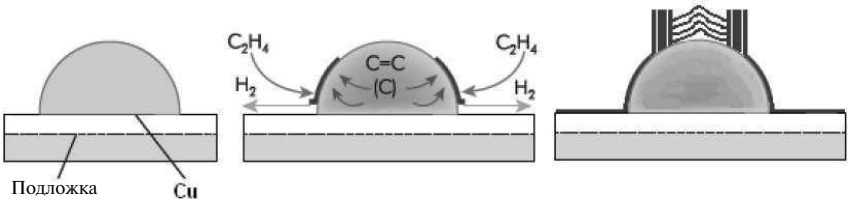


Рис. 7. Схема роста углеродных наноструктур на медном катализаторе

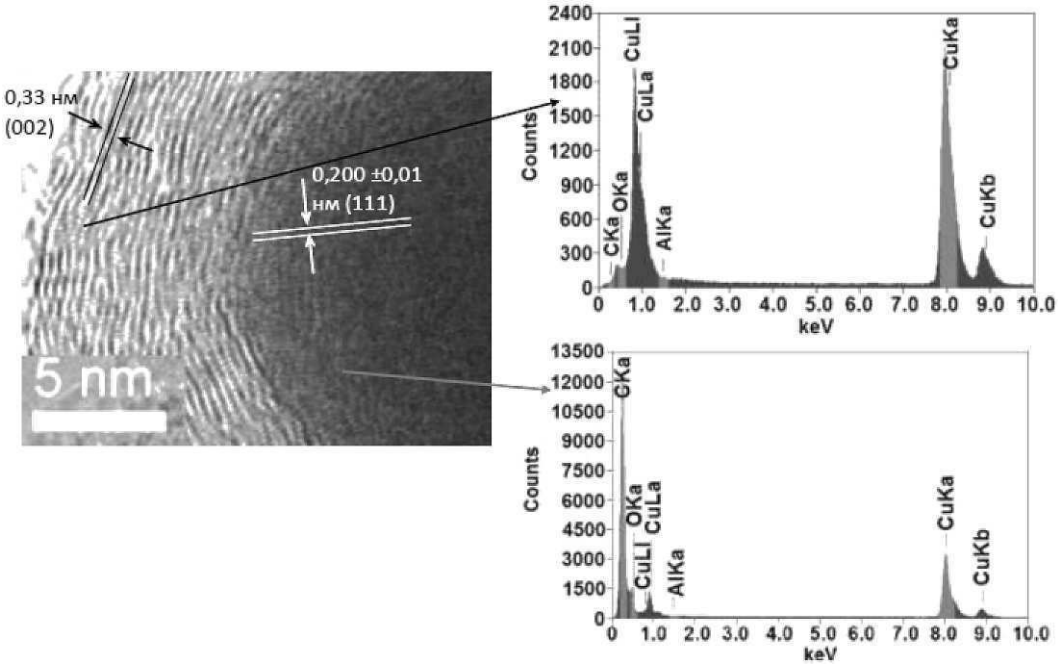


Рис. 8. ПЭМ-изображение и результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии медной частицы и УНВ, синтезированной на ней

туре медной частицы. Неравномерное поступление атомов углерода на поверхность частицы приводят к несовершенности и дефектности углеродных структур.

Таким образом, соотношение «углерод : водород» в газовой фазе значительно влияет на скорость роста углеродных структур. При использовании этилен-водородной смеси были проведены эксперименты по синтезу углеродных структур на медных наночастицах. Соотношения C:H равны 1:8 и 1:9,5 приводят к получению графеновых слоев и УНВ со средним диаметром соответственно 90 и 75 нм. При соотношении 1:11,5 продуктом являются графеновые слои и незначительное количество волокон с диаметром 40–45 нм.

При росте углеродных наноструктур на медном катализаторе образование зародышей графита должно происходить на гранях (111) из-за кристаллографического соответствия граней (111) ГЦК-решетки и плоскости (002) графита.

При малых количествах этилена процессы диффузии, выделения и роста углеродных структур в медной частице происходят с меньшей скоростью, тем самым как в структуре каталитической частицы, так и в углеродном продукте значительно снижается число дефектов и при этом количество продукта. В связи с чем при синтезе углеродных наноструктур необходимо определять компромиссный режим между качеством и количеством получаемого продукта.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Раков, Э.Г.** Нанотрубки и фуллерены [Текст]: Учебн. пособие / Э.Г. Раков.— М.: Университетская книга, Логос, 2006.— 376 с.

2. **Liao, X.Z.** Effect of catalyst composition on carbon nanotube growth [Текст] / X.Z. Liao, A. Serquis // Applied physics letters.— 2003. Vol. 82, № 16.

3. **Чесноков, В.В.** Образование углеродных нитей при каталитическом разложении углеводородов на металлах подгруппы железа и их сплавах [Текст] / В.В. Чесноков, Р.А. Буянов // Успехи химии.— 2000, Vol. 69 № 7.

4. **Nolan, P.E.** Carbon [Текст] / P.E. Nolan, M.J. Schabel, D.C. Lynch, A.H. Cutler.— 199 533, p. 79.

5. **Romero A.** Microporous and Mesoporous Materials.— 2008, № 110.— P. 318–329.

6. **Veríssimo, C.** / C. Veríssimo et al. J. Braz // Chem. Soc.— 2006, Vol.17, № . 6, 1124–1132,.

7. **Patil, K.C.** Combustion synthesis: an update [Текст] / K.C. Patil, S.T. Aruna, T. Mimani // Curr. Opinion in Solid State & Mater. Sci.— 2002, № 6.— P. 507.

8. S. Chaisitsak et al. / Diamond and Related Materials. 2004. Vol. 13. P. 438–444.

9. **Скичко, Е.А.** Экспериментальное исследование кинетических закономерностей синтеза углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом газовых смесей переменного состава / Е.А. Скичко, Д.А. Ломакин, Ю.В. Гаврилов, Э.М. Кольцова // Fundamental research.— 2012, № 3.

10. **Буянов, Р.А.** В кн. Гетерогенный катализ. Ч1. (Тр. IV Международн. симп.) 1979, С. 355

11. **Koltsova, T.S.** New Hybrid Copper Composite Materials Based on Carbon Nanostructures [Текст] / T.S. Koltsova [et al.] // Journal of Materials Science and Engineering Ser. B.— 2012, № 2 (4). P. 240–246.

12. **Nasibulina, L.I.** Direct Synthesis of Carbon Nanofibers on The Surface of Copper Powder [Текст] / L.I. Nasibulina, T.C. Koltsova, T. Joentakanen // Carbon.— 2010. Vol. 48. P. 4556–4577.

13. **Кольцова, Т.С.** Новые гибридные композиционные материалы «медь — углеродные нановолокна» [Текст] / Т.С. Кольцова, А.Г. Насибулин, О.В. Толочко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. (2010). № 4(90).

14. В.В. Чесноков, Р.А. Буянов // Мембраны, 2005, № 4 (28)

15. Р.А. Буянов, В.В. Чесноков // Химия в интересах устойчивого развития. 1997 № 5, с. 619.

УДК 621.757.002.52

Г.А. Алексеев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ

Одним из наиболее важных механических свойств металлических покрытий, на которых образуется прецизионный микрорельеф, является их твердость. От твердости, пластичности и структурной однородности пленок в значительной степени зависят оптические свойства дифракционных решеток — разрешающая способность, дисперсия, концентрирующие свойства, светорассеяние и т. д.

Измерения микротвердости при глубинах вдавливания менее 1 мкм необходимы для контроля механических свойств тонких покрытий. Но они встречают трудности, которые обусловлены: технологическим притуплением лезвия индентора; малыми размерами отпечатка, находящимися на грани разрешающей способности оптических средств измерений; малыми ($0{,}3\cdot10^{-4}$ –$0{,}5\cdot10^{-2}$ Н) усилиями вдавливания, соизмеримыми по величине с возмущающими воздействиями, возникающими вследствие вибраций основания прибора; инерционностью подвижных частей прибора, сложностью тарировки, а также микронеровностями поверхности, соизмеримыми с размерами отпечатка [1]. Анализ применения алмазных наконечников существующих форм показывает, что для измерения микротвердости при свехмалых глубинах вдавливания практическое значение имеют только биконический и бицилиндрический наконечники. Бицилиндрический индентор позволяет производить измерения в определенных условиях по специально разработанной методике и на специальном оборудовании при глубинах, ограниченных технологическим притуплением лезвия, которое составляет 0,05 мкм. Следует указать, что измерение микротвердости на таких глубинах требует модернизации серийных приборов ПМТ-3 для обеспечения малых усилий вдавливания (менее 0,005 Н) и равномерности скорости нагружения, а измерительный прибор должен быть установлен на специальном виброизолирующем фундаменте, который используется для установки делительных машин, предназначенных для изготовления дифракционных решеток. При этом требуется разработка специальной методики прецизионной настройки прибора. Кроме того, применение этого индентора для измерения микротвердости принципиально ограничено тем, что оптические средства не позволяют с достаточной точностью измерять длину отпечатка по его концам, так как они слабо различимы в силу их малой ширины, несмотря на то, что длина отпечатка достаточно велика. Для расширения области практически осуществимых измерений микротвердости и оценки их точности при малых и сверхмалых глубинах вдавливания выбор оптимальной формы наконечника необходимо осуществлять на основе анализа процесса вдавливания при наличии колебаний основания прибора. Динамический анализ процесса вдавливания индентора при измерении микротвердости в области малых глубин показал, что вдавливание индентора при малых нагрузках сопровождается заметным непрерывным увеличением глубины отпечатка вследствие влияния вибраций основания прибора. Это приводит к погрешности определения микротвердости, которая увеличивается при увеличении длительности контакта индентора с образцом. Погрешность зависит как от амплитуды и частоты колебаний основания, так и от формы индентора, массы подвижных частей прибора, связанных с индентором и от жесткости пружин подвеса. Для анализа влияния этих факторов на погрешность определения микротвердости был рассмотрен индентор, внедренный на заданную глубину под действием постоянной силы вдавливания в материал, имеющий определенную микротвердость, когда на него действует возмущающая сила, обусловленная инерционностью подвижных частей прибора при колебаниях основания. Найдено, что при собственной частоте индентора, значительно превышающей частоту вынужденных колебаний, приращение глубины вдавливания за один цикл прямо пропорционально амплитуде и квадрату частоты колебаний основания и обратно пропорционально квадрату собственной частоты. Погрешность определения микротвердости при данном уровне вибраций растет при увели-

чении массы подвижных частей прибора и уменьшении глубины вдавливания, уменьшается при увеличении площади отпечатка и резко возрастает в области резонасной глубины. Поэтому измерения должны производиться в области глубин, значительно превышающих резонансную глубину вдавливания индентора

Чтобы расширить функциональные возможности использования индентора при малых и сверхмалых глубинах вдавливания и повысить точность измерения за счет улучшения различимости концов отпечатка и стабилизации процесса создания отпечатка, были разработаны на основе проведенного анализа два варианта наконечника [3].

В первом варианте наконечника для измерения микротвердости, лезвие которого образовано пересечением двух поверхностей вращения, оно было снабжено третьей криволинейной гранью, образованной в пересечении двух цилиндрических поверхностей одинакового радиуса, пересекающихся под заданным углом с третьей цилиндрической поверхностью. Оси всех цилиндрических поверхностей расположены в одной плоскости, основания их совмещены, а радиус третьей цилиндрической поверхности равен

$$R_1 = \frac{R}{\sin(\alpha/2)} - \frac{1}{2} a \operatorname{ctg}(\alpha/2),$$

где R — радиус цилиндрических поверхностей; α — угол пересечения этих поверхностей; a — длина образующей третьей цилиндрической поверхности.

Во втором варианте наконечника для измерения микротвердости, лезвие которого образовано пересечением двух конических поверхностей вращения, оно снабжено третьей криволинейной гранью, образованной в результате пересечения двух конических поверхностей с цилиндрической поверхностью. Оси и основания трех поверхностей совпадают, а радиус цилиндрической поверхности равен

$$R_1 = R_0 - \frac{1}{2} a \operatorname{tg}\frac{\alpha_1}{2},$$

где R_0 — радиус окружности пересечения конических поверхностей; α_1 — угол при вершине конических поверхностей.

В случае бицилиндрического наконечника трапецеидального профиля твердость определяется по следующей зависимости:

$$H_{\text{биц}} = \frac{P \sin\alpha}{8R^2\left[\frac{d}{2R} - \left(\sqrt{1-\frac{d^2}{4R^2}} - \frac{d\cos\frac{\alpha}{2}}{2R}\right)\arcsin\frac{d}{2R}\right]}.$$

Зависимость глубины внедрения от линейного размера отпечатка параметров имеет вид

$$h_{\text{биц}} = R\left(1-\sqrt{1-\frac{d^2}{4R^2}}\right)\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}}.$$

Для второго варианта соответственно получим

$$H_{\text{бик}} = \frac{P\cos\frac{\alpha}{2}}{2dR\left[\left(1-\sqrt{1-\frac{d^2}{4R^2}}\right)+\frac{a}{d}\cos\frac{\alpha}{2}\right]\arcsin\frac{d}{2R}};$$

$$h_{\text{бик}} = \frac{d^2}{4R\left[1+\sqrt{1-\frac{d^2}{4R^2}}\right]}.$$

Для изготовления образца индентора такого типа были использованы оборудование и технология заточки алмазных прецизионных резцов, предназначенных для нанесения штрихов дифракционных решеток. Изготовленный двухлезвийный индентор для определения микротвердости имеет боковые цилиндрические поверхности с радиусом $R = 2$ мм, углом 136° между образующими, радиусом третьей цилиндрической поверхности R_1 = 1,85 мм и длиной ее образующей a = 4 мкм. Испытания индентора показали, что его применение позволяет определять микротвердость при глубине вдавливания менее 0,1 мкм в заводских условиях на серийных приборах ПМТ-3. Усилие вдавливания индентора при изменении глубины отпечатка в пределах 0,1–1,0 мкм изменялось в переделах 5–50 г в зависимости от микротвердости образца. При этом не требуется ни специальной прецизионной настройки прибора, ни системы нагружения особого типа, ни специальной виброизоляции (которые необходимы для использования бицилиндрического индентора при малых и сверхмалых глубинах вдавливания).

Точность выполнения геометрических параметров инденторов влияет на величину площади

отпечатка при заданной глубине внедрения и вызывает погрешность определения микротвердости. Сравнительная оценка функций влияния геометрических параметров инденторов дает возможность определить допустимые отклонения параметров заточных устройств.

Рассмотрим, как влияет точность геометрических параметров инденторов и других параметров, характеризующих процесс вдавливания индентора, на точность определения микротвердости. Для этого найдем соответствующие коэффициенты влияния этих параметров для инденторов различных форм.

Предельную абсолютную погрешность микротвердости ΔH, возникающую вследствие отклонений влияющих параметров от их номинальных значений, представим в виде

$$\Delta H = \sum_{i=1}^{n} |K_i| \Delta X_i, \qquad (1)$$

где X_i — параметры, влияющие на точность определения микротвердсти; ΔX_i — предельные абсолютные погрешности параметров X_i; $K_i = (dH/dX_i)$ при $H = H_0$ — коэффициенты влияния параметров X_i; H_0 — микротвердость при номинальных значениях параметров X_i.

H_0 для пирамиды Виккерса вычисляют по формуле

$$HV = \frac{0{,}102 \cdot 2F \sin\frac{\alpha}{2}}{d^2}.$$

Запишем коэффициенты влияния в случае определения микротвердости вдавливанием пирамиды Виккерса:

$$K_{1\,\alpha} = 0{,}102\, F d^{-2} \cos\alpha/2;$$
$$K_{1\,d} = 0{,}408\, F d^{-3} \sin\alpha/2;$$
$$K_{1F} = 0{,}204\, d^{-2} \sin\alpha/2, \qquad (2)$$

где α — угол заострения алмазного наконечника; F — усилие вдавливания; d — длина диагонали отпечатка; $K_{1\alpha}$, K_{1d}, K_{1F} — коэффициенты влияния параметров α, d, F.

Для пирамиды Берковича величину H_∇ можно вычислить по формуле

$$H_\nabla = \frac{0{,}102 \cdot 3F \sin\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{3} d^2}.$$

В случае применения пирамиды Берковича соответствующие коэффициенты влияния имеют вид

$$K_{\nabla\alpha} = 0{,}102 \cdot 3^{1/2} F d^{-2} \cos\alpha;$$
$$K_{\nabla d} = 0{,}204 \cdot 3^{1/2} F d^{-3} \sin\alpha; \qquad (3)$$
$$K_{\nabla F} = 0{,}102 \cdot 3^{-1/2} d^{-2} \sin\alpha,$$

где α — угол наклона грани к оси алмазного наконечника; d — длина высоты отпечатка трехгранной пирамиды; $K_{\nabla\alpha}$, $K_{\nabla d}$, $K_{\nabla F}$ — коэффициенты влияния параметров α, d, F.

В случае применения бицилиндрического индентора величина $H_{бц}$ определяется в соответствии с зависимостью

$$H_{бц} = \frac{0{,}306\, F R \sin\alpha}{d^3}.$$

Для бицилиндрического наконечника коэффициенты влияния можно определить исходя из зависимостей

$$K_{бц\,\alpha} = 0{,}306\, F R d^{-3} \cos\alpha;$$
$$K_{бц\,d} = 0{,}918\, F R d^{-4} \sin\alpha;$$
$$K_{бц\,R} = 0{,}306\, F d^{-3} \sin\alpha;$$
$$K_{бц\,F} = 0{,}306\, R d^{-3} \sin\alpha, \qquad (4)$$

где R — радиус цилиндрических поверхностей, образующих лезвие индентора; α — угол между осями цилиндрических поверхностей; d — линейный размер отпечатка; $K_{бц\,\alpha}$, $K_{бц\,d}$, $K_{бц\,R}$, $K_{бц\,F}$ — коэффициенты влияния параметров α, d, R, F.

Зависимость микротвердости, определяемой вдавливанием индентора трапецеидального профиля, от параметров индентора и линейного размера отпечатка имеет вид

$$H_{тр} = \frac{0{,}306\, F R \sin\alpha}{d^3 + 3Rad(1 + d/3R)\sin\alpha},$$

где $H_{тр}$ — микротвердость, определяемая вдавливанием бицилиндрического индентора трапецеидального профиля; R — радиус цилиндрических поверхностей; α — угол пересечения этих поверхностей; a — длина образующей третьей цилиндрической поверхности; d — линейный размер отпечатка.

Определяя соответствующие коэффициенты влияния, получим

$$K_{тр\alpha} = \frac{3FR\cos\alpha}{d^3 + 3Rad(1 + d/3R)\sin\alpha} \times$$

$$\times\left[1-\frac{3R^2ad(1+d/3R)\sin\alpha}{(d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha)^2}\right]; \quad (5)$$

$$K_{\text{тр}R}=\frac{3FR\sin\alpha}{d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha}\times$$

$$\times\left[1-\frac{3Rad\sin\alpha}{d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha}\right]; \quad (6)$$

$$K_{\text{тр}d}=\frac{9FR\sin\alpha\left[d^2+Ra(1+2/3R)\sin\alpha\right]}{(d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha)^2}; \quad (7)$$

$$K_{\text{тр}F}=\frac{3R\sin\alpha}{d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha}; \quad (8)$$

$$K_{\text{тр}a}=\frac{9FR(1+2/3R)\sin^2\alpha}{(d^3+3Rad(1+d/3R)\sin\alpha)^2}. \quad (9)$$

Анализ зависимостей коэффициентов влияния для различных типов инденторов дает возможность установить предельные погрешности микротвердости в зависимости от номинальных значений параметров и их предельных отклонений, а при заданной предельной погрешности микротвердости определить допустимые предельные отклонения влияющих параметров. Особое значение имеет исследование точности определения микротвердости при малых глубинах вдавливания, которое позволяет провести сравнительный анализ функциональных возможностей инденторов различных форм в зависимости от глубины вдавливания.

Предельную относительную погрешность в случае определения микротвердости вдавливанием пирамиды Виккерса, Берковича, бицилиндрического индентора и индентора трапецеидального профиля соответственно можно определить, подставляя в (1) коэффициенты влияния из (2), (3), (4), (6), ... (10):

$$\Delta HV=\frac{2F\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2}\times$$

$$\times\left[\frac{1}{2}|\Delta\alpha|\text{ctg}\alpha+\frac{1}{d}|\Delta d|\sin\frac{\alpha}{2}+\frac{1}{F}|\Delta F|\right]; \quad (11)$$

$$\Delta H_{\nabla}=\frac{\sqrt{3}\sin\alpha}{d^2}\left[|\Delta\alpha|\text{ctg}\alpha+\frac{2}{d}|\Delta d|+\frac{1}{F}|\Delta F|\right]; \quad (12)$$

$$\Delta H_{\text{бц}}=\frac{3FR\sin\alpha}{d^3}\times$$

$$\times\left[|\Delta\alpha|\text{ctg}\alpha+\frac{3}{d}|\Delta d|+\frac{1}{R}|\Delta R|\right]; \quad (13)$$

$$\Delta H_{\text{тр}}=H_0\left\{\frac{1}{F}|\Delta F|+\frac{1}{F}H_0d|\Delta a|+\frac{3}{d}|\Delta d|\right\}+$$

$$+H_0\left\{\text{ctg}\alpha\left[1-\frac{1}{F}H_0ad\right]|\Delta\alpha|+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{R}\left(1+\frac{1}{F}H_0ad\right)|\Delta R|\right\}, \quad (14)$$

где H_0 — значение микротвердости при номинальных значениях параметров.

Из зависимостей (11)–(14) следует, что на точность определения микротвердости оказывают влияние погрешности в изготовлении углов наклона и радиусов поверхностей инденторов, точность определения параметров отпечатка и точность нагружения.

Следует отметить, что влияние погрешностей углов и радиусов, а также точности статического нагружения не зависит от размера отпечатка, а влияние точности определения размера отпечатка существенно увеличивается с уменьшением глубины вдавливания. При уменьшении размеров отпечатка в большей степени проявляется погрешность различимости концов отпечатка. Кроме того, малым глубинам вдавливания соответствуют малые усилия вдавливания, при которых внешние воздействия и влияние скорости нагружения приводят к существенным погрешностям определения микротвердости [1].

Наибольшее влияние на точность определения микротвердости для инденторов трапецеидального профиля оказывает точность выполнения длины образующей горизонтальной цилиндрической поверхности. Непостоянство этого параметра с изменением глубины внедрения, возникающее вследствие неточности изготовления боковых цилиндрических поверхностей и углов их наклона, вносит наибольшую погрешность в измерения микротвердости.

На основе анализа уравнений проекций лезвий на плоскость заготовки можно определить зависимость длины образующей от глубины внедрения и от погрешностей углов наклона и радиусов поверхностей. Таким образом, задаваясь допустимыми погрешностями микротвердости и определяя соответствующие функции влияния, находим допустимые пределы изменения

длины образующей при заданной глубине внедрения. Зная зависимость длины образующей от погрешностей изготовления радиусов и углов наклона поверхностей и определяя соответствующие функции влияния, находим допустимые погрешности изготовления.

Для инденторов трапецеидального профиля с углом между образующими $\alpha = 136°$ при радиусе боковых цилиндрических поверхностей $R = 2$ мм, длине отпечатка $d = 50$ мкм, номинальном значении микротвертдости $H = 1000$ Н/мм^2 и длине образующей цилиндрической поверхности $a = 4$ мм относительные погрешности микротвердости при первичных погрешностях $\Delta R = 0{,}05$ мм, $\Delta a = 30'$, $\Delta a = 0{,}5$ мкм, соответственно равны $\Delta H_R = 4{,}5$ Н/мм^2, $\Delta H_\alpha = 1{,}7$ Н/мм^2, $\Delta H_R = 100$ Н/мм^2. Таким образом, основной вклад в общую погрешность определения микротвердости вносит погрешность определения длины образующей передней цилиндрической поверхности.

Для контроля механических свойств широко применяемых тонких покрытий из различных металлов (алюминия, свинца, золота, хрома и т. д.), получаемых испарением в вакууме, электроосаждением, химическим, катодным распылением и другими методами, необходимы количественные оценки их механических свойств, в том числе пластических.

Известно, что стандартных методов определения пластичности нет [1]. Оценить пластичность тонких покрытий можно, зная зону распространения пластических деформаций около вдавливаемого индентора. Она может быть охарактеризована высотой наплывов пластически деформируемого материала. На этом принципе основан метод определения пластичности поверхностных слоев материалов путем вдавливания алмазного конического индентора, при котором для одинаковой глубины h, отсчитываемой от недеформируемой поверхности образца, зона распространения пластических деформаций вокруг индентора тем больше, чем выше пластичность материала. Пластичность в этом случае характеризуется отношением h/d, где d — диаметр отпечатка. Это отношение определяется высотой наплывов, которая тем меньше, чем выше пластичность.

Для определения пластичности при малых глубинах вдавливания этот метод не может быть применен вследствие того, что параметры h и d в этом случае малы и находятся вне пределов разрешающей способности оптических средств измерений. Кроме того, при вдавливании индентора необходимо выдерживать соотношение толщины образца к глубине вдавливания не менее определенного критического значения, характерного для каждого материала, а несоблюдение этого условия ведет к искажению значений характеристик материала вследствие влияния подложки.

Для определения пластичности тонких покрытий может быть использован наконечник для испытаний материалов, лезвие которого образовано пересечением двух поверхностей вращения — цилиндрических или конических [4]. Индентор такой формы позволяет повысить точность измерений при малых глубинах вдавливания, но его применение для контроля пластичности тонких покрытий имеет существенный недостаток: линейный размер, характеризующий высоту наплывов при вдавливании, — наибольшая ширина отпечатка — недостаточно различим при малых глубинах. Определить высоту наплывов при вдавливании бицилиндрического или биконического индентора можно в том случае, если индентор имеет дополнительное лезвие, которое начинает вдавливаться в наплыв в момент достижения определенной глубины вдавливания основного лезвия. При этом глубина вдавливания дополнительного лезвия при глубине вдавливания основного лезвия h_0 равна высоте наплывов около основного лезвия. Длина следа дополнительного лезвия в этом случае достаточно велика, что дает возможность ее измерить и определить соответствующее значение глубины вдавливания. Геометрические характеристики дополнительного лезвия могут быть рассчитаны в соответствии с зависимостями, полученными при анализе геометрии двупрофильных резцов, а пластические дефомации аналогичны иисследованным деформациям при вдавливании двупрофильного резца [1].

При вдавливании индентора, имеющего дополнительное лезвие, пластичность материала на определенной глубине характеризуется отношением длины отпечатка дополнительного лезвия к длине отпечатка основного, которое может быть вычислено теоретически для жесткопластического материала при известной зави-

симости между глубиной вдавливания и линейными размерами отпечатка лезвий. Данные зависимости известны из геометрических характеристик бицилиндрических и биконических резцов с одним и двумя профилями.

Таким образом, из анализа процесса вдавливания следует, что индентор для определения пластичности должен иметь дополнительное лезвие, которое служит для определения высоты навалов около основного. Дополнительное лезвие должно быть расположено на расстоянии нескольких микрометров от основного, для того, чтобы можно было определять пластичность при малых (порядка 1–2 мкм) глубинах. Для изготовления такого индентора необходимо обеспечить соответствующие точностные характеристики заточных устройств, используя методы определения точностных требований к изготовлению биконических и бицилиндрических резцов.

В результате проведенных исследований разработаны два варианта наконечника.

В первом варианте наконечник, лезвие которого образовано пересечением двух цилиндрических (основных) поверхностей одинакового радиуса R_1, чьи оси лежат в одной плоскости и образуют угол α_1, снабжен двумя дополнительными лезвиями. Они образованы в пересечении основных цилиндрических поверхностей с дополнительными цилиндрическими поверхностями одинакового радиуса R_2, оси которых образуют угол α_2 и лежат в той же плоскости, что и оси основных поверхностей. Для радиусов и углов выполняется соотношение

$$R_2 = R_1 \sin\frac{\alpha_1}{2} \Big/ \sin\frac{\alpha_2}{2},$$

обеспечивающее прямолинейность проекций дополнительных лезвий на плоскость, которая перпендикулярна плоскости, содержащей оси цилиндрических поверхностей [4]. Дополнительные лезвия расположены на расстоянии a_0 по обеим сторонам от основного лезвия, причем

$$a_0 = h_0 \operatorname{tg}\frac{\alpha_1}{2},$$

где h_0 — глубина, на которой осуществляется определение пластичности материала, отсчитываемая от недеформированной поверхности образца.

Во втором варианте наконечник с лезвием, образованным в пересечении двух соосных конических поверхностей с углом при вершине β_1 и радиусом оснований R_1, снабжен двумя дополнительными лезвиями, которые получены в пересечении основных конических поверхностей с дополнительными коническими поверхностями, имеющими угол при вершине β_2 и радиусы оснований R_2. Оси всех поверхностей совпадают, а для радиусов выполняется соотношение:

$$R_1 - R_2 = h_0.$$

Для определения пластичности наконечник под действием заданной нагрузки вдавливается в испытуемый материал до получения отпечатка основного лезвия с линейным размером d_1 при глубине вдавливания h_0. В результате образования наплывов вспомогательные лезвия отпечатываются на образце. По результатам измерения длины d_2 вспомогательных лезвий определяется отношение d_1/d_2, которое и служит характеристикой пластичности данного материала.

По сравнению с коническим индентором предлагаемый наконечник позволяет расширить функциональные возможности метода вдавливания для определения пластичности в области малых и сверхмалых глубин.

Бицилиндрический трехлезвийный индентор для контроля пластичности был изготовлен с радиусом $R = 2$ мм цилиндрических поверхностей, образующих основное лезвие, углом 136° между образующими основного лезвия и углом 116° между образующими вспомогательного лезвия. Длина образующих основного лезвия составляла 5 мкм, глубина вдавливания — $h_0 = 2$ мкм. Испытания этого индентора показали, что отношение длин основного и вспомогательного лезвия равномерно увеличивается с увеличением глубины вдавливания по линейному закону для каждого материала. Для различных материалов при определенной глубине вдавливания это отношение имеет различные значения и может служить характеристикой пластических свойств материала.

Анализ процесса вдавливания с целью получения отпечатка для определения микротвердости в области малых глубин показал, что для него наиболее характерны три источника погрешности: точность изготовления геометрической

формы индентора, вибрации подвижных частей механизма нагружения и различимость узких концов отпечатка. Относительная погрешность измерения микротвердости, возникающая вследствие вибраций определенного уровня, уменьшается с увеличением радиуса поверхностей, образующих лезвие индентора, и угла между их образующими, но увеличивается с уменьшением глубины вдавливания. Относительная погрешность определения микротвердости, возникающая вследствие ограниченной различимости концов отпечатка, уменьшается с увеличением угла между образующими; при этом она прямо пропорциональна разрешающей способности прибора и радиусу цилиндрических поверхностей, образующих лезвие, но обратно пропорциональна квадрату длины следа. Исключение этих погрешностей достигается выбором специальной формы индентора. Индентор для определения пластичности тонких покрытий имеет три лезвия — одно основное и два вспомогательных, с помощью которых определяется высота навалов при вдавливании индентора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев, Г.А.** Динамика нанесения прецизионного микрорельефа [Текст] / Г.А. Алексеев.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. — 184 с.

2. **Федотов, А.И.** Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков [Текст] / А.И. Федотов.— Л.: Машиностроение, 1977.— 303 с.

3. **Авторское свидетельство на изобретение № 1084656.** Наконечник для измерения микротвердости [Текст] / Алексеев Г.А., Малышев А.И. [и др.].— БИ.— 1984. № 4.

2. **Авторское свидетельство на изобретение № 1134907**. Наконечник для определения пластичности материалов[Текст] / Алексеев Г.А., Малышев А.И. [и др.].— БИ.— 1985. № 2.

УДК 669.2

А.И. Демидов, И.А. Маркелов

ТЕРМОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНЕТИТА И ВЮСТИТА С МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВЮСТИТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

В предыдущей работе [1] мы обубликовали результаты расчетов равновесной молярной доли монооксида углерода в газовой фазе для реакций восстановления магнетита и вюстита монооксидом углерода по термодинамическим данным справочников [2, 3], в которых приводятся значения функции G для вюстита состава $Fe_{0,947}O$. Использование функции G для вюстита состава $Fe_{0,947}O$ в расчетах приводит к значительному расхождению расчетных значений и экспериментальных данных для реакции восстановления магнетита монооксидом углерода при увеличении температуры. Это показывает, что необходимо учитывать изменение состава вюстита и функцию G для вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом при изменении температуры. Поэтому нами были проведены расчеты значений функции G для вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом или с железом, с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры и равновесной молярной доли монооксида углерода в газовой фазе в процессе взаимодействия магнетита и вюстита с монооксидом углерода.

Вюстит (нестехиометрический оксид железа) образуется при 843 K по эвтектоидной реакции [4]

$$(1-3x)\mathrm{Fe} + (1+x)\mathrm{Fe_3O_4} = 4\mathrm{FeO}_{1+x}, \qquad (1)$$

где x — избыток атомов кислорода на каждый атом железа в вюстите.

С увеличением температуры область гомогенности для вюстита расширяется [5].

Состав вюстита, находящегося в равновесии с железом, отвечает формуле $\mathrm{FeO}_{1+x'}$, где x' — избыток атомов кислорода на каждый атом железа.

Для расчета изменений стандартной энергии Гиббса реакции

$$\frac{2}{1+x'}\mathrm{Fe} + \mathrm{O_2} = \frac{2}{1+x'}\mathrm{FeO}_{1+x'} \qquad (2)$$

использовали данные о давлении кислорода при равновесии вюстита с железом [6, 7] и значения функций $G(\mathrm{Fe})$, $G(\mathrm{O_2})$ [2, 3]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Состав вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом, отвечает формуле $\mathrm{FeO}_{1+x''}$, где x'' — избыток атомов кислорода на каждый атом железа.

Для расчета изменений стандартной энергии Гиббса реакции

$$\frac{6}{1-3x''}\mathrm{FeO}_{1+x''} + \mathrm{O_2} = \frac{2}{1-3x''}\mathrm{Fe_3O_4} \qquad (3)$$

использовали данные о давлении кислорода, при котором вюстит находится в равновесии с магнетитом [6–8], и значения функций $G(\mathrm{Fe_3O_4})$, $G(\mathrm{O_2})$ [2, 3]. Данные о составе вюстита в равновесии с железом и с магнетитом взяты из работы [9]. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Затем рассчитывали значения функции G для вюстита, находящегося в равновесии с железом согласно реакции

$$G\left(\mathrm{FeO}_{1+x'}\right) = \\ = \frac{1+x'}{2}\left[\Delta G_T^\circ + \frac{2}{1+x'}G\left(\mathrm{Fe}\right) + G\left(\mathrm{O_2}\right)\right] \qquad (5)$$

и с магнетитом в соответствии с реакцией

$$G\left(\mathrm{FeO}_{1+x''}\right) = \\ = \frac{1-3x''}{6}\left[\frac{2}{1-3x''}G\left(\mathrm{Fe_3O_4}\right) - G\left(\mathrm{O_2}\right) - \Delta G_T^\circ\right]. \qquad (6)$$

Используя полученные значения функции G для вюстита, находящегося в равновесии с железом и магнетитом, термодинамические данные справочников [2, 3], выполнили расчеты равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе для реакций

$$\frac{1}{1-3x''}\mathrm{Fe_3O_4} + \mathrm{CO} = \frac{3}{1-3x''}\mathrm{FeO}_{1+x''} + \mathrm{CO_2}; \qquad (7)$$

Таблица 1

Термодинамические характеристики реакций (2) и (8) и значения функции *G* вюстита, равновесного с железом, рассчитанные на основе данных о давлении кислорода [6, 7]

T, K	$1 + x'$	ΔG_T°, по ф-ле (2), кДж	$G(FeO_{1+x'})$, кДж	$\ln K_p$ по ф-ле (8)	X_{CO}	X_{CO} по [9]	δX_{CO}, %
Расчет по данным [6]							
873,15	1,0556	–413,59	–352,95	–0,01	0,5026	0,5277	4,76
973,15	1,0515	–401,10	–364,08	–0,32	0,5789	0,5999	3,49
1073,15	1,0491	–388,61	–376,43	–0,57	0,6378	0,6527	2,29
1173,15	1,0485	–376,13	–390,00	–0,77	0,6831	0,6849	0,26
1273,15	1,0479	–362,96	–403,77	–0,90	0,7117	0,7163	0,65
1373,15	1,0485	–349,71	–418,31	–1,01	0,7336	0,7380	0,60
1473,15	1,0491	–336,47	–433,26	–1,10	0,7510	0,7564	0,71
1573,15	1,0503	–323,22	–448,80	–1,18	0,7654	0,7710	0,73
Расчет по данным [7]							
873,15	1,0556	–414,37	–353,36	–0,06	0,5160	0,5277	2,22
973,15	1,0515	–401,65	–364,37	–0,35	0,5872	0,5999	2,12
1073,15	1,0491	–388,73	–376,49	–0,57	0,6392	0,6527	2,07
1173,15	1,0485	–375,62	–389,74	–0,74	0,6775	0,6849	1,09
1273,15	1,0479	–362,43	–403,49	–0,88	0,7066	0,7163	1,36
1373,15	1,0485	–349,37	–418,13	–1,00	0,7306	0,7380	1,00

Таблица 2

Термодинамические характеристики реакций (3) и (7) и значения функции *G* вюстита, равновесного с магнетитом, рассчитанные исходя из данных работ [6–8] о давлении кислорода

T, K	$1+x''$	ΔG_T°, по ф-ле (3), кДж	$G(FeO_{1+x''})$, кДж	$\ln K_p$ по ф-ле (7)	X_{CO}	X_{CO} по [9]	δX_{CO}, %
Расчет по данным [6, 8]							
873,15	1,0705	–409,66	–358,53	0,26	0,4352	0,4484	2,95
973,15	1,0950	–385,76	–378,19	0,63	0,3476	0,3521	1,28
1073,15	1,1120	–361,42	–396,30	0,96	0,2772	0,2809	1,32
1173,15	1,1266	–335,89	–414,40	1,29	0,2151	0,2237	3,84
1273,15	1,1401	–310,44	–432,70	1,58	0,1712	0,1779	3,80
1373,15	1,1530	–284,55	–451,35	1,84	0,1369	0,1404	2,54
1473,15	1,1654	–257,78	–470,39	2,11	0,1083	0,1109	2,30
1573,15	1,1797	–229,77	–490,51	2,39	0,0839	0,0848	1,04
Расчет по данным [7]							
873,15	1,0705	–410,14	–358,47	0,23	0,4435	0,4484	1,10
973,15	1,0950	–386,38	–378,11	0,59	0,3563	0,3521	1,20
1073,15	1,1120	–362,22	–396,21	0,91	0,2863	0,2809	1,92
1173,15	1,1266	–337,70	–414,21	1,20	0,2312	0,2237	3,33

$$\frac{1}{1+x'}FeO_{1+x'} + CO = \frac{1}{1+x'}Fe + CO_2. \qquad (8)$$

Константы равновесия реакций (7) и (8) по форме записи одинаковы и представляют собой отношение давлений диоксида углерода и монооксида углерода:

$$K_р = \exp\left(-\frac{\Delta G_T^\circ}{RT}\right) = \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}} = \frac{P_{общ}X_{CO_2}}{_{общ}\ \ _{CO}} =$$

$$= \frac{X_{CO_2}}{X_{CO}} = \frac{1-X_{CO}}{X_{CO}}. \qquad (9)$$

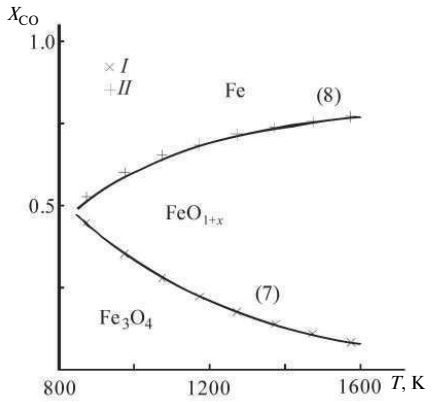
Из соотношения (9) находили молярную долю оксида углерода (II) в газовой фазе и относительную погрешность вычисления молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе:

$$X_{CO} = \frac{1}{1+K_р}; \qquad (10)$$

$$\delta X_{CO} = \frac{\left|X_{CO} - X_{CO\,эксп}\right|}{X_{CO\,эксп}}100 = \frac{\Delta X_{CO}}{X_{CO\,эксп}}100, \qquad (11)$$

где $X_{CO\,эксп}$ — экспериментальные значения молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе [9].

Результаты расчета (по данным о давлении кислорода при равновесии вюстита с железом [6, 7]) изменений стандартной энергии Гиббса реакции (2), функции G вюстита, равновесного с железом и кислородом, константы равновесия реакции (8), расчетных значений молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе и относительной погрешности вычисления молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе в интервале температур 873–1573 и 873–1373 K, рассчитанные на основе значений, представлены в табл. 1.



Зависимости равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе X_{CO} для реакций (7) и (8) от температуры T, K:

Экспериментальные данные для реакций I — взаимодействия магнетита с монооксидом углерода (×) и вюстита с монооксидом углерода (+)

Из данных этой таблицы видно, что наиболее близкие к экспериментальным [9] в интервале температур 873–1073 K значения равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе получаются на основе значений давления кислорода при равновесии вюстита с железом [7], а в интервале температур 1173–1573 K — при использовании результатов работы [6].

Результаты расчетов исходя из значений давления кислорода при равновесии вюстита с магнетитом [6, 7, 8] изменений стандартной энергии Гиббса реакции (3), функции G вюстита, равновесного с магнетитом и кислородом, константы равновесия реакции (7), расчетных значений молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе и относительной погрешности вычисления молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе в интервале температур 873–1573 и 873–1173 K представлены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что при температурах 873, 973 и 1173 K наиболее близкие к экспериментальным значения равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе получаются исходя из значений давления кислорода при равновесии вюстита с железом [7]. При остальных температурах более точные данные получаются на основе результатов работы [8]. Следует отметить, что расчетные значения равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе для равновесий вюстита с железом и магнетитом хорошо согласуются с результатами расчетов [10] при температуре 1273 K.

Используя уравнения, на основе которых получены наиболее близкие к экспериментальным значения равновесной молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе, выполнили расчет функции G вюстита и значений молярной доли оксида углерода (II) в газовой фазе в интервале 900–1600 K. Данные о составе вюстита в равновесии с железом и с магнетитом взяты из справочника [3]. Результаты расчетов представлены на рисунке и в табл. 3, 4.

Полученные значения функции G вюстита могут быть рекомендованы для расчета значений

Таблица 3

Рекомендуемые значения функции *G* вюстита на границе с железом в интервале температур 900–1600 К

T, К	1+*x*′	$G(FeO_{1+x'})$, кДж	ln K_p по ф-ле (8)	X_{CO}
900	1,0542	–356,17	–0,15	0,5372
1000	1,0504	–367,43	–0,42	0,6030
1100	1,0488	–379,94	–0,62	0,6504
1200	1,0483	–393,68	–0,81	0,6920
1300	1,0483	–407,72	–0,93	0,7180
1400	1,0483	–422,17	–1,04	0,7386
1500	1,0492	–437,32	–1,13	0,7552
1600	1,0509	–453,12	–1,20	0,7688

Таблица 4

Рекомендуемые значения функции *G* вюстита на границе с магнетитом в интервале температур 900–1600 К

T, К	1+*x*″	$G(FeO_{1+x''})$, кДж	ln K_p по ф-ле (7)	X_{CO}
900	1,0777	–363,86	0,33	0,4184
1000	1,1000	–383,03	0,68	0,3359
1100	1,1164	–401,27	1,06	0,2579
1200	1,1303	–419,09	1,28	0,2184
1300	1,1431	–437,52	1,65	0,1612
1400	1,1551	–456,05	1,91	0,1287
1500	1,1682	–475,44	2,18	0,1014
1600	1,1839	–496,09	2,47	0,0780

изменения энергии Гиббса химических реакций с его участием. Из рисунка видно, что полученные расчетные значения молярной доли оксида углерода(II) для реакций (7) и (8) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Полученные для реакций взаимодействия оксидов железа с монооксидом углерода зависимости равновесной молярной доли монооксида углерода в газовой фазе от температуры хорошо согласуются с экспериментальными результатами, если принять во внимание изменения состава вюстита при изменении температуры на границах с железом и магнетитом. Значения функции *G* для вюстита могут быть рекомендованы для расчета значений изменения энергии Гиббса химических реакций с его участием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Демидов, А.И.** Термодинамика взаимодействия оксидов железа с оксидом углерода (II) [Текст] / А.И. Демидов, И.А. Маркелов // ЖПХ.— 2011. Т. 84, № 2.— С. 200–202.

2. **Barin, I.** Thermochemical properties of inorganic substances [Текст] / I. Barin, O. Knacke / With a hreface by O. Kubaschewski.— Berlin; New York: Springer-Verlag, 1973.— 921 p.

3. **Barin, I.** Thermochemical properties of inorganic substances. Suppl [Текст] / I. Barin, O. Knacke, O. Kubaschewski.— Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977.— 861 p.

4. **Лыкасов, А.А.** Физико-химические свойства вюстита и его растворов [Текст] / А.А. Лыкасов, К. Карел, А.Н. Мень [и др.] // Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1987.— 230 с.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст]: Справочник в 3 т.: Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1997.— 1024 с.

6. **Лыкасов, А.А.** Упругость диссоциации вюстита и магнетита [Текст] / А.А. Лыкасов // Тез. докл. V Всесоюз. науч. конф. по современным проблемам электрометаллургии стали / Под ред. В.Е. Рощина.— Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1984.— С. 14–15.

7. **O′Neill, H.St.C.** Systems Fe-O and Cu-O: Thermodynamic data for the equilibria Fe-«FeO,» Fe-Fe_3O_4, «FeO»-Fe_3O_4, Fe_3O_4-Fe_2O_3, Cu-Cu_2O, and Cu_2O-CuO from emf measurements [Текст] / H.St.C. O′Neill // Am. Mineral.— 1988. Vol. 73, № 5/6.— P. 470–486.

8. **Vallet, P.** Contribution a l'etude du monoxide de fer solide non-stoechiometrique. Diagramme T-P-X [Текст] / P. Vallet, C. Carel // Mat. Res. Bull.— 1979. Vol. 14, № 9.— P. 1181–1194.

9. **Darken, L.S.** The system iron — oxygen. I. The wüstite field and related equilibria [Текст] / L.S. Darken, R.W. Gurry // J. Amer. Chem. Soc.— 1945. Vol. 67, № 9.— P. 1398–1412.

10. **Esdaile, J.D.** Calculation of equilibrium diagrams for direct reduction of iron ore [Текст] / J.D. Esdaile, M. Motlagh // Ironmaking and steelmaking.— 1991. Vol. 18, № 6.— P. 423–430.

УДК 629.1.032.001

Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов

ВЛИЯНИЕ УПРУГОСТИ ПРИВОДА В СИСТЕМЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ВПРЫСКА ТОПЛИВА

Для быстроходных дизелей существует проблема (помимо многих других) обеспечения достаточно малой продолжительности впрыска топлива в камеры сгорания, от решения которой непосредственно зависит качество теплового процесса, т. е. мощность и экономичность самих дизелей.

В принципе желательно, чтобы процесс впрыска был бы достаточно малым по времени. К примеру, для дизеля транспортного назначения со скоростью вращения числом оборотов коленчатого вала n = 3000 об/мин эта продолжительность должна составлять не более 1,0–1,2 мс.

Продолжительность впрыска зависит не только от так называемого активного геометрического хода $h_г$ плунжера, топливного насоса высокого давления (ТНВД), и соответствующей ему продолжительности впрыска $\varphi_г$ в углах поворота кулачкового вала (рис. 1), но и от упругой деформации кулачкового привода и степени сжимаемости аэрированного (насыщенного воздухом) топлива, а также от упругой деформации трубопроводов высокого давления.

Таким образом, реальная продолжительность впрыска φ_k фактически является суммой $\varphi_г$ и поправки на общую упругую деформацию системы топливоподачи $\Delta\varphi_г$.

Эта поправка обычно велика, поскольку максимальное давление впрыска топлива в дизелях достигает 150 МПа и более, и потому вопрос оценки и выбора «суммарной» жесткости всей системы впрыска весьма актуален.

В практике иной раз даже имеют место парадоксы, когда для исключения недопустимой продолжительности впрыска приходится увеличивать давление впрыска, в принципе влекущее к обратному эффекту интенсификации упругой деформации.

Реально «условная» угловая деформация привода ТНВД, учитывающая, помимо ее упругости, и упомянутую выше объемную деформацию, может быть определена по выражению

$$\Delta\varphi_г = \frac{M_k l}{GJ_0} = \frac{M_k}{K_п},$$

где M_k — крутящий момент; $K_п = \dfrac{GJ_0}{l}$ — жесткость привода; $G = 8\cdot 10^4$ МПа — модуль касательной упругости материала привода (стали); $J_0 = \pi d^4/32$ — момент инерции поперечного сечения стального стержня диаметром d и длиной l, имитирующего жесткость конкретного привода ТНВД.

Сам механизм влияния упругости привода на параметры топливоподачи (продолжительность, давление) представляется как следствие торможения скорости вращения n_k^0 кулачкового вала в процессе собственно впрыска топлива (по отношению к его номинальной скорости вращения n_k) сообразно скорости вращения коленчатого вала двигателя, так что

$$n_k^0 = n_k \frac{\varphi_г}{\varphi_г + \Delta\varphi_г}.$$

Согласно имеющимся данным по крутящему моменту*, в зависимости от жесткости кулачкового привода увеличение продолжительности впрыска за счет упругости привода составляет

$$\Delta\varphi_г = \frac{M_{max}}{K_п} = \frac{\pi d_п^2}{4K_п} p_т \frac{R_0 + r_0 + h_m}{\sqrt{\left[\dfrac{(\varepsilon_0 R_m + r_0)\omega_k}{c_m}\right]^2 - 1}},$$

а смещение начала впрыска по углу поворота кулачкового вала —

* **Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Тепловые двигатели. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст]: Учебное пособие.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— С. 70–72, 77, 78.

$$\Delta\varphi = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4K_{\text{п}}} p_0 \frac{R_0 + r_0 + h_m}{\sqrt{\left[\frac{(\varepsilon_0 R_m + r_0)\omega_k}{c_m}\right]^2 - 1}}.$$

В этих выражениях $p_{\text{т}}$ — максимальное давления топлива при впрыске его форсункой; p_0 — давление открытия иглы форсунки; $d_{\text{п}}$ — диаметр плунжера ТНВД; C_m — средняя скорость плунжера за период впрыска; ω_k — фактическая (условная) частота вращения кулачкового вала ТНВД. Прочие данные, в принципе касающиеся геометрии и кинематических показателей размеров собственно кулачкового привода ТНВД (в данном случае привязанные к конкретному дизелю 6ЧН 21/21), представлены в подписи к рис. 1.

Известно, что количество Q истекающей под давлением p жидкости (топливо) за время t определяется выражением $Q = \mu_{\text{с}} f_{\text{с}} t \sqrt{2\rho_{\text{т}} p}$, где $\mu_{\text{с}} f_{\text{с}}$ — эффективное проходное сечение сопел распылителей, а $\rho_{\text{т}}$ — плотность топлива.

Из этого выражения очевидно, что при прочих равных условиях (цикловая подача, плотность топлива, эффективное проходное сечение сопел распылителей) давление впрыска обратно пропорционально квадрату времени впрыска, то есть $p_{\text{т}0}/p_{\text{т}} = (t/t_0)^2$.

При этом относительно меньшему времени t соответствует большая угловая скорость вращения, обусловленная относительно большей жесткостью привода, но в то же время пропорциональная времени впрыска, и, следовательно, давление впрыска с учетом упругости привода может быть установлено по выражению

$$p_{\text{т}}/p_{\text{т}0} = \left(n_k/n_k^0\right)^2.$$

Расчеты по оценке влияния упругости привода на параметры впрыска рассмотрим на примере ТНВД конкретного двигателя — 6ЧН $^{21}/_{21}$ — мощностью N_e = 550 кВт при скорости вращения коленчатого вала n = 1500 об/мин$^{-1}$ (скорость вращения кулачного вала ТНВД n_k = = 750 об/мин$^{-1}$) с угловой скоростью ω =78,3 1/с, цикловой подачей топлива $g_{\text{ц}}$ = 0,47 г/цикл; максимальным давлением впрыска $p_{\text{т}}$ = 73,5 МПа

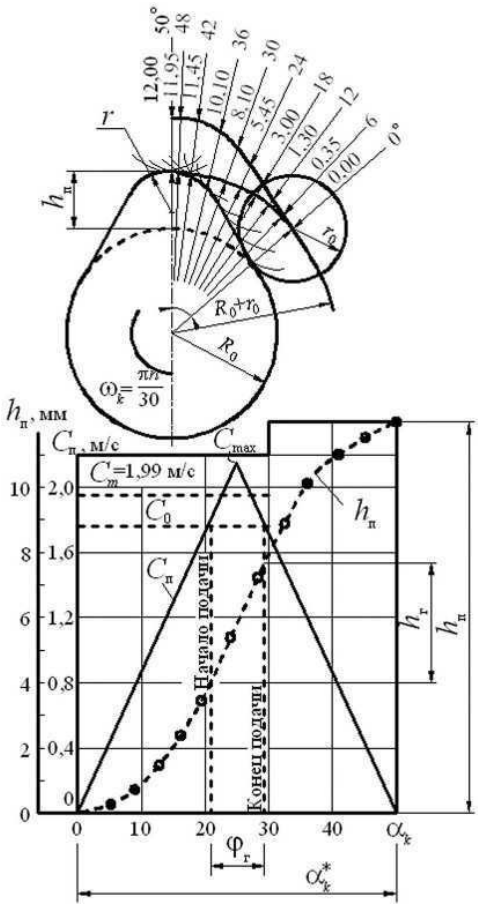


Рис. 1. Геометрические и кинематические показатели топливной аппаратуры дизеля 6ЧН $^{21}/_{21}$:

$h_{\text{п}}$ — ход плунжера ТНВД; $C_{\text{п}}$ — скорость плунжера; α_k — угол поворота кулачкового вала; $C_{\max}$ — максимальная скорость плунжера; C_m — средняя скорость плунжера за период впрыска топлива; C_0 — начальная и конечная скорость плунжера за период его активного хода; $\varphi_{\text{г}}$ — геометрическая продолжительность впрыска; α_k^* — угол подъема профиля кулачка; $h_{\text{г}}$ — геометрически полезный ход плунжера; R_0 — радиус начальной окружности кулачка; r_0 — радиус ролика толкателя (привод плунжера)

[1]; отношением Δ фактической продолжительности впрыска φ_k к геометрической $\varphi_{\text{г}}$ (рис. 1) $\Delta = \varphi_k / \varphi_{\text{г}} = 1{,}62$.

В то же время*

$$\frac{C_{\max}}{\alpha_k^*} = \frac{C_{\max} - C_0}{\varphi_{\text{г}}}$$

и

$$\varphi_г = (C_{max} - C_0)\alpha_k^* / C_{max} = 2(C_{max} - C_m)\alpha_k^* / C_{max}.$$

При $C_{max} = 12 n_k h / \alpha_k^* = 12 \cdot 750 \cdot 0{,}012/50 =$ $= 2{,}16$ м/с.

При средней скорости плунжера в процессе впрыска $C_m = 1{,}99$ м/с и полном угле подъема профиля кулачка $\alpha_k^* = 50$ п.кул.в. с учетом представленного выше выражения имеем

$$\varphi_г = 2(2{,}16 - 1{,}99) \cdot 50 / 2{,}16 = 7{,}87 \text{ п.кул.в.}$$

Фактическая продолжительность впрыска

$$\varphi_k = \Delta\varphi_г = 1{,}62 \cdot 7{,}87 = 12{,}75 \text{ п.кул.в.}$$

В общих расчетах первоначально оценим давление впрыска для абсолютно жесткой системы привода ТНВД, при которой реальная продолжительность φ_k впрыска будет равна его геометрической продолжительности $\varphi_г$, а число оборотов кулачкового вала при впрыске соответствует его номинальному значению $n_k^0 = 750$ об/мин$^{-1}$.

Очевидно, что при реальной (с учетом наличия упругости) продолжительности впрыска $\varphi_k^0 = 12{,}75$ п.кул.в. угловая упругая деформация кулачкового вала составит $\Delta\varphi_г = \varphi_k^0 - \varphi_k =$ $= 12{,}75 - 8{,}87 = 4{,}88$ п.кул.в. (или 0,085 рад), а соответствующее число оборотов кулачкового вала ТНВД в этом случае составит

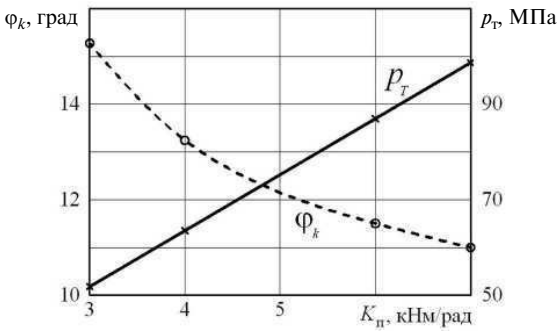


Рис. 2. Основные параметры впрыска топливоподачи дизеля 6ЧН $^{21}/_{21}$ в функции условной жесткости привода ТНВД ($K_п$):
$p_г$ — максимальное давление впрыска топлива;
φ_k — фактическая продолжительность впрыска по углу поворота кулачкового вала

$$n_k^0 = 750 \frac{7{,}87}{12{,}75} = 462{,}94 \text{ мин}^{-1}.$$

Тогда давление впрыска для абсолютно жесткого варианта привода

$$p_т = p_{т0}\left(n_k / n_k^0\right)^2 = 73{,}5(750/462{,}94)^2 =$$

$$= 192{,}9 \text{ МПа}.$$

В то же время сама жесткость привода для упругого варианта составляет

$$K_п = \frac{\pi d_п^2}{4\Delta\varphi_г} p_T \frac{R_0 + r_0 + h_m}{\sqrt{\left[\frac{(\varepsilon_0 R_m + r_0)\omega_k^0}{c_m^0}\right]^2 - 1}}.$$

Применительно к последнему расчетному выражению прежде следует оговориться, что для конкретной системы топливоподачи средняя скорость плунжера всегда пропорциональна угловой скорости кулачка, приводящего плунжер в движение, и потому отношение их числовых значений есть величина постоянная, независимо от частоты вращения кулачкового вала и в данном случае равная

$$\frac{\omega_k^0}{C_k^0} = \frac{\omega_k}{C_m} = \frac{\pi n_k}{30 C_m} = \frac{3{,}14 \cdot 750}{30 \cdot 1{,}99} = 39{,}45.$$

Поскольку сказанное справедливо и для соотношений $c_m / \omega_к$, то по данным упомянутой работы* получаем

$$\frac{C_m}{(R_m + r_0)\omega_k} = \frac{1{,}99 \cdot 10^2}{(4{,}2 + 2{,}0)78{,}5} = 0{,}409,$$

$$\frac{r_0}{R_m} = \frac{2{,}0}{4{,}2} = 0{,}48$$

Отсюда (см. рис. 1)

$$R_m = R_0 + h_п / 2 = 36 + 12/2 = 42 \text{ мм},$$

и конструктивный фактор равен $\varepsilon_0 = 1{,}075$.

Тогда «суммарная» жесткость реальной системы топливоподачи двигателя 6ЧН $^{21}/_{21}$ равна

$$K_п = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}6^2 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 0{,}085} 73{,}5 \cdot 10^6 \times$$

$$\times \frac{3{,}6 + 2{,}0 + 0{,}6}{\sqrt{\left[\frac{(1{,}075 \cdot 4{,}2 + 2{,}0) \cdot 39{,}45}{1{,}99 \cdot 10^2}\right]^2 - 1}} = 4{,}55 \cdot 10^3 \frac{\text{Нм}}{\text{рад}}.$$

Относительное запаздывание начала впрыска топлива

$$\Delta\varphi = \frac{3{,}14\cdot 1{,}6^2\cdot 10^{-4}}{4\cdot 4{,}55\cdot 102}22\cdot 10^6\times$$

$$\times\frac{(3{,}6+2{,}0+0{,}6)\cdot 10^{-2}}{\sqrt{\left[\frac{(1{,}075\cdot 4{,}2+2{,}0)\cdot 39{,}45}{10^2}\right]^2-1}} = 0{,}085 \text{ рад},$$

или 1,48° п.кул.в..

По приведенным выше формулам, результаты расчета для значений жесткости $K_п$ = 3; 4; 6; 7 кНм/рад , как и для значения $K_п$ = 4,55 кНм/рад, представлены в таблице, а графически — на рис. 2.

Как видим, в зависимости от жесткости привода параметры топливоподачи существенно изменяются.

Так, в рассматриваемых довольно узких пределах изменения жесткости привода запаздывание момента начала впрыска топлива $\Delta\varphi_k$, соответствующее давлению открытия иглы форсунки p_0 =22 МПа, изменяется более чем вдвое — от 2,21° до 0,95° п.кул.в. (см. таблицу), а по мере увеличения жесткости привода общая продолжительность впрыска убывает более чем на 4° п.кул.в. и давление впрыска возрастает на 47 МПа (см. рис. 2).

При этом в случае абсолютной жесткости привода ТНВД продолжительность впрыска составляет всего 7,87° п.кул.в., а максимальное давление впрыска $p_т$ равно 192,9 МПа.

Следует заметить, что двигатель 6ЧН $^{21}/_{21}$ является четырехтактным, и, следовательно, реальная продолжительность впрыска топлива уже по углу поворота коленчатого вала, собственно и определяющая характер протекания рабочего процесса, должна быть удвоена против таковой для кулачкового вала.

В то же время растягивание процесса топливоподачи достаточно существенно влияет на сокращение процесса истинного расширения рабочего тела (увеличивается период предварительного расширения), что снижает степень использования теплосодержания последнего и экономичность теплового процесса.

В частности, представляется, что по указанной причине для рассматриваемого дизеля 6ЧН $^{21}/_{21}$ вариант привода с жесткостью $K_п$ = 3 кНм/рад и менее не может быть рекомендован, поскольку общая продолжительность впрыска в данном случае составит более 30° п.кол.в. (φ_k =15,26° п. кул.в.), т. е. будет недопустимо большой.

В общем итоге представляется, что рассмотренная методика математической оцен-

Основные параметры топливоподачи дизеля 6ЧН $^{21}/_{21}$ в функции жесткости привода ТНВД ($K_п$)

$K_п$		$\Delta\varphi_г$, град	φ_k, град	n_k, мин$^{-1}$	$p_т$, МПа	$\Delta\varphi_k$, град
кНм/рад	кНм/град					
1,00	0,52	7,39	15,26	386,8	51,31	2,21
4,00	0,69	5,54	13,41	440,2	66,4	1,66
4,55	0,79	4,88	12,75	462,9	73,5	1,46
6,00	1,05	3,70	11,57	510,2	89,3	1,11
7,00	1,23	3,16	11,03	535,1	98,2	0,95

$d_п$ = 16 мм; $h_п$ = 12 мм; n_k =750 п.кул.в.; α_k^* 50 п.кул.в.; $\varphi_г$ = 7,87 п.кул.в.; C_m = 1,99 м/с; R_0 = 36 мм; r_0 = 20 мм; R_m = 42 мм; $W_г$ = 390 м/с^2; $p_т$ = 73,5 МПа

ки основных параметров топливоподачи в функции жесткости привода позволит существенно сократить время, связанное с модернизацией существующих или созданием новых дизелей.

Кстати говоря, в практике дизелестроения уже неоднократно имели место случаи, требующие дополнительных затрат времени на доводку топливной аппаратуры, в частности при переходе от одноцилиндрового опытного отсека дизеля к многоцилиндровому его варианту, причем именно по причине растягивания процесса топливоподачи из-за недостаточной жесткости, привода ТНВД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Тепловые двигатели. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст]: Учебное пособие.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— С. 70–72, 77, 78.

УДК 625.7/8.002

А.Я. Башкарёв, Д.В. Мусияко, В.С. Пешков

ВИБРАЦИОННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПЛОТНИТЕЛЯ

В современной строительной технике широко применяются малогабаритные вибрационные уплотнители — виброплиты, преимущество которых связано с их относительно небольшой массой и возможностью выполнять работы в стесненных условиях.

Как правило, в конструкции таких уплотнителей применяют вибровозбудители ненаправленного действия. При этом эффект самоперемещения уплотнителя по обрабатываемой поверхности возможен лишь при определенном расположении вибровозбудителя относительно центра его массы*. До последнего времени оно находилось опытным путем на экспериментальных образцах. В предлагаемой статье расположение вибровозбудителя относительно центра массы всей системы определяется с помощью математической модели. Одновременно находится условие, при котором одна кромка уплотняющей плиты — всегда в контакте с уплотняемой поверхностью, благодаря чему уплотнитель удерживается от сползания на поперечных уклонах. Обосновывается также возможность создания комбинированной конструкции уплотнителя, объединяющей валец и плиту. Главное преимущество такой конструкции по сравнению с уже известными — облегченное перемещение в нерабочем положении.

Схема сил, действующих на вибрационный уплотнитель, представлена на рис. 1. Здесь обозначены: G — общий вес уплотнителя; m — масса уплотнителя; h, c, b, a — геометрические размеры; F — сила трения со знаком скорости; f — коэффициент трения; P — возбуждающая сила вибратора; R — реакция грунта; α — угол поворота уплотнителя относительно задней кромки A опорной плиты, которая не должна отрываться от уплотняемой поверхности.

Запишем уравнения равновесия сил:

$$\frac{G}{g}\ddot{x} = P_x - Rf\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}; \qquad (1)$$

$$\frac{G}{g}\ddot{y} = P_y - G + R; \qquad (2)$$

$$Y_a\ddot{\alpha} = P_y a - P_x c - Gb - \frac{G}{g}\ddot{y}b + \frac{G}{g}\ddot{x}h. \qquad (3)$$

В уравнении (3) момент силы R равен 0, так как она смещена в точку A.

Поскольку при малых углах $\mathrm{tg}\alpha = \alpha$, то $y = (\mathrm{tg}\alpha)b$ превращается в $y = \alpha b$. Тогда

$$\ddot{y} = \ddot{\alpha}b \Rightarrow \ddot{\alpha} = \frac{\ddot{y}}{b};$$

$$Y_a = \frac{G}{g}b^2.$$

Подставив полученные выражения в уравнение (3), получаем

$$\frac{G}{g}b\ddot{y} = P_y a - P_x c - Gb - \frac{G}{g}\ddot{y}b + \frac{G}{g}\ddot{x}h. \qquad (4)$$

Преобразуем уравнение (4), подставив в него выражения (1) и (2):

$$b\left(P_y - G + R\right) =$$

$$= P_y a - P_x c - Gb - b(P_y - G + R) + h(P_x - Rf\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}). \qquad (5)$$

После преобразования выражения (5) выразим R:

$$R = \frac{P_y(a-2b) + P_x(h-c) + Gb}{2b + fh\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}}. \qquad (6)$$

* **Блехман, И.И.** Вибрационное перемещение [Текст] / И.И. Блехман, Г.И. Джанелидзе.— Л.: Машиностроение, 1966.

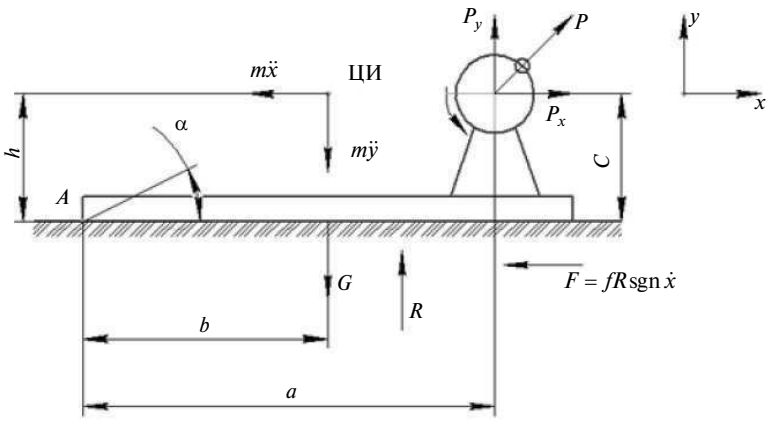


Рис. 1. Схема сил, действующих на вибрационный уплотнитель

Добиваемся того, чтобы реакция R всегда была положительной, т. е. чтобы отрыва кромки в точке A не происходило.

Зададимся следующим условием: пусть $a = 2b$, тогда

$$R = \frac{P_x(h-c)+Gb}{2b+fh\operatorname{sgn}\dot{x}}. \qquad (7)$$

Знаменатель всегда положителен, поскольку $2b$ всегда больше hf.

Чтобы величина R в формуле (7) была всегда положительной, необходимо выполнение следующего условия:

$$P_x(h-c)+Gb>0.$$

Таким образом, условие, при котором отрыва поверхности виброуплотнителя от поверхности грунта происходить не будет, следующее:

$$P_x < \frac{Gb}{c-h};$$

$$P_x^{\max} < \frac{Gb}{c-h};$$

$$P < \frac{Gb}{c-h}. \qquad (8)$$

Рассмотрим конструкцию виброуплотнителя, у которого задняя кромка плиты выполнена в виде вальца. При перемещении виброуплотнителя в нерабочем состоянии валец помогает достаточно легко перекатывать его с одного места на другое. Кроме того, при такой конструкции вся уплотняющая поверхность отрывается от уплотняемой поверхности, т. е. работает в более эффективном режиме вибротрамбования. Схема такой конструкции изображена на рис. 2. Здесь обозначены: G_1 — вес вальца; G_2 — вес

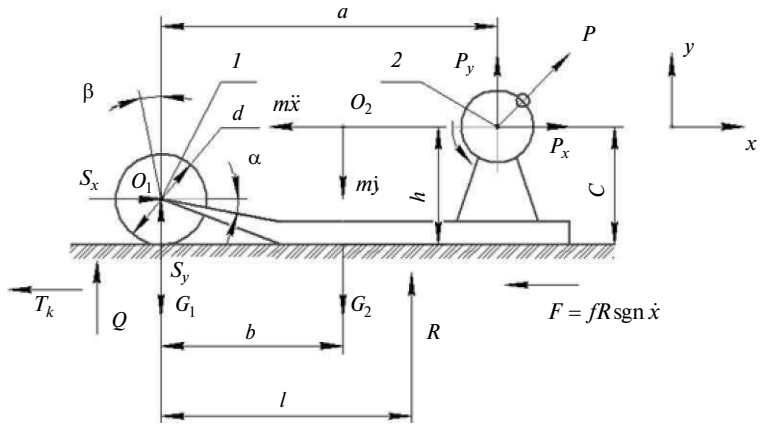


Рис. 2. Схема сил, действующих на вибрационный уплотнитель с задней кромкой в виде вальца

вибрирующей рамы с вибратором; O_1 — центр вальца; O_2 — центр инерции системы вибратора; O_3 — центр вибратора; S_x и S_y — реакции в точке крепления рамы к оси вальца; Q — реакция под вальцом со стороны опорной поверхности; T_k — сила сопротивления качению (перекатыванию) катка; α — угол отклонения рамы уплотнителя относительно оси вальца; β — угол поворота вальца; f — коэффициент трения скольжения; μ — коэффициент сопротивления качению; $F = Rf\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}$; $T_k = Q\mu\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}$.

На валец со стороны рамы действуют те же силы S_x и S_y, но с обратным знаком.

Общий вес уплотнителя — $G = G_1 + G_2$.

В силу жесткой горизонтальной связи будет $x_1 = x_2 = x$.

Напишем уравнения равновесия сил для вальца, соблюдая указанные на рисунке направления сил:

$$\frac{G_1}{g}\ddot{x} = S_x - Q\mu\,\mathrm{sgn}\,\dot{x}; \qquad (9)$$

$$\frac{G_1}{g}\ddot{y}_1 = S_y + Q - G_1; \qquad (10)$$

$$Y_b\ddot{\beta} = Q\mu\ \mathrm{sign}\ \dot{x}\frac{d}{2}. \qquad (11)$$

Из рисунка видно, что

$$\beta = \frac{2x}{d};$$

$$\ddot{\beta} = \frac{2\ddot{x}}{d}.$$

Y_b — момент инерции вальца относительно собственной оси.

Выражение (11) запишем в следующем виде:

$$2Y_b\frac{\ddot{x}}{d} = Q\mu\frac{d}{2}\,\mathrm{sign}\,\dot{x}. \qquad (12)$$

Уравнения равновесия сил, действующих на уплотняющую часть виброуплотнителя, с учетом указанных на рисунке направления сил:

$$\frac{G_2}{g}\ddot{x} = P_x - S_x - Rf\,\mathrm{sign}\,\dot{x}; \qquad (13)$$

$$\frac{G_2}{g}\ddot{y}_2 = P_y + r - S_y - G_2; \qquad (14)$$

$$Y_0\ddot{\alpha} = P_y a - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) + Rl - Rf\frac{d}{2}\,\mathrm{sign}\,\dot{x} +$$

$$+\frac{G_2}{g}\ddot{x}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{g}\ddot{y}_2 b - G_2 b. \qquad (15)$$

Рассмотрим режим, в котором большую часть времени опорная уплотняющая часть виброуплотнителя находится в воздухе, т. е. не опирается на уплотняемую поверхность, воздействуя на нее лишь импульсом удара. Следовательно, $R = 0$.

Кроме того, рассматривается режим, когда задний валец не отрывается от опорной поверхности (обязательное условие для этого найдем ниже). Пока считаем, что $y_1 = \mathrm{const} = 0$, а следовательно, $\ddot{y}_1 = 0$. Тогда из выражения (10) получаем

$$S_y = G_1 - Q. \qquad (16)$$

Из рисунка видно, что

$$\alpha = \frac{y_2}{b};$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{\ddot{y}_2}{b}.$$

Тогда выражение (15) с учетом $R = 0$ можно переписать в виде

$$Y_o\frac{\ddot{y}_2}{b} = P_y a - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g}\ddot{x}\left(h - \frac{d}{2}\right) -$$

$$-\frac{G_2}{g}\ddot{y}_2 b - G_2 b. \qquad (17)$$

Сделав подстановку из выражения (14) в выражение (17), получим

$$Y_o\frac{g}{bG_2}\left(P_y - S_y - G_2\right) == P_y a - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) +$$

$$+\frac{G_2}{g}\ddot{x}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(P_y - S_y - G_2\right)b - G_2 b. \qquad (18)$$

С учетом (16) выражение (18) примет вид

$$Y_o\frac{g}{bG_2}\left(P_y + Q - G_1 - G_2\right) = P_y a - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) +$$

$$+\frac{G_2}{g}\ddot{x}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(P_y + Q - G_1\right)b. \qquad (19)$$

После сложения правых и левых частей выражений (9) и (13) с учетом $R = 0$ получаем

$$\ddot{x} = (P_x - Q\mu\ \mathrm{sign}\,\dot{x})\frac{g}{G_1 + G_2}. \qquad (20)$$

Подставим (20) в выражение (19):

$$Y_o \frac{g}{bG_2}\left(P_y + Q - G_1 - G_2\right) =$$

$$= P_y a - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g}\left[(P_x - Q\mu \ \mathrm{sign}\,\dot{x})\frac{g}{G_1 + G_2}\right] \times$$

$$\times\left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(P_y + Q - G_1\right)b. \qquad (21)$$

Выполним преобразования выражения (21):

$$Q\left[Y_o \frac{g}{bG_2} + \mu \ \mathrm{sign}\,\dot{x}\frac{G_2}{G_1 + G_2}\left(h - \frac{d}{2}\right) + b\right] =$$

$$= -Y_o \frac{g}{bG_2}\left(P_y - G_1 - G_2\right) + P_y a +$$

$$+ P_x\left[\frac{G_2}{G_1 + G_2}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(c - \frac{d}{2}\right)\right] - \left(P_y - G_1\right)b.$$

Пусть $Y_o = \frac{G_2}{g}b^2$. Тогда

$$Q = \frac{A}{2b + \mu \ \mathrm{sign}\,\dot{x}\frac{G_2}{G_1 + G_2}\left(h - \frac{d}{2}\right)}, \qquad (23)$$

где $A = P_y a + P_x\left[\frac{G_2}{G_1 + G_2}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(c - \frac{d}{2}\right)\right] -$

$$-2b\left(P_y - G_1 - \frac{G_2}{2}\right).$$

Предположим, что в конструкции заложено $h = \frac{d}{2}$, т. е. центр тяжести вибрирующей части расположен на высоте оси вальца. Тогда с учетом $G = G_1 + G_2$ выражение (23) примет следующий вид:

$$Q = \frac{P_y(a - 2b) - P_x\left(c - \frac{d}{2}\right) + b\left(G + G_1\right)}{2b}. \qquad (24)$$

При выполнении еще одного конструкторского решения, а именно $a = 2b$, выражение (24) примет вид

$$Q = -P_x i + \frac{\left(G + G_1\right)}{2}, \qquad (25)$$

где $i = \left(c - \frac{d}{2}\right)/2b.$

Запишем условие, при котором Q всегда больше 0:

$$P_x^{\max} < \frac{\left(G + G_1\right)}{2i};$$

$$P < \frac{\left(G + G_1\right)}{2i}. \qquad (26)$$

Таким образом, компоновку вибрационного уплотнителя с вальцем должна нужно производить в следующей последовательности:

1. Проектирование отдельно конструкции вибровозбудителя, вальца и уплотняющей плиты, в процессе чего определяется их масса. При этом должно выполняться условие: радиус вальца равен высоте расположения центра инерции плиты и вибровозбудителя, что обеспечивает справедливость выражения (24).

2. Определение места расположения возбудителя на плите, причем он должен быть сдвинут вперед относительно оси вальца на величину в 2 раза большую, чем расположение центра инерции.

3. Установление возбуждающей силы вибровозбудителя с помощью дебалансов и частоты их вращения так, чтобы выполнялось условие (26), благодаря чему валец всегда будет в контакте с уплотняемой поверхностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блехман, И.И.** Вибрационное перемещение [Текст] / И.И. Блехман, Г.И. Джанелидзе.— Л.: Машиностроение, 1966.

УДК 531:517.2

М.Р. Петриченко

ЭКСТРЕМАЛИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, СВОБОДНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ И «ПРИНЦИП МИНИМУМА ДИССИПАЦИИ» ДЛЯ БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКОВ

Обычно вариационные принципы в механике возникают как достаточные условия, разделяющие действительные и виртуальные (допустимые, совместимые со связями) движения. Необходимые условия экстремума трактуются как уравнения движения. Можно обратить задачу. Пусть известны феноменологические уравнения движения. Спрашивается: возможно ли трактовать эти уравнения как необходимые условия экстремума для некоторого действия (функционала) и, если возможно, то как устроен функционал? Общее решение этой задачи содержится в так называемом методе удвоения переменных Ю.Г. Павленко.

Существует известная задача о построении кривой свободной поверхности потока как однопараметрической группы диффеоморфизмов $g^x : h' \to h,\ \ x > 0,\ \ g^0 h = h'$ глубин потока $h = h(x)$ вдоль директории (продольной координаты x). В этой задаче функционал строить не надо, т. к. исходное уравнение равносильно канонической (гамильтоновой) системе, обладающей интегралом энергии. Этот интеграл совпадает с интегралом Бернулли для потока в целом — ситуация редкая для диссипативной системы. Вопрос о действии решается однозначно: плотность лагранжиана совпадает с двойственной по отношению к интегралу энергии функцией. Обнаруживается по ходу доказательства, что характеристика дифференциального уравнения Лагранжа — свободная поверхность.

1. Пусть выполняется «уравнение неравномерного движения»

$$\frac{dh}{dx} = N\left(i - i_f\right), \qquad (1)$$

где $h = h(x)$ — глубина потока как функция координаты x, отсчитываемой вдоль потока; N: $= dh/d$Э; Э — удельная энергия сечения; i, i_f — соответственно уклоны дна и трения; $i_f := dh_f/dx > 0$, знак i произволен.

Справедлива такая **лемма 1**: уравнение (1) находится среди необходимых условий минимума для следующих положительных функционалов:

$$1)\ S(h) = \int_0^L \left(\left(\frac{dh}{dx}\right)^2 + N^2\left(i - i_f\right)^2 \right) dx;$$

$$2)\ \Xi(\mathrm{h}) = \int_0^L \left(\frac{dh}{dx} - N\left(i - i_f\right) \right)^2 dx.$$

Здесь $L > 0$ — длина потока. Для того чтобы $\delta S = 0$, $\delta\Xi = 0$ (δ — изометрическая вариация, не изменяющая L), необходимо, чтобы решения (1) находились в пучке экстремалей функционалов $S(h)$ и $\Xi(h)$.

Более общий результат содержит **лемма 2**: уравнение (1) равносильно канонической системе с гамильтонианом $E(x, h) = H_e + h_f$, где H_e — полный напор. Действительно, достаточно записать уравнение (1) в виде следующей системы с параметром t:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{N} = \frac{\partial E}{\partial h};$$

$$\frac{dh}{dt} = i - i_f = -\frac{\partial E}{\partial x}, \qquad (2)$$

чтобы убедиться в необходимости существования интеграла энергии $E = \mathrm{const}$. Достаточность существования интеграла энергии очевидна. Уравнение (1) и, как следствие, система (2) получаются из интеграла энергии $E = \mathrm{const}$.

Лемма 2 допускает простое обобщение. Пусть используются обозначения Монжа:

$$p := \frac{\partial h_f}{\partial x};\ q := \frac{\partial h_f}{\partial h};\ r := \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2};\ s := \frac{\partial^2 h_f}{\partial x \partial h};\ t = \frac{\partial^2 h_f}{\partial h^2}.$$

Тогда

$$i_f = \frac{p + iNq}{1 + qN};$$

$$\frac{dh}{dx}=\frac{i-p}{q+\frac{1}{N}}$$

и существует гамильтониан $G(x, h)$ такой, что

$$\frac{\partial G}{\partial x}=p-i;$$

$$\frac{\partial G}{\partial h}=q+\frac{1}{N}.$$

Значит, гамильтонианы $E(x, h)$, $G(x, h)$ связаны следующими тождествами в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial h}(G-E)=q;$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(G-E)=p-i_f. \qquad (3)$$

Эти тождества можно рассматривать как систему уравнений для определения функции $K(x, h) := G(x, h) - E(x, h)$. Тогда:

1) из первого равенства получается $K = h_f + f(x)$, где $f(x)$ — произвольная функция своей переменной. Из второго равенства $p - i_f = p + f'(x)$, откуда $f = -h_f + \text{const}$. Значит, $K = E - G = \text{const}$, и оба гамильтониана — $E(x, h)$ и $G(x, h)$ —эквивалентны;

2) из тождеств (3) дифференцированием по x первой строчки и по h второй строчки получаются равенства

$$s_G - s_E = s;$$

$$s_G - s_E = s - \frac{\partial i_f}{\partial h}. \qquad (3a)$$

Значит, $\frac{\partial i_f}{\partial h}=0$, $\frac{\partial i_f}{\partial x}=\frac{di_f}{dx}$;

3) из тождеств (3) дифференцированием по h первой строчки и по x второй строчки и с учетом п. 2 получается равенство

$$r+t=\frac{di_f}{dx}. \qquad (4)$$

Можно рассматривать (4) как дифференциальное уравнение для определения h_f. Это уравнение в силу тождеств (1), (2) можно записать так:

$$Nq(1+Nq)r+(1+Nq)^2=N(i-p)s. \qquad (4a)$$

Уравнение (4) приводится в [1, 2]. Там же получены первые и полные интегралы этого уравнения и каустики. Начиная с этого места $N = 1$, т. е. $Э = h$ (фильтрационные потоки).

Тогда (4*а*) записывается так:

$$q(1+q)r+(1+q)^2t=(i-p)s. \qquad (4б)$$

Уравнение (4*б*) изучено в [3]. В известной монографии И.Я. Бакельмана [4] используются методы вариационного исчисления для решения нелинейных уравнений типа (4)—(4*б*). Для дальнейшего целесообразно применять более простой интуитивный подход, не претендующий на строгость.

2. Справедлива такая **квазитеорема 1**: пусть

$$S(h)=\int_{X\times H} i_f dxdh=\int_{X\times H} dh_f dh$$

есть функционал, изображающий полное изменение уклона трения на допустимом множестве X координат и глубин H при фиксированном расходе и форме русла. Тогда $S(h)$ достигает экстремума на действительной траектории потока. При этом характеристика уравнения Лагранжа для $S(h)$ совпадает с кривой свободной поверхности. Иначе: для реализации минимума $S(h)$ необходимо, чтобы свободная поверхность совпадала с характеристикой уравнения Лагранжа для $S(h)$ и чтобы расслоение потока погружалось в пучок экстремалей $S(h)$. Доказательство первого утверждения очевидно.

*В силу (1) плотность лагранжиана для действия $S(h)$ равна

$$\sigma(p,q):=\frac{dS}{d\Omega}=\frac{i-p}{1+q},$$

где $d\Omega = dx\,dh$ — элемент фазового объема. Уравнение Лагранжа

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial p}\right)+\frac{\partial}{\partial h}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial q}\right)=0$$

в данном случае имеет вид

$$s+\frac{i-p}{1+q}t=0. \qquad (5)$$

Уравнение (5) — параболического типа с характеристикой

$$\frac{dh}{dx}=\frac{i-p}{1+q},$$

что и требовалось доказать.

* «Звездочки» (*) отделяют доказательство от основного текста.

Вдоль характеристики $\frac{dq}{dh}=0$. Тогда $q=f(x)$, $h_f=hf(x)+g(x)$. Пусть $f(x) = -1$, $g(x) = ix + h'$. Тогда вдоль характеристики выполняется интеграл Бернулли. Расслоение потока характеристиками, совпадающими со свободными поверхностями, необходимо для выполнения условия $S \to \text{extr}\ (\min \geq 0,\ \max \leq 0)$*.

Получается, что действительное безнапорное движение реализует минимум потерь напора и что расслоение потока $(h' \in H) \overset{(x \in X)}{\to} (h \in H)$, т. е. его свободная поверхность, погружается в пучок экстремалей действия. Этот результат можно конкретизировать, выделив класс «наилучших» движений.

Квазитеорема 2: для минимума действия

$$\Xi(h) := \int\limits_{X \times H} (i - i_f)^2\, dxdh = \|i - i_f\|^2$$

необходимо, чтобы свободная поверхность потока совпадала с экстремалью.

Действительно, уравнение Лагранжа для $\Xi(h)$ имеет вид

$$(1+q)^2 r - 4s(p-i)(1+q) + 3(p-i)^2 t = 0\ . \quad (5a)$$

Уравнение (5*а*) гиперболического типа с характеристиками, удовлетворяющими уравнению

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)^2 - 4j\left(\frac{dh}{dx}\right) + 3j^2 = 0,$$

где $j = \frac{i-p}{1+q}$ — уклон свободной поверхности. Следовательно, одна из характеристик уравнения Лагранжа (5*а*), $dh/dx = j$, совпадает со свободной поверхностью. Вдоль этой характеристики уравнение (5*а*) принимает вид

$$dp + 3\frac{i-p}{1+q}dq = 0\ . \quad (5б)$$

В (5*б*) переменные разделяются, и тогда

$$p = i - C_1(1+q)^3$$

есть первый интеграл (5*а*) и (5*б*), C_1 — постоянная. Этот промежуточный интеграл суть уравнение Клеро. Тогда полный интеграл (5*а*) и (5*б*) равен

$$h_f = ix - C_1(1+q)^3 + q(h-h')\ . \quad (6)$$

Особое решение, выделяемое из полного интеграла (6), (каустика) имеет вид

$$h - ix + h_f = h' \pm \frac{2}{3\sqrt{3}}\sqrt{\frac{(h-h')^3}{C_1 x}}\ . \quad (7)$$

Второе слагаемое в правой части (7) при $x \to \infty$ мало и изображает коррекцию потерь напора, обусловленную неравномерностью движения. Иначе: потери напора при квазиравномерном движении отличны от потерь напора при равномерном движении и величина отличия имеет порядок

$$O\left(\sqrt{\frac{|h-h'|^3}{x}}\right) = O\left(|h-h'|\sqrt{|j|}\right).$$

Поэтому интеграл (7) можно записать так (берется верхний знак и исключается C_1):

$$h_f = (h_f)_{\text{В}} + (h-h')\sqrt{|j|}, (h_f)_{\text{В}} := h' - h + ix\ . \quad (7a)$$

Интеграл (7а) учитывает релаксацию потерь напора, связанную с неравномерностью движения: он преувеличивает действительные потери напора по сравнению с потерями напора по интегралу Бернулли в движениях с j > 0 и преуменьшает потери напора в движениях с кривой спада (j < 0).

Итак:

свободная поверхность безнапорного потока совпадает с характеристикой уравнения Лагранжа для минимума (экстремума) потерь напора. Следовательно, расслоение потока характеристиками погружается в пучок экстремалей, вдоль которых потери напора (и — при постоянном расходе — диссипация) минимальны;

действительные квазиравномерные движения минимально отклоняются от движений равномерных: всегда для потока $\|i - i_f\|_{L_2} \to \inf \geq 0$.

Следовательно, равномерное движение доставляет абсолютный (актуальный) минимум диссипации: $\int\limits_{\Omega} i_f d\Omega \underset{j \to \pm 0}{\to} \inf ess$.

Хотя все вычисления ограничены значением $N = 1$, сказанное остается справедливым и для $\forall N \in (-\infty,\ +\infty)$ [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бухарцев, В.Н.** Экстремальные свойства безнапорных потоков [Текст] / В.Н. Бухарцев, М.Р. Петриченко // Сб.: Механика и процессы управления.— УНЦ.— Екатеринбург, 2006.— С. 79–84.

2. **Бухарцев, В.Н.** Канонические уравнения и необходимые условия минимума диссипации для безнапорных потоков [Текст] / В.Н. Бухарцев, М.Р. Петриченко // Сб.: Механика и процессы управления / УНЦ. — Екатеринбург, 2007.— С. 77–85.

3. **Бухарцев, В.Н.** Гидравлическая форма условия минимума диссипации для безнапорных потоков в призматических руслах [Текст] / В.Н. Бухарцев, М.Р. Петриченко // Инженерно-строительный журнал.— 2008. №2.— С. 5–7.

4. **Бакельман, И.Я.** Геометрические методы решения эллиптических уравнений [Текст] / И.Я. Бакельман.— М.: Наука, 1966.— 340 с.

УДК 533.6.011:621.165

А.В. Григорьев, А.И. Якунин, Н.Б. Кузнецов,
В.Ф. Кондратьев, Н.Н. Кортиков

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО РОТОР-СТАТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Пульсации параметров течения, вызванные ротор-статорным взаимодействием в ступенях осевой турбины (*«clocking»* эффект), составляют от 5 до 20 % осредненных по времени значений при типичных осевых зазорах. Столь значительный уровень колебаний скорости потока приводит к тому, что реальные газодинамические характеристики ступени (потери полного давления, КПД, излучаемый тональный шум) отличаются от тех, которые ожидаются в предположении стационарности течения в каждом венце. Изучение пульсаций давления и скорости, связанных с взаимодействием лопаточных венцов, позволяет улучшать аэродинамическое совершенство и надежность будущих поколений авиадвигателей [1].

Пространственное CFD-моделирование лопаточных венцов турбины — самый важный этап в аэродинамическом совершенствовании современных турбин. С развитием вычислительных методов и средств вычислительной техники развивалось моделирование лопаточных венцов — от стационарного решения в одном лопаточном венце до нестационарного решения в многоступенчатых турбомашинах.

Стационарное решение в одном лопаточном венце получается быстро, но оно требует предварительной информации о смежных решетках. Стационарное решение для многоступенчатых турбомашин использует подход «*mixing plane*», позволяющий связывать между собой смежные лопаточные венцы. Ограничение в данном методе вызвано осреднением параметров потоков в окружном направлении между лопаточными венцами. Несмотря на такие ограничения, расчет многоступенчатых турбомашин с использованием «*mixing plane*» представляет собой разумный компромисс между точностью и вычислительными ресурсами и, следовательно, остается ценным и мощным инструментом для проектировщика [2].

Поскольку турбины достаточно эффективны, то дальнейшее повышение их эффективности и надежности требует тонкого понимания таких наблюдаемых физических явлений, как распространение кромочного следа, взаимодействия кромочного следа с другими лопатками, ламинарно-турбулентный переход и т. д. Конструктор может использовать разнообразные приемы по улучшению проекта за счет выбора оптимального распределения нагрузки, расположения лопаток в окружном направлении и пр. Однако эффект от каждого способа должен быть оценен в контексте его взаимодействия с нестационарным потоком.

Моделирование нестационарного ротор-статорного (*transient rotor/stator — TRS*) взаимодействия связано с расчетом на сетке, учитывающей изменение во времени положения ротора относительно статора (скользящая сетка — *sliding mesh*). При этом подходе численное моделирование проводится применительно к полному рабочему колесу или кратному соотношению числа лопаток для статорной и роторной решеток ступени с использованием условий периодичности.

В случае нарушения условия кратности числа лопаток в ступени нестационарные вычисления, в которых возможно применение условия периодичности, выполняются на основе недавно развитого семейства методов расчета в лопаточных венцах, известных как «методы преобразования». В их число входят: «преобразование профиля», «преобразование времени» и «Фурье-преобразование» [3].

В методе «преобразование профиля (*PT*)», который является частью *TRS*, коррекция параметров на внутренних границах выполняется автоматически для случая, когда количество лопаток статора не кратно количеству лопаток ротора. В этом приближенном методе используется скользящая сетка, и течение в лопаточных

венцах с различным количеством лопаток моделируется без геометрического масштабирования или изменения геометрии лопатки. Условие периодичности применяется для каждого временного шага, и распределение параметров потока автоматически корректируется поперек роторстаторных интерфейсов посредством их вытягивания или сжатия для сохранения потоковых величин.

Метод «преобразование времени (*TT*)» может рассматриваться как коррекция метода *PT*. Согласно этому методу уравнения движения преобразованы во времени так, чтобы гарантировать периодичность границ. Метод поддерживает точность решения и правильность передачи данных между ротором и статором в случае некратного соотношения лопаток.

В методе «Фурье преобразования (*FT*)» история потока на границах расчетной области сохраняется. Для этих целей используют разложение в ряд Фурье, содержащий слагаемые с частотой вращения ротора, а также более высокие гармоники. Этот метод может быть расширен на многоступенчатые турбомашины.

Метод «гармонический баланса (*HB*)» был предложен, чтобы учесть динамические нелинейные эффекты и одновременно уменьшить время получения численного решения [4, 5]. Предполагается, что параметры нестационарного газового потока — периодические во времени и пространстве, как это имеет место в турбомашинах. Газодинамические параметры ищутся в виде временного ряда Фурье с частотами, кратность которых первоначальной частоте возбуждения выражается целыми числами [6, 7].

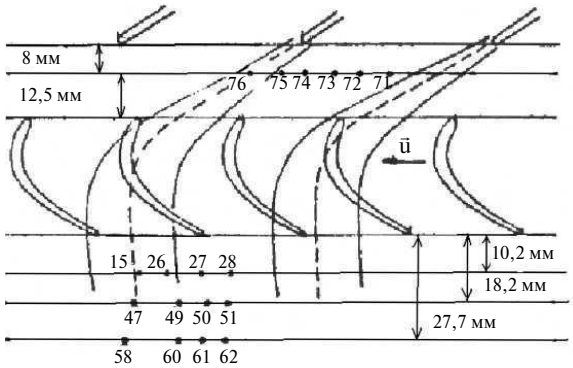


Рис. 1. Схема течения в экспериментальной воздушной турбине

В численном алгоритме в качестве искомых переменных выступают коэффициенты ряда Фурье. Ряд Фурье подставляют в нестационарные уравнения газовой динамики, а затем производят их «расщепление». В результате определяют набор упрощенных уравнений, имеющих одну и ту же гармонику. Решение этих уравнений хранится во множестве, соответствующем временным подуровням в пределах одного периода [8, 9].

Цель настоящей работы — апробация метода гармонического баланса (*HB*) для расчета нестационарных процессов. Апробация основана на сопоставлении результатов расчета с опытными данными для одноступенчатой осевой турбины ЛПИ [10] и данными, полученными по методу *TRS* с применением скользящей сетки. Все вычисления выполнены с помощью кода STAR CCM + 7.04.006.

Физическое моделирование

Физическое моделирование нестационарных явлений в турбинной ступени проводилось на экспериментальной воздушной турбине ЛПИ ЭТН-4 [10]. При создании стенда особое внимание было уделено обеспечению равномерного по окружности подвода воздуха с малой турбулентностью. Неравномерность потока по окружности перед направляющим аппаратом составляет 1 %, а степень турбулентности — 1,5 %. При создании стенда с целью уменьшения уровня вибраций применялись подшипники качения с увеличенным числом шариков.

Проточная часть турбины выполнена с постоянной высотой канала в меридиональной плоскости. Средний диаметр рабочего колеса — 430 мм при высоте лопаток 70 мм. Схема течения в этой экспериментальной воздушной турбине изображена на рис. 1. Геометрические характеристики решеток приведены в таблице.

Основным источником нестационарности потока в рабочем колесе турбины является неравномерность в кромочных следах за направляющими лопатками. Поэтому большой практический интерес представляет исследование влияния уровня неравномерности в следах на величину переменных аэродинамических сил и на характер нестационарного течения в межлопаточных каналах рабочего колеса.

Рабочие лопатки закреплены на массивном диске. Конструкция диска позволяет устанавли-

Геометрия ступени

Сечение	d, м	g_1, м	g_2, м	c_1, м	c_2, м	α_1, градус	β_1, градус	β_2, градус
Корневое	0,36	0,0471	0,0269	0,078	0,035	25°10′	34°16′	36°30′
Среднее	0,43	0,0562	0,0322	0,078	0,037	26°20′	58°25′	34°32′
Периферийное	0,50	0,0654	0,0374	0,078	0,043	28°20′	94°50′	30°16′

Здесь: c_1, c_2 — хорды сопловой и рабочей лопаток; g_1, g_2 — шаги в решетках; d — диаметр; α_1 — угол входа в направляющую решетку; β_1, β_2 — углы входа и выхода в рабочем колесе.

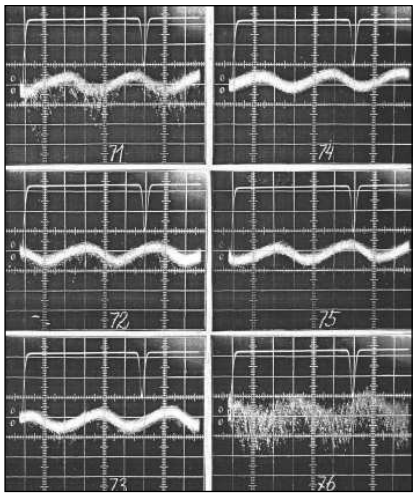
вать на нем специальные измерительные лопатки для изучения переменных аэродинамических сил. Измеряемая физическая величина преобразуется в электрический сигнал, который передается на вход измерительной и регистрирующей аппаратуры по проводам, уложенным в полом валу ротора, через охлаждаемый водой ртутный токосъемник. На валу ротора установлен диск датчика, вырабатывающего импульсное напряжение с заданной частотой. Датчик построен на основе фотодиода ФД-2.

В опытной турбине обеспечены широкие возможности для измерения шаговой неравномерности и параметров нестационарного потока в четырех сечениях проточной части для 18 измерительных точек (см. рис. 1). С этой целью наружный корпус с закрепленными на нем координатниками мог поворачиваться электродвигателем на 360°вокруг оси турбины. Количество направляющих лопаток — 24 шт. Количество рабочих лопаток — 48 шт.

Газовый поток в турбине — периодически нестационарный, поэтому необходимо измерение мгновенной скорости. Рис. 2, *а* показывает форму волны мгновенной скорости в осевом зазоре турбины. Запись формы волны осуществлялась электронным осциллографом, который связан с термоанемометром. В верхней части осциллограммы дается запись таймера сигнала положения лопатки.

Методика обработки осциллограмм заключалась в следующем. Сначала проводилась дискретизация осциллограммы и графическим интегрированием определялась средняя линия, которая соответствует средней скорости. Затем от нее проводился отсчет (в миллиметрах на экране осциллографа) с целью определения величины пульсаций. Измерение переменного во

а)



б)

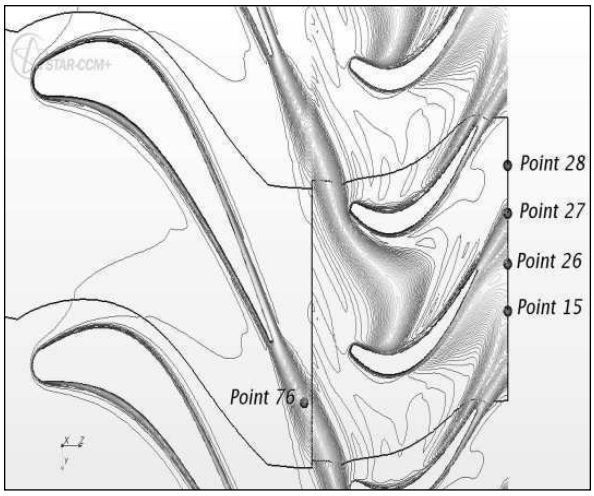


Рис. 2. Экспериментальные данные для мгновенной скорости в осевом зазоре турбины (*а*) и положение контрольных точек при численном моделировании (*б*)

времени давления на поверхности лопатки осуществлялось с помощью датчика давления. Датчик изготовлен в виде гибкой пластины, защемленной по периметру. Величина деформации пластины соответствовала измеряемому переменному давлению.

В процессе эксперимента на выходе рабочего колеса неподвижный зонд термоанемометра делал запись колебаний скорости, которые вызваны следующим: 1) неравномерным потенциальным полем лопаточного аппарата; 2) кромочными следами от рабочих лопаток; 3) возмущениями скорости, возникающими периодически на входе в каждый движущийся межлопаточный канал и проходящими через него, соответствующим образом трансформируясь. Как показано на рис. 2, *б*, кромочные следы от направляющего аппарата входят в межлопаточные каналы рабочего колеса в виде областей повышенной турбулентной вязкости.

Уровень флуктуаций скорости в точках мониторинга (это, в частности, точки 15, 25, 26, 27 и 28 на рис. 2, *б*) зависит от предистории, которая определяется особенностями течения газа около вогнутой и выпуклой поверхностей рабочей лопатки, а также геометрией ее выходной кромки. Как можно заметить (рис. 3), левый склон импульса сформирован регулярными пульсациями, что указывает на стабильный и устойчивый характер течения воздуха около выпуклой поверхности. На рисунке 3 также можно отметить, что уровень колебаний скорости уменьшается с увеличением расстояния от выходной кромки рабочей лопатки.

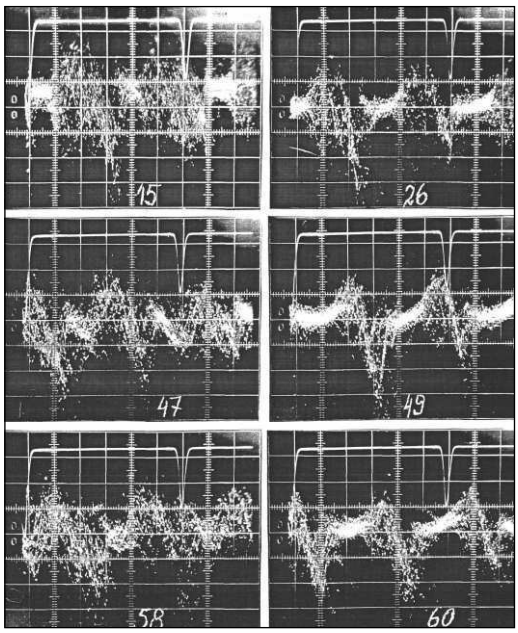
Значительный уровень представленных на осциллограммах (рис. 3) случайных (нерегулярных) колебаний скорости на правом склоне импульса указывает на высокую интенсивность турбулентности, развивающейся с вогнутой стороны рабочей лопатки.

Этот эффект вызван дестабилизирующим влиянием сил Кориолиса, в результате чего частица жидкости движется в направлении по нормали к вогнутой поверхности лопатки и тем самым увеличивает уровень турбулентных пульсаций около нее. На выпуклой поверхности влияние силы Кориолиса носит стабилизирующий характер.

Вычислительный метод

Нестационарное течение вязкого газа в лопаточных венцах турбомашин описывается уравнениями Навье — Стокса и энергии, записанными в интегральной форме для движущегося контрольного объема в относительной системе координат, вращающейся с угловой скоростью Ω.

а)



б)

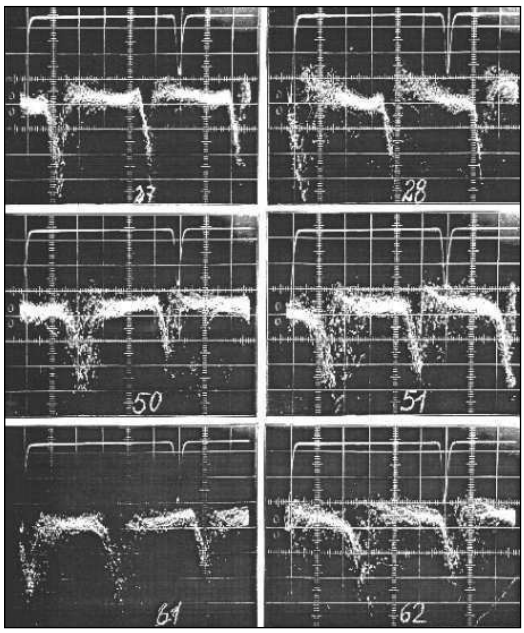


Рис. 3. Экспериментальные данные для мгновенной скорости позади рабочего колеса

Поскольку функция решения W — периодическая во времени, то она может быть представлена рядом Фурье

$$W(\vec{r},\tau)=\sum_{m=-M}^{M} W_m(\vec{r})\exp(i\omega m\tau), \qquad (1)$$

где ω — фундаментальная частота; M — число гармоник, сохраненных в решении; W_m — коэффициенты ряда Фурье.

Длины и частоты возмущений внутри венцов многоступенчатой турбомашины зависят от количества лопаток в решетках и скорости вращения ротора. В частности, возмущения, генерируемые в результате взаимодействия двух решеток с количеством лопаток B_1 и B_2, характеризуются окружными волновыми числами (нодальные диаметры), равными $N = m_1B_1 + m_2B_2$, где m_1 и m_2 — целые числа. Частоты этих возмущений вычисляются по формуле $\omega = n_2B_2\Omega$ для неподвижной области, $\omega = n_1B_1\Omega$ — для вращающейся области.

Дискретные аналоги уравнений для определения коэффициентов ряда (1) выводятся посредством применения метода контрольного объема, разбиения каждого объема на полигексаэдральные ячейки на основе схемы второго порядка точности. Дискретизация конвективных слагаемых уравнений проводится согласно противопоточной процедуре, а слагаемых, ответственных за перенос диффузией, — центральными разностями. Введение дополнительного слагаемого с локальной производной от псевдовремени позволило использовать маршевый метод и процедуру установления. Решение на каждом временном подуровне осуществлялось с помощью неявного метода Эйлера, и полученная система линейных алгебраических уравнений решалась с помощью многосеточного AMG-метода.

Условия периодичности в окружном направлении используются с целью уменьшения размеров вычислительной области и сведения к одному или двум межлопаточныи каналам.

Применение «неотражающих» условий на входной и выходной границах расчетной области позволяет избежать неустойчивых численных решений, которые могут возникнуть при наличии случайных возмущений в процессе отражения.

Чтобы получить решение для нулевой моды, соответствующее стационарному решению, применяются традиционные граничные условия, а именно: на входе задаются полные давления, температура и угол натекания потока, на выходе — статическое давление. Решения для высших гармоник строится на основе обратного Фурье-преобразования и результатов численного решения семейства уравнений для коэффициентов ряда (1) на каждом временном уровне.

Результаты расчетов

Метод гармонического баланса использует структурированную сетку типа HOH, которая создана для каждого из двух лопаточных венцов, как показано на рис. 4. Входные и выходные границы для каждого из лопаточных венцов соответствуют плоскостям, где известны экспериментальные данные. Расчетная сетка состоит из

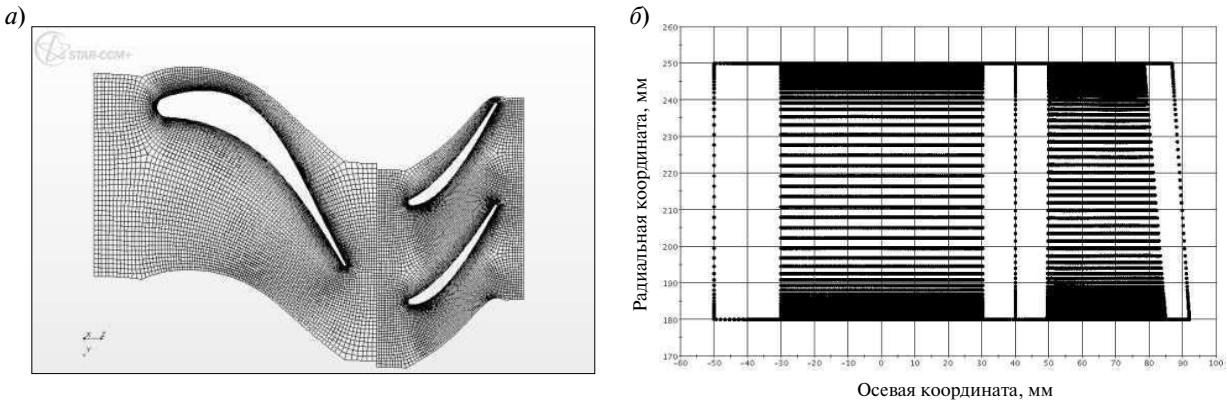


Рис. 4. Расчетная сетка для метода гармонического баланса и моделирования с применением скользящей сетки (*а*); меридиональное сечение ступени (*б*)

1,3 млн ячеек. Размер пристеночной ячейки составляет 0,01 мм.

Условия эксперимента соответствовали следующим величинам: полному избыточному давлению на входе 0,14 МПа; полной температуре 350 К; избыточному статическому давлению на выходе 0,0 МПа; угловой скорости вращения ротора, равной 5000 оборотов в минуту.

Чтобы обеспечить хорошее начальное приближение для *HB*-решателя используется специальная инициализация, в основе которой лежит решение стационарных уравнений Навье — Стокса с интерфейсом в виде «*mixing plane*», начиная с грубой и заканчивая подробной сеткой. В качестве уравнения состояния принимается уравнение идеального газа; модель турбулентности — модель Спаларта — Аллмареса. Решение осуществлялось с числом Куранта равным пяти в случае одной, трех и пяти мод. Расчет сходился к периодическому нестационарному решению за 2000 итераций.

Рис. 5, *а*, *в* показывают картину контуров турбулентной вязкости в среднем сечении лопаток в текущий момент времени, которая получена двумя разными методами (*HB* и *TRS*). Эти рисунки демонстрируют, что кромочный след от направляющей решетки, проходя вращающийся межлопаточный канал, расширяется в продольном и поперечном направлениях.

Этот процесс обусловлен «разломом» кромочного вихря о входную кромку лопатки рабочего колеса и, как следствие, генерацией нестационарных возмущений вверх и вниз по течению. Область потока, расположенная вокруг рабочей лопатки, характеризуется повышенной турбулентной вязкостью, особенно на расстоянии, приблизительно равном половине хорды. Это связано с образованием здесь устойчивой рециркуляционной зоны. Рис. 5, *б* демонстрирует изменение модуля скорости вдоль границы интерфейса, расположенной в осевом зазоре.

Профиль скорости имеет два минимума: один из них (с большим провалом) ассоциируется с областью следа за направляющей решеткой, а второй — с тормозящим воздействием входной кромки рабочего колеса. На рис. 5, *г*

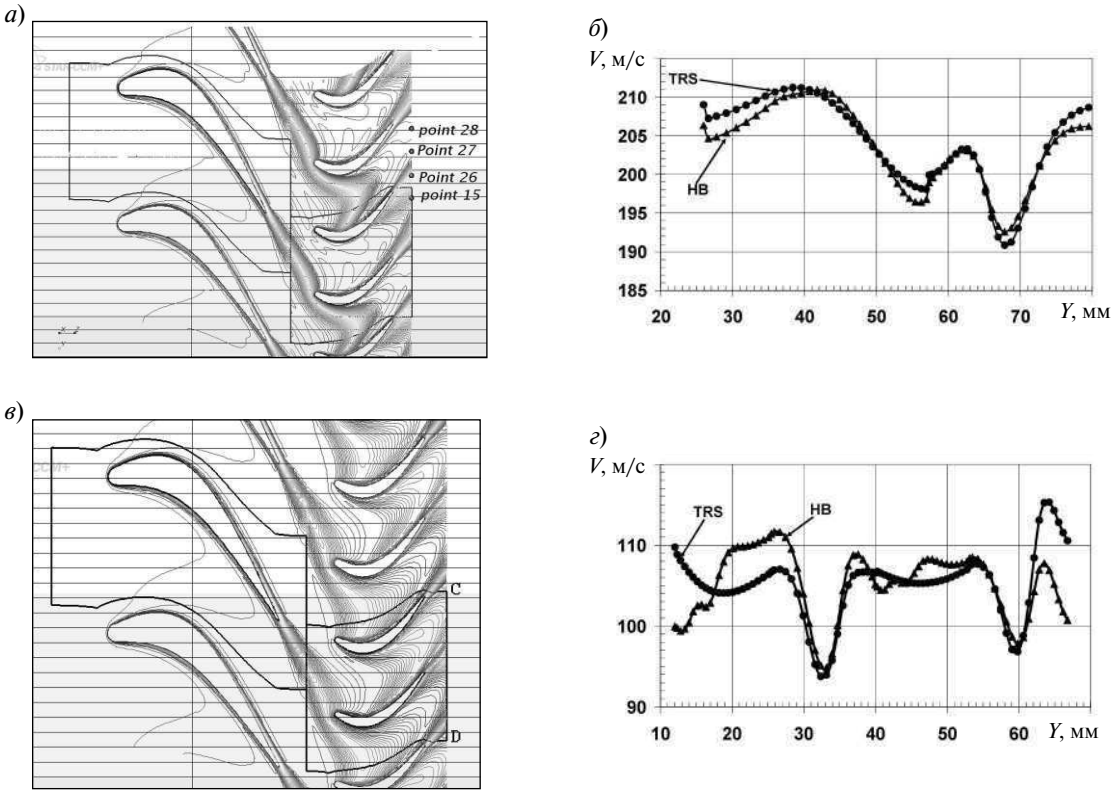


Рис. 5. Мгновенные картины контуров турбулентной вязкости в срединном сечении лопаток ступени, полученные с помощью *HB* (*а*) и *TRS* (*в*) методов; распределение скорости по ширине межлопаточного канала внутри осевого зазора (*б*) и на выходе рабочего колеса (*г*)

дано распределение скорости вдоль прямой *CD* (см. рис. 5, *в*), которое также содержит два минимума, чье появление связано с кромочными следами от соседних рабочих лопаток. Потенциальная неравномерностть потока в рабочей решетке и деформированный кромочный след от направляющего аппарата определяют немонотонное изменение профиля скорости между этими двумя провалами. Рис. 6, *а*, *б*, *в*, *г* показвают распределение осредненного во времени (нулевая мода) давления и поправки на нестационарность для давления (первая мода) по обводу лопаток статора и ротора одноступенчатой турбины ЛПИ, подсчитанные по методу гармонического баланса.

Результаты расчетов показывают хорошое согласование с опытными данными для осредненного во времени давления по обводу статорной лопатки (рис. 6, *а*). Результаты расчетов, представленные на рис. 6, *б*, *в*, иллюстрируют малое влияние нестационарности на величину нулевой моды давления на поверхности роторной лопатки, а также первой моды на поверхности статорной. Важно отметить, что пульсации давления (изменение величины первой моды) на поверхности роторной лопатки могут достигать (вблизи входной кромки лопатки рабочего колеса — рис. 6, *г*) восьми процентов от осредненного значения давления.

Сравнение результатов вычисления с помощью *TRS* и *HB* подходов дано на рис. 7–9. Видно, что различие между двумя методами для мгновенной скорости незначительно (меньше пяти процентов), если число мод в методе гармонического баланса выбрано равным пяти.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными осциллограмм (для точек мониторинга 76 и 28) представлено на рис. 8 и 9. Оба метода (*TSR* и *HB*) удовлетворительно прогнозируют форму волны в поведении модуля скорости с течением времени, отмечая отличие в поведении кривых от чисто гармонической функции. Но оба метода не могут отследить

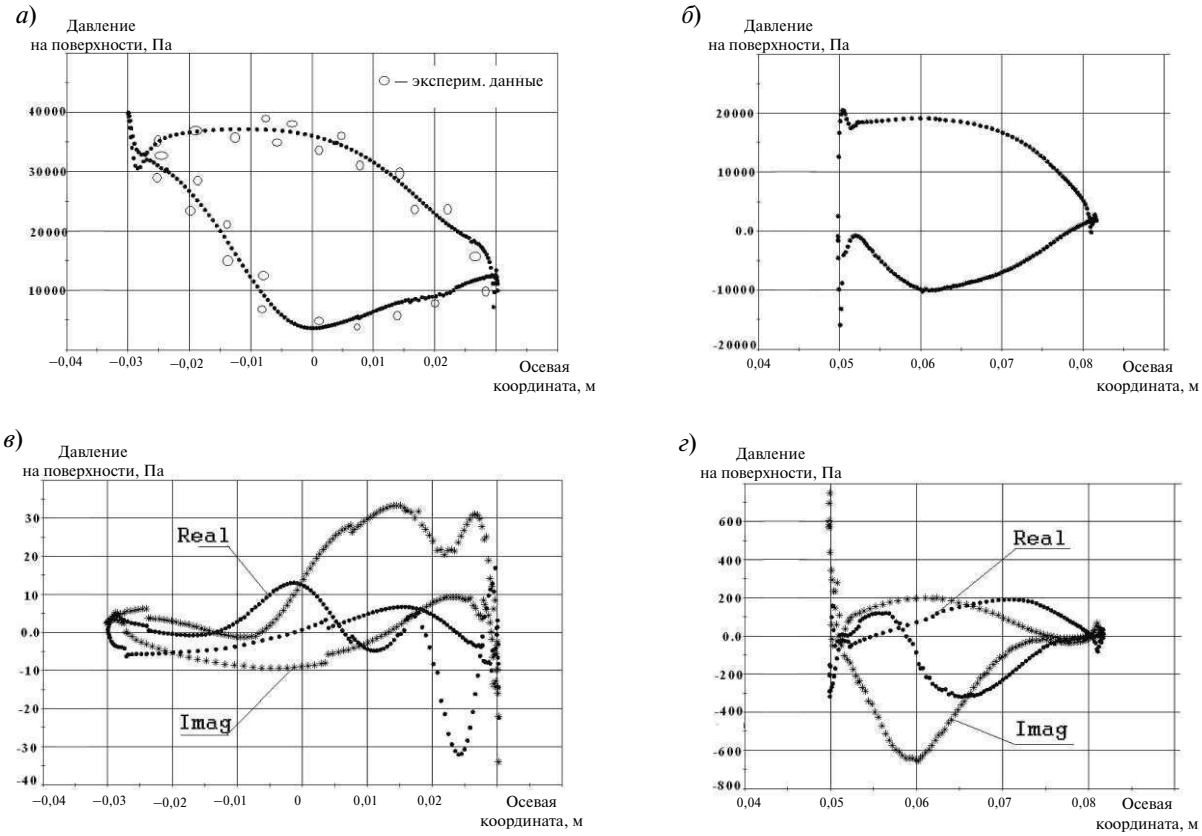


Рис. 6. Нулевая мода в Фурье-представлении давления на поверхностях лопатки статора (*а*) и ротора (*б*); реальные и мнимые части первой моды для статора (*в*) и ротора (*г*)

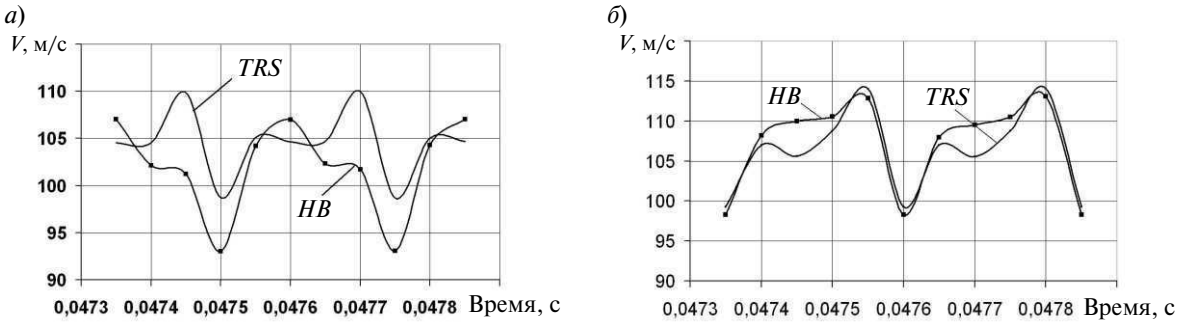


Рис. 7. Сравнение результатов вычислений для *TRS* и *HB* подходов для двух точек рис 5, *а*: 15 (*а*) и 27 (*б*)

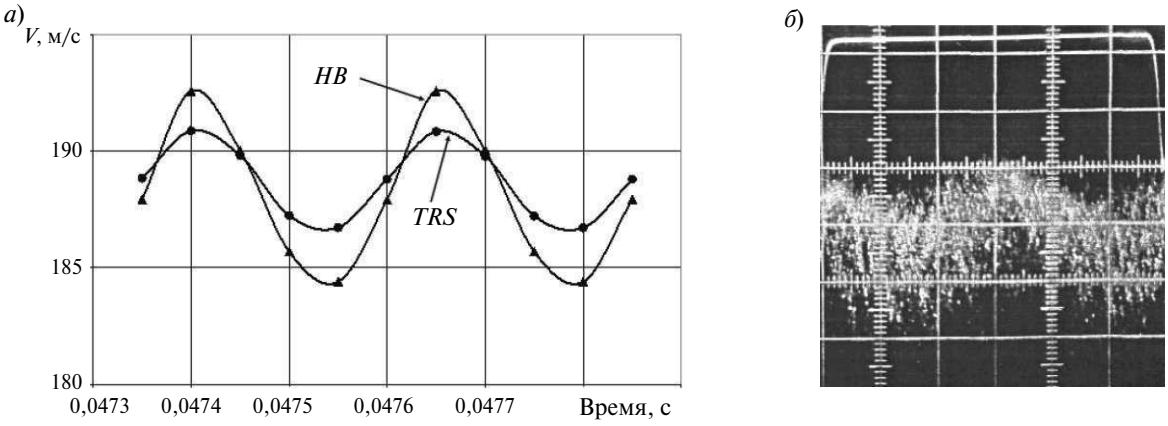


Рис. 8. Зависимость скорости от времени на расстоянии 8,0 мм от выходной кромки статора для точки 76 на рис. 1 (*а* — моделирование; *б* — экспериментальные данные)

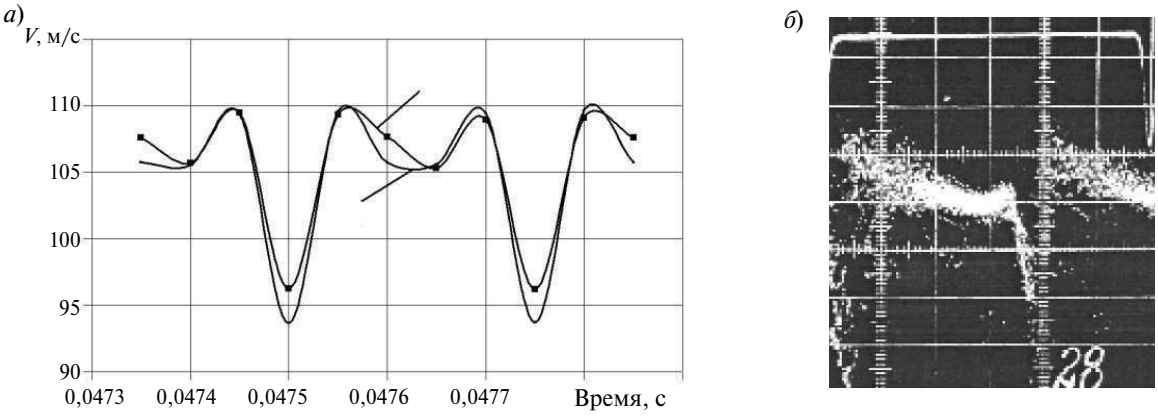


Рис. 9. Зависимость скорости от времени на расстоянии 10,0 мм от выходной кромки рабочей лопатки для точки 28 на рис. 1 (*а* — моделирование; *б* — экспериментальные данные)

эффекты нестационарности во всем диапазоне частот. В частности, на расчетных кривых для скорости потока отсутствуют высокочастотные участки, характерные для малых масштабов турбулентности.

Метод гармонического баланса (*HB*), встроенный в пакет STAR-CCM +, применен для расчета нестационарных эффектов при течении вязкого газа в одноступенчатой турбине ЛПИ. Показана приемлемая точность *HB*-метола для расчета регулярных колебаний потока в осевом зазоре и на выходе рабочего колеса. Такой вывод сделан на основе сравнения результатов расчета с опытными данными и результатами численного моделирования, в котором применялась полноразмерная модель ступени и скользящих сеток: погрешность не превышает пяти процентов. Отмечается, что пульсации давления на поверхности роторной лопатки в окрестности входной кромки могут достигать восьми процентов относительно осредненного во времени значения давления. Дается объяснение нелинейных эффектов в поведении профиля скорости в межлопаточных каналах ступени, связанных с ротор-статорным взаимодействием и развитием кромочных следов за направляющей решеткой и рабочим колесом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Breugelmans, F.** Resent research in the VKI turbomachinery and propulsion department [Текст] / F. Breugelmans // Сб. тез. Второй международной научно-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века».— Москва.— 2005. Т. 1.— С. 16–25.

2. **Biesinger, T.** Unsteady CFD methods in commercial solver for turbomachinery applications [Текст] / T. Biesinger, Ch. Cornelius, C. Rube [et all.] // Proc. of ASME Turbo Expo.— Power for Land, Sea and Air. Glasgow, 2010.— UK. 12 p.

3. **Connell, S.** A comparison of advanced numerical techniques to model transient flow in turbomachinery blade rows [Текст] / S. Connell, M. Braaten, L. Zori [et all.] // Proceedings of ASME Turbo Expo— 2011. Vancouver, British Columbia, Canada.— 2011. 10 p.

4. **He, L.** Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines [Текст] / L. He, W. Ning // AIAA J.— 1998. Vol. 36, № 11.— P. 005–2012.

5. **He, L.** Analysis of rotor— rotor and stator –stator interferences in multi— stage turbomachines [Текст] / L. He, T. Chen, R.G. Wells [et all.] // Proc. of GT2006 ASME Turbo Expo— 2006.— Power for Land, Sea and Air. Barcelona, Spain. 2006.— 11 p.

6. **Hall, K.C.** Computation of unsteady nonlinear flows in cascades using a harmonic balance technique [Текст] / K.C. Hall, J.P. Thomas, W.S. Clark // AIAA J.— 2002.Vol. 40, № 5.— P. 879–886.

7. **Vilmin, S.** Unsteady flow modeling across the rotor/stator interface using the nonlinear harmonic method [Текст] / S. Vilmin, E. Lorrain, Ch. Hirsch, M. Swoboda // Proc. of ASME Turbo— Expo 2009.— Power for Land, Sea and Air. Orlando, Florida, 2009. USA.— 9 p.

8. **Weiss, J.M.** Simulation of unsteady turbomachinery flows using of implicitly coupled nonlinear harmonic balance method [Текст] / J.M. Weiss, V. Subramanian, K.C. Hall // Proc. of ASME. Turbo Expo— 2011.— Vancouver, Canada, 2011.— 8 p.

9. **Custer, C.H.** Unsteady simulation of a 1.5 stage turbine using an implicitly coupled nonlinear harmonic balance method [Текст] / C.H. Custer, J.M. Weiss, V. Subramanian [et all.] // Proc. of ASME Turbo Expo— 2012.— Copenhagen. Denmark, 2012.— 15 p.

10. **Кондратьев, В.Ф.** Исследование физических явлений и нестационарных взаимодействий в турбинной ступени [Текст]: Автореф. ... канд. техн. наук / В.Ф. Кондратьев.— Л., 1977.— 18 с.

УДК 621.9.014.8:621.9.015

В.В. Максаров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОГО ИНСТРУМЕНТА

Можно выделить широкий класс изделий машиностроения, автоматизация и управление механической обработкой которых требует особого подхода при решении задач по повышению эффективности процесса резания. Повышение производительности токарной обработки, увеличение скоростей главного движения и подач, выполнение высоких требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей обусловливают необходимость проведения новых систематических исследований поведения технологической системы при тонком точении. Динамическая устойчивость технологической системы, снижение уровня вибраций, возникающих в процессе резания, — залог стабильности стружкообразования, обеспечивающей выполнение этих требований, что особенно важно при автоматизации технологического процесса. Следует также отметить, что вибрации, возникающие в процессе механической обработки, существенно затрудняют эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, являются причиной преждевременного износа инструмента, аварий станков и приспособлений. Таким образом, задача обеспечения устойчивости технологической системы за счет снижения уровня автоколебаний — одна из важнейших в области лезвийной обработки. Она приобретает особую актуальность при чистовой обработке изделий на автоматических станках и станках с ЧПУ [1, 2].

Одним из наиболее эффективных способов, позволяющих обеспечивать устойчивость парциальной технологической подсистемы «инструмент» при чистовой обработке тел вращения, является создание демпфированного инструмента, который оснащен многослойной державкой, обладающей анизотропными свойствами. Особенность процесса точения таким инструментом заключается в снижении уровня автоколебаний, которые возникают в процессе резания за счет упорядоченной разориентации текстуры анизотропных пластин сборной многослойной державки, позволяющей эффективно рассеивать энергию колебательной волны на границе перехода между пластинами державки. Данный метод существенно повышает стойкость режущей кромки инструмента и расширяет технологические возможности по выбору эффективных режимов резания, обеспечивающих выполнение требований по размерной и геометрической точности, качеству обрабатываемой поверхности.

Рассмотрим сущность метода создания демпфирующего инструмента с многослойной державкой, обладающей анизотропными свойствами. Материал пластин державки, изготовленных из стали 45 (ГОСТ1080–88), состоящий из множества кристаллических зерен, ориентированных произвольно, в целом изотропен или почти изотропен; его анизотропия проявляется в результате обработки давлением. Пластическая деформация прокаткой, не создавая полосчатости (неравномерности) микроструктуры, приводит к изменению направления волокон макроструктуры, образуя текстуру (рис. 1). Державка режущего инструмента изготовлена из пакета пластин, собранных между собой по плоскостям, параллельным опорной поверхности державки. Пластины вырезаны из листового проката с продольной, поперечной и вертикальной ориентацией по плоскости относительно направления их прокатки и собраны в пакет с углом разориентировки текстуры (рис. 2, *а*). При колебаниях, возникающих в процессе механической обработки, характеристика поведения стержня державки при малых деформациях принимается соответственно закону Гука с учетом сопротивлений трения в неподвижных соединениях между пластинами и внутреннего трения в материале державки. Обусловленные наличием текстуры материала неупругие эффекты внутреннего трения, связанные с перемещениями дислокаций, вызывают необратимые гистерезисные потери энергии внутри металла державки при механических колебани-

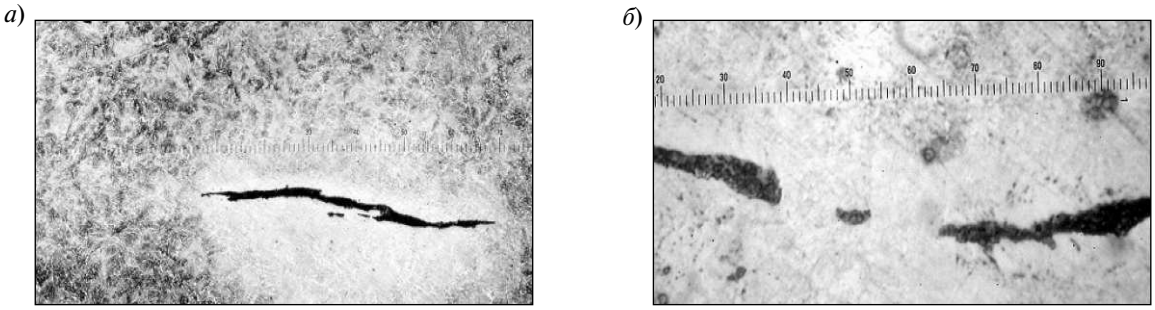


Рис. 1. Фрагменты включений, образующие ориентированную в направлении проката текстуру образца заготовки (сталь 45 ГОСТ1080–88), при увеличении в 200 (*а*) и 1000 (*б*) раз

ях. Линии диаграммы «напряжение — деформация» при нагрузке и разгрузке из-за неполной упругости металлов не совпадают, а образуют петлю гистерезиса (рис. 2, *б*). Ее площадь характеризует энергию, рассеянную за один цикл нагружения. Внутреннее трение обусловлено статическим гистерезисом, когда форма и площадь его петли не связаны с временными релаксационными процессами и поэтому не зависят от частоты колебания, но сильно зависят от его амплитуды и свойств материала державки. Для достижения наибольшего демпфирующего эффекта разориентация текстуры деформации в двух соседних пластинах должна быть максимальна. Тогда колебательная волна при переходе границы раздела меняет свое направление, в результате чего происходит рассеяние энергии колебаний.

При малой величине разориентации текстуры деформации диссипация энергии незначительна. Поэтому в предлагаемом техническом решении пластины державки ориентируют таким образом, чтобы при переходе от одной пластины к другой текстура деформации изменялась на 90 ± 10° относительно действия на державку основной — тангенциальной — составляющей силы резания. Под действием силы резания в верхних слоях державки возникают преимущественно максимальные растягивающие напряжения $\sigma_р$, а в нижних, опорных, — сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$ [2, 3].

Поэтому для стабилизации прочности различных зон и увеличения прочности и надежности всей державки необходимы дополнительные условия по ориентации текстуры деформации в пластинах сборной державки относительно сил резания. Известно, что максимальное сопротивление растягивающим напряжениям прокатанный металл оказывает в продольном направлении, а минимальное — в вертикальном направлении относительно направления про-

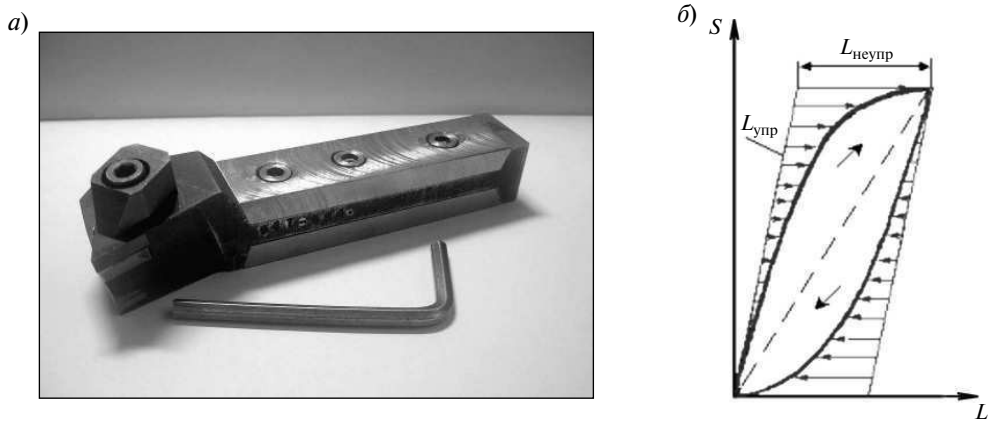


Рис. 2. Экспериментальный резец с многослойной державкой (*а*) и петля гистерезиса диаграммы «напряжение *S* — деформация *L*» (*б*)

катки. Наоборот, максимальным сопротивлением сжимающим напряжениям прокатанный металл обладает в вертикальном направлении, а минимальным — в продольном [3, 4]. Сопротивление металла в поперечном направлении и растягивающим, и сжимающим напряжениям имеет промежуточные значения. В связи с этим направления прокатки в опорной пластине ориентировано параллельно тангенциальной составляющей этой силы. В верхней пластине направление прокатки ориентировано параллельно радиальной составляющей силы резания, а плоскость прокатки располагается перпендикулярно тангенциальной составляющей силы резания. Направление прокатки в средней пластине параллельно действию осевой составляющей силы резания.

Для анализа технологических свойств многослойной державки и ее поведения в системе станка разработана математическая модель технологической системы при чистовом точении резцом. Математическая модель динамических свойств технологической системы, выбор схемы которой связан, прежде всего, с выделением подсистем и выявлением структуры связей между ними, определением числа степеней свободы и вида обобщенных координат, необходимых для полного описания процессов, происходящих в рассматриваемой системе, позволяет провести качественный анализ динамических процессов технологической системы в целом. Для выявления возможности управления процессом резания, а также анализа динамических свойств технологической системы необходимо осуществить переход от сложной многомерной модели к упрощенной динамической модели, эквивалентной исходной относительно спектральных характеристик, с использованием обоснованного критерия близости в заданном частотном диапазоне [1].

Считается, что многомерная и упрощенная системы эквивалентны, причем упрощенная модель оптимальна, если выполняются два условия:

$$\rho(W, W_{\text{м}}) \le \varepsilon; \qquad (1)$$

$$\rho(W, W_{\text{м}}) = \min \rho(W, W_{\text{м}}), \qquad (2)$$

где W, $W_{\text{м}}$ — матрицы частотных характеристик соответственно исходной и упрощенной модели; $\rho(W, W_{\text{м}})$ — метрика, задающая расстояние между W и $W_{\text{м}}$; ε — малая наперед заданная величина допустимой ошибки.

Выполнение условий (1) и (2) обеспечивает близость амплитудно-частотных и фазовых характеристик (АЧХ и ФЧХ) обобщенной и упрощенной моделей. На рис. 3 представлена четырехконтурная динамическая модель технологической системы механической обработки малой размерности с диссипативными характеристиками, учитывающими конструктивное демпфирование и реологические процессы рассматриваемой глобальной модели, которой соответствуют две подсистемы с четырьмя обобщенными координатами: *а*) подсистема заготовки З с координатами *u*, *w*; *б*) подсистема инструмента И с координатами *x*, *y*.

Реологическая модель технологической системы механической обработки учитывает как процесс первичной пластической деформации в зоне срезаемого слоя, так и процессы вторичной деформации и трения при движении стружки по передней поверхности режущего инструмента. Моделирование на основе кусочно-линейной аппроксимации процесса стружкообразования позволило сформировать основы для построения дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства технологической системы механической обработки. Исходя из этого поведение выбранной динамической четырехконтурной модели в соответствии с принятой реологической моделью стружкообразования удобно представлять в векторно-матричной форме:

$$T\dot{q} + N(q)q = 0, \qquad (3)$$

где q — вектор-функция (размера $n \times 1$) обобщенных координат системы; T — диагональная матрица размера $n \times n$; $N(q)$ — матрица размера $n \times n$. В рассматриваемой модели $n = 10$; при этом число контуров n соответствует размерности модели.

Система дифференциальных уравнений (3) описывает динамические процессы в технологической системе механической обработки с учетом упругопластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей процесса стружкообразования в зоне активного

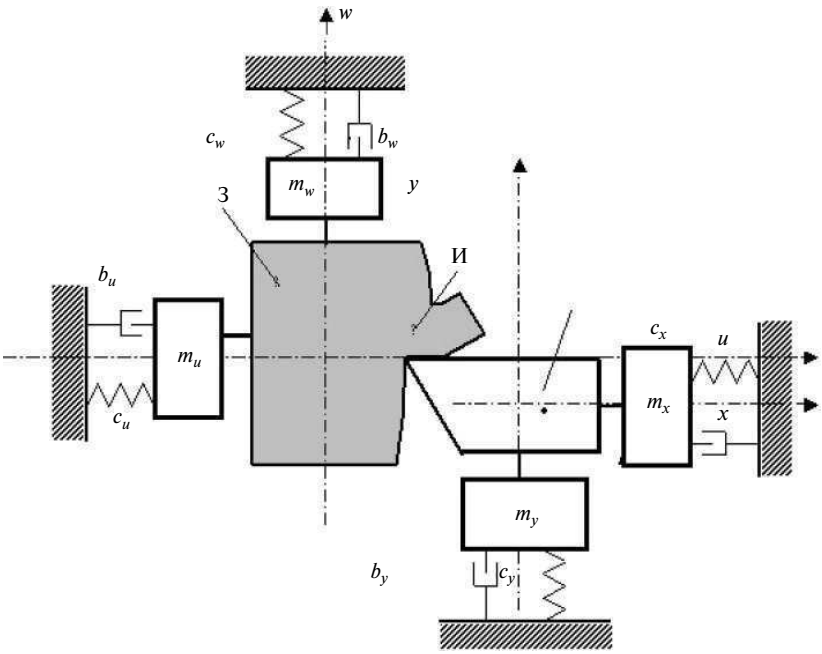
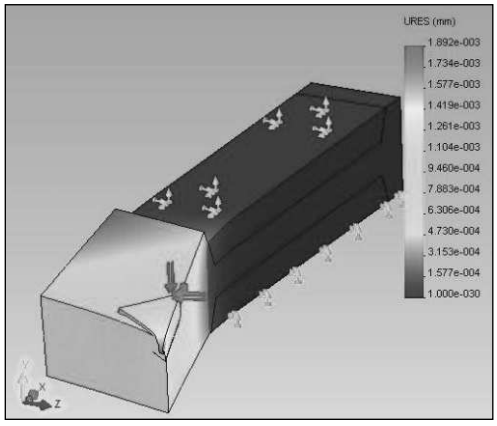


Рис. 3. Динамическая модель четырехконтурной технологической системы: З — подсистема «заготовка»; И — инструмент; A_c — оператор стружкообразования

пластического деформирования. На основе полученной системы уравнений разработана программа расчетов максимально допустимых значений ширины срезаемого слоя в зависимости от скорости резания. С использованием программного обеспечения COSMOS Work проведены расчеты упругих деформаций державки. Эпюры суммарного статического перемещения резца с многослойной державкой и резца-аналога приведены на рис. 4.

Расчетные виброперемещения при обработке подсистемы инструментого, оснащенным многослойной державкой, показали снижение уровня автоколебаний в процессе резания. Проводившиеся в этой области экспериментальные исследования виброперемещений при обработке заготовки из стали 45 подтвердили правильность теоретической модели и доказали эффективность применения резцов с анизотропной демпфирующей державкой при чистовом точении.

а)



б)

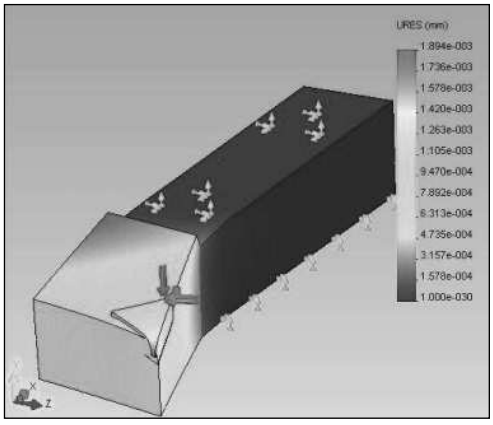


Рис. 4. Эпюры суммарного статического перемещения резца с многослойной державкой (*а*) и резца-аналога (*б*)

Разработан метод повышения устойчивости процесса резания при чистовом точении, основанный на использовании анизотропных свойств пластически деформированной конструкционной стали и явления диссипации колебательной волны при переходе раздела между разорентированными по текстуре пластинами державки инструмента. На основании изученных физических анизотропных свойств стального проката создан инструмент, оснащенный многослойной демпфирующей державкой.

Предложена обобщенная математическая модель процесса стружкообразования, позволяющая описать процесс с учетом упруго-пластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей парциальной системы «инструмент».

Экспериментальные исследования виброперемещений при обработке заготовки из стали 45 подтвердили правильность теоретической модели и доказали эффективность применения резцов с анизотропной демпфирующей державкой при чистовом точении.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вейц, В.Л.** Моделирование процесса стружкообразования при лезвийной механической обработке [Текст] / В.Л. Вейц, В.В. Максаров // Станки и инструмент.— 2002. № 4.— С. 13–15.

2. **Максаров, В.В.** Повышение эффективности процесса тонкой лезвийной обработки при точении за счет анизотропных свойств режущего инструмента [Текст] / В.В. Максаров, П.В. Леонидов, Ю. Ольт, А.Н. Шарашов // Металлообработка.— 2010. № 1.— С. 16–23.

3. **Maksarov, V.** Materjalide Loiketeooria ja Loikurid [Текст] / V. Maksarov, J. Olt.— Tartu: Eesti Maaulikool, 2008.— 132 lk.

4. **Микляев, П.Г.** Анизотропия механических свойств металла [Текст] / П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман.— М.: Металлургия, 1986.— 224 с.

УДК 621.165.001.5

М.С. Зандер, Е.Ю.Семакина, В.А.Черников

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ 3D-ПОТОКА В ОТСЕКЕ «ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ — ОСЕВОЙ ДИФФУЗОР»

Стационарные высокотемпературные газотурбинные установки большой единичной мощности находят все большее применение в энергетике в составе комбинированных газопаровых электрических станций. Такие установки высокоэффективны, маневренны и поэтому часто проектируются для использования в переменной части графика электрических нагрузок. Основную газодинамическую перестройку потока при изменении режима воспринимает последняя ступень газовой турбины, за которой располагается осевой диффузор. Характер течения в диффузоре влияет на эффективность работы последней ступени: правильная организация потока в диффузоре может повысить перепад энтальпий на последнюю ступень на величину до 10 %. Таким образом, эффективность последней ступени и режим ее работы неразрывно связаны со структурой течения в диффузоре. В свою очередь, режим работы ступени определяет характер течения в диффузоре. Поэтому в экспериментальных и численных исследованиях логично рассматривать последнюю ступень и диффузор как единую систему. В статье представлены результаты экспериментального и численного исследования блока «ступень — диффузор» модельного отсека турбины V84.3A.

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд подробно описан в [1]. Траверсирование потока проводилось одновременно в четырех контрольных сечениях (рис. 1). При этом в процессе всего эксперимента регистрировались параметры потока на входе в ступень, пристеночные давления, массовый расход, частота вращения ротора и сила на рычаге гидротормоза. Подробное описание измерительной системы стенда дано в [2].

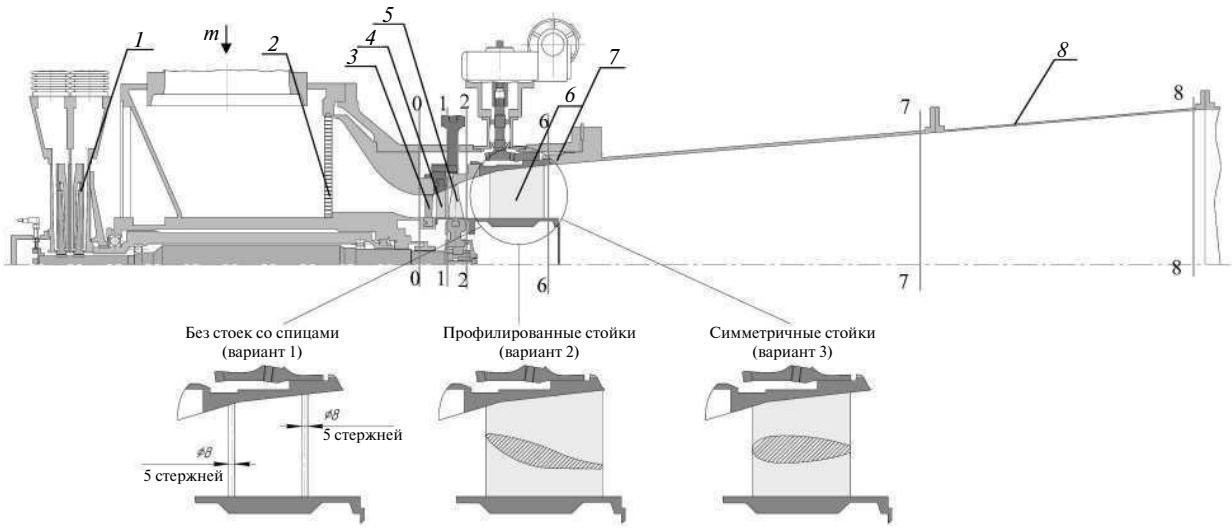


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования блока «ступень — диффузор»:

1 — гидротормоз; *2* — выравнивающее устройство; *3* — предварительный направляющий аппарат; *4* — направляющий аппарат; *5* — рабочее колесо; *6* — стойки задней опоры подшипника; *7* — кольцевой диффузор; *8* — конический диффузор

Расчетная модель

Расчетная область в осевом направлении включает в себя предварительный направляющий аппарат (ПНА) *3*, модельную ступень с направляющим аппаратом (НА) *4* и рабочим колесом (РК) *5*, а также выходной диффузор, состоящий из кольцевой *7* и конической *8* частей. В окружном направлении расчетная область охватывает сектор в 72°, т.к. в кольцевом диффузоре равнорасположены 5 стоек задней опоры подшипника.

Расчетные сетки для лопаточного аппарата и для диффузора — структурированные, гексаэдральные, со сгущениями ячеек вблизи стенок для разрешения течения в пограничном слое. Для слабо закрученных лопаток ПНА и НА выбрана обычная *H*-топология построения сетки, для рабочей лопатки использована *J*-топология. Расчетные области для ПНА и РК созданы с учетом радиального зазора. Для диффузора в районе стойки применена *H*-топология сетки, а для конической части диффузора — комбинация *H*- и *Y*-блоков. Расчетные сетки лопаточного аппарата и расчетной области в целом представлены на рис. 2. Количество узлов и основные параметры, отражающие качество сеток, приведены в таблице.

На азимутальных границах расчетной области было использовано условие периодичности. На стенках и поверхностях лопаток ставилось условие «прилипания» потока. На входе в расчетную модель принималось граничное условие «дозвуковой вход» с заданием величин полного давления и температуры, а также направления потока. На выходе из расчетной модели ставилось граничное условие «дозвуковой выход» с заданием радиального распределения давления. В качестве граничных условий на входе в предварительный направляющий аппарат (сечение 0–0) задавалось равномерное поле полных давлений и температур по данным эксперимента, на выходе (сечение 8–8) — экспериментальное распределение давлений. Режим работы отсека определялся экспериментальными величинами частоты вращения ротора и расхода воздуха. При переходе от домена 2 (область НА) к домену 3 (область РК) использовался интерфейс Stage, при переходе от домена 3 к домену 4 (диффузор) — интерфейс Frozen Rotor.

Расчеты проводились в коммерческом пакете ANSYS CFX. Для описания трехмерного течения использовались осредненные по числу Рейнольдса уравнения движения жидкости (RANS — Reynolds averaged Navier — Stokes equations). Си-

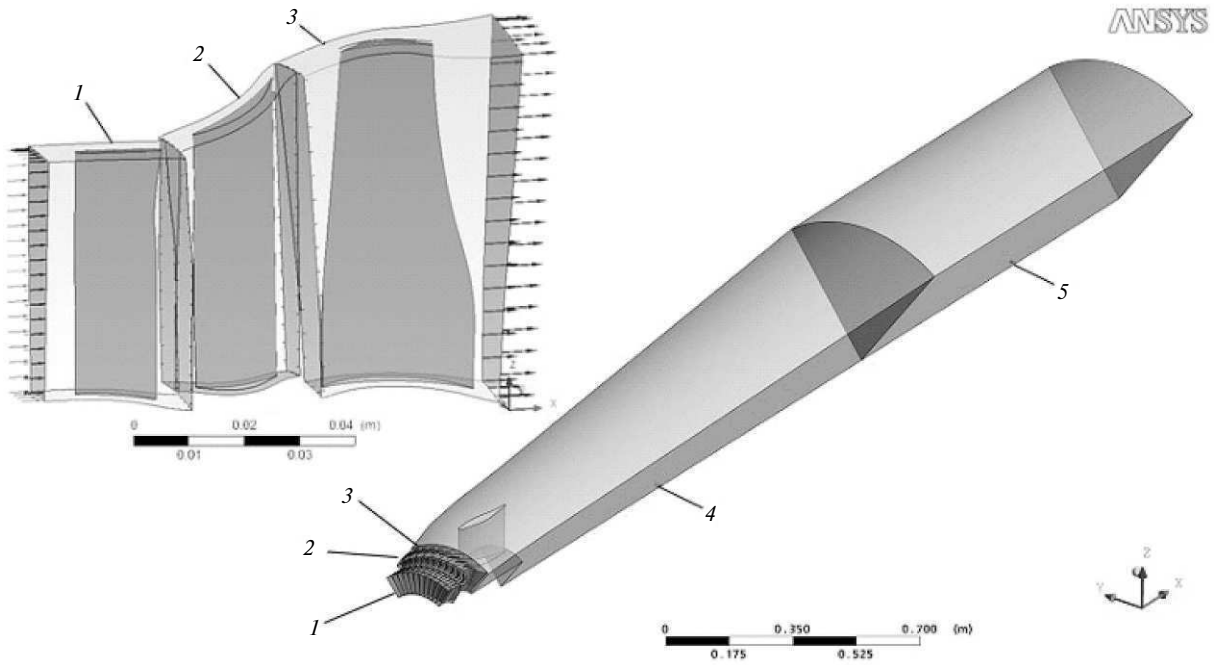


Рис. 2. Модель расчетной области блока «ступень — диффузор»

Основные характеристики расчетной сетки

Моделируемый элемент	Количество узлов	Минимальный угол скоса ячейки, град	Максимальное соотношение ребер ячейки	Максимальное соотношение объемов соседних ячеек
ПНА	910 000	23,5	670	16
НА	810 000	22,3	705	6,3
РК	1 000 000	20,6	1545	21,5
Диффузор	1 250 000	37,5	720	5
Выходной участок	33 000	55	930	2

стема уравнений неразрывности, импульса и энергии замыкалась уравнением модели турбулентности. Была выбрана двухпараметрическая модель турбулентности (SST — shear stress transport), гибридный вариант моделей k-ε и k-ω, предложенная Ф.Ментером. Турбулентная кинематическая вязкость $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$ моделировалась коэффициентом динамической вязкости — μ_t.

Результаты

Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне режимов работы при различных расходах и углах выхода потока из ступени [4]. Для расхода m = 10 кг/с было выполнено численное исследование. Для варианта модели с симметричными стойками по результатам экспериментальных и расчетных исследований проведено сравнение интегральных характеристик работы отсека, а также выполнен анализ структуры потока на базе сравнения 3D-полей скорости в контрольных сечениях.

Интегральные характеристики

Качество работы блока оценивалось по интегральным характеристикам: КПД ступени — η и η*, блока — $\eta_{+Д}$ и $\overline{\Delta\eta}_{+Д}$ [4], C_p диффузора. Результаты сопоставления интегральных характеристик блока, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведены на рис. 3 и 4.

Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными результатами наблюдается для η* и составляет $\eta^*_э - \eta^*_р$ = 1,5 в диапазоне режимов от 100 до 70 % от номинальной нагрузки.

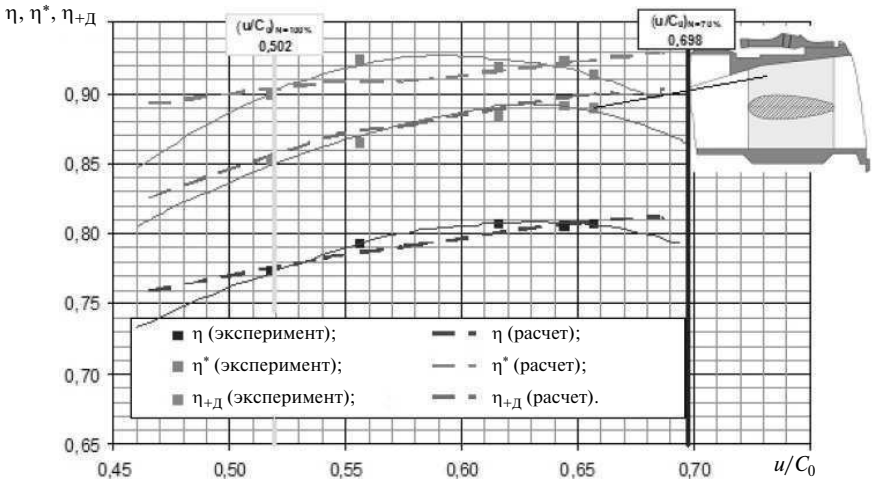


Рис. 3. Зависимость КПД ступени (η, η*) и блока ($\eta_{+Д}$) от режима работы отсека ($\dot{m}$ = 10 кг/с)

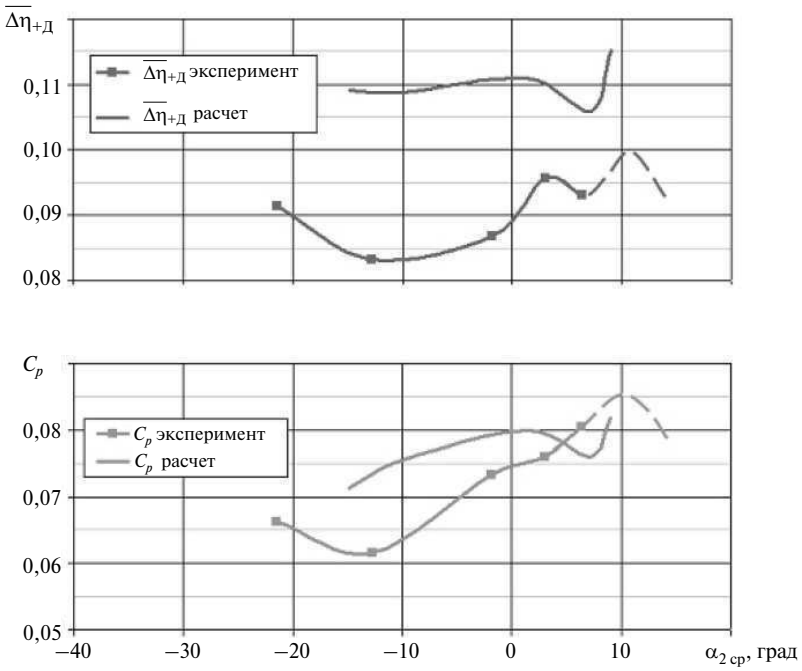


Рис. 4. Изменение КПД блока ($\overline{\Delta\eta}_{+Д}$) и C_p диффузора в зависимости от угла закрутки потока в сечении за РЛ

В наибольшей степени совпадают КПД блока $\eta_{+Д}$ — и их расхождения не превышают 0,5 %, хотя расхождения расчетных и экспериментальных $\overline{\Delta\eta}_{+Д}$ достигают 2 %, а расхождения C_p — 1,2 %. Характер изменения зависимости $\overline{\Delta\eta}_{+Д}$ от угла закрутки потока повторяет характер изменения C_p как для экспериментальных данных (коэффициент корреляции 0,71), так и для расчетных зависимостей (коэффициент корреляции 0,69). Это свидетельствует о значительном влиянии качества диффузора на улучшение работы блока. Причину значительных расхождений между расчетом и экспериментом по этим характеристикам можно выявить путем сравнения 3D-полей скорости по расчетным и экспериментальным данным.

Радиальные распределения

По результатам траверсирования и численного исследования путем осреднения параметров потока с использованием уравнений сохранения были получены радиальные распределения параметров потока в контрольных сечениях (рис. 6, 7, 8).

Как видно из рисунков, радиальные распределения параметров потока по данным расчета и эксперимента имеют качественно одинаковый характер, что свидетельствует об адекватности расчетной модели реальному потоку. В результате реструктуризации потока при его движении вдоль оси диффузора происходит заполнение потоком завтулочного пространства в коническом диффузоре, сопровождаемое процессом выравнивания по сечению осевых составляющих скоростей (рис. 7, 8). Этот процесс подтверждается результатами расчета. Сохранение окружной составляющей скорости и одновременное снижение расходной составляющей потока у периферии обеспечивает практически постоянный угол закрутки $\alpha_2 = 125–135°$ вдоль всего диффузора. Наличие такой закрутки создает условия для безотрывного течения по всей области на данном режиме. Этот результат получен как экспериментальным, так и расчетным путем.

Поля скоростей

По результатам экспериментальных измерений и численного моделирования потока проведено сопоставление полей скоростей в контрольных сечениях 2–2 за РК, 6–6, 7–7 и 8–8 (рис. 9).

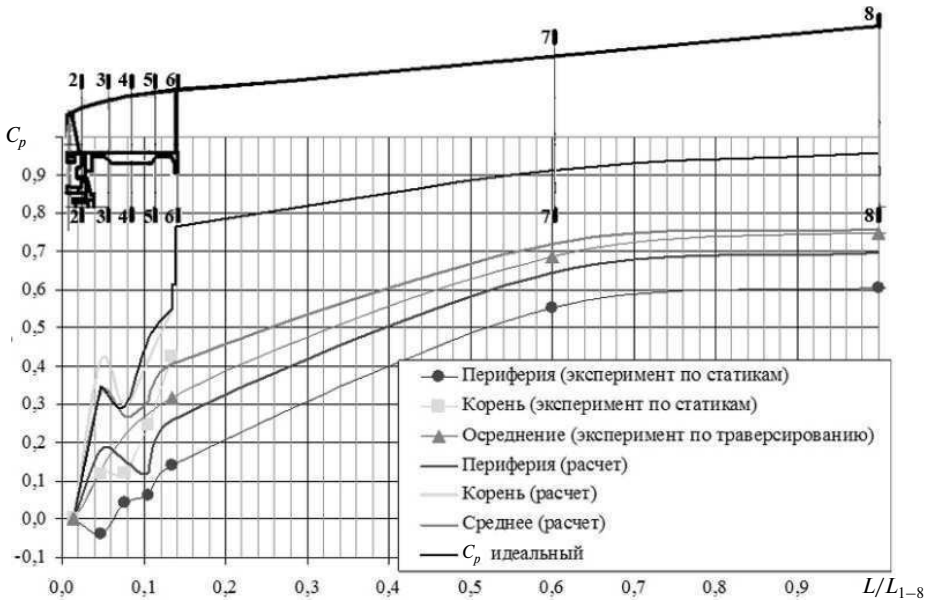


Рис. 5. Изменение коэффициента восстановления статического давления C_p по длине диффузора

Для количественной оценки расхождений расчета и эксперимента были выделены два типа ошибок: систематические и случайные. Различие в средних величинах составляющих скоростей c_z было принято за систематическую ошибку. Относительная погрешность средних величин вычислялась для каждого контрольного сечения по формуле: $\overline{\Delta c_z}$ $(c_{z\,\text{ср расч}} - c_{z\,\text{ср эксп}})/\, c_{z\,\text{ср эксп}}$.

Из рис. 7 следует, что систематическая ошибка по абсолютной величине монотонно повышается по потоку от сечения к сечению, достигая максимальной величины 8,1 % в сечении 8–8. При одинаковой абсолютной точности измерений это объясняется снижением осевых составляющих скоростей вдоль оси диффузора.

После исключения систематической ошибки была выдвинута гипотеза, что отклонение резуль-

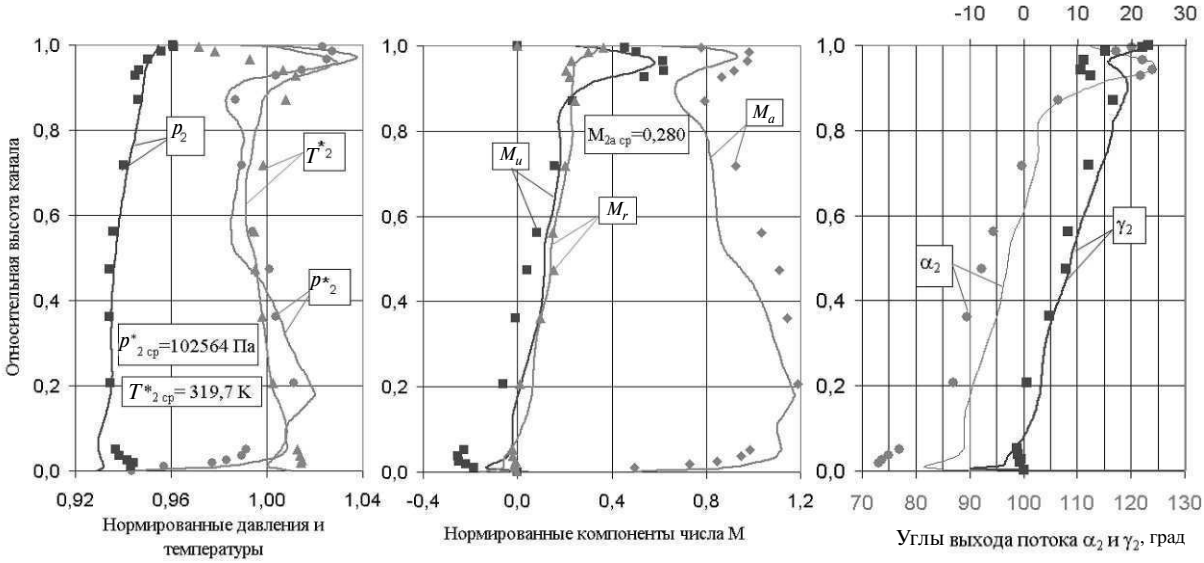


Рис. 6. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 2–2 (за РЛ)

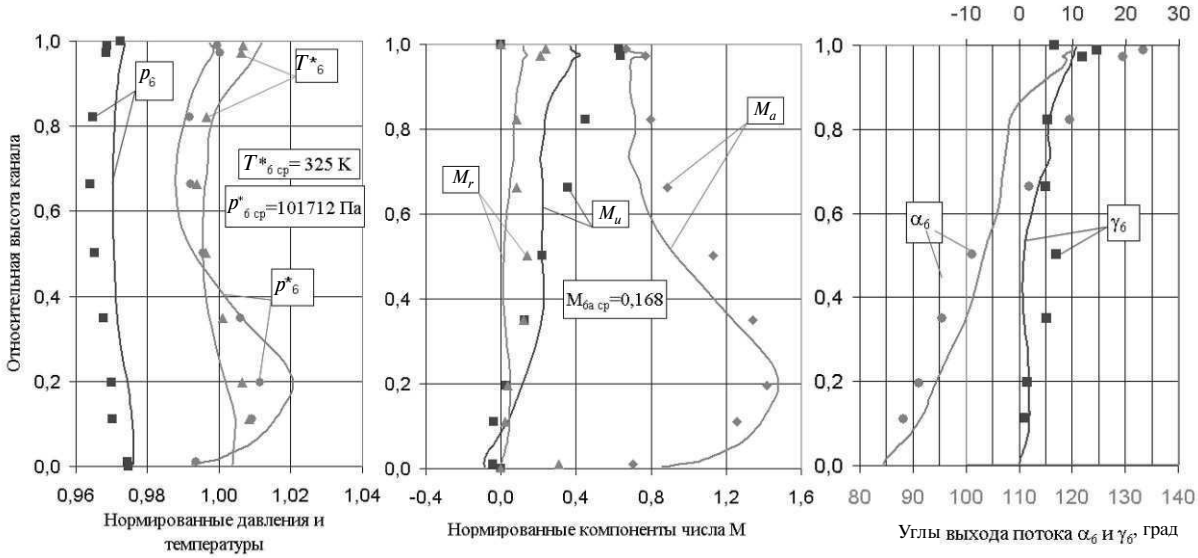


Рис. 7. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 6–6 (за стойками)

татов расчета от экспериментальных в сходственных точках контрольных сечений носит случайный характер и подчиняется закону нормального распределения. Проверка этой гипотезы была выполнена по критерию согласия Пирсона χ^2 с вероятностью 95 %. В результате статистического анализа определены величины дисперсий и среднеквадратические отклонения расчета от эксперимента. Так, для погрешностей осевых составляющих скоростей потока в сечении 2–2 закон нормального распределения характеризуется стандартным отклонением $\sigma_{c_z} = \pm 7{,}6\,\%$. Эта максимальная по сравнению с другими контрольными сечениями погрешность является следствием того, что в расчетной модели не учтено влияние шаговой неравномерности потока за НА на течение в рабочем колесе. В сечениях 7–7 и 8–8 эта ошибка несколько снижается вследствие выравнивания течения в окружном направлении.

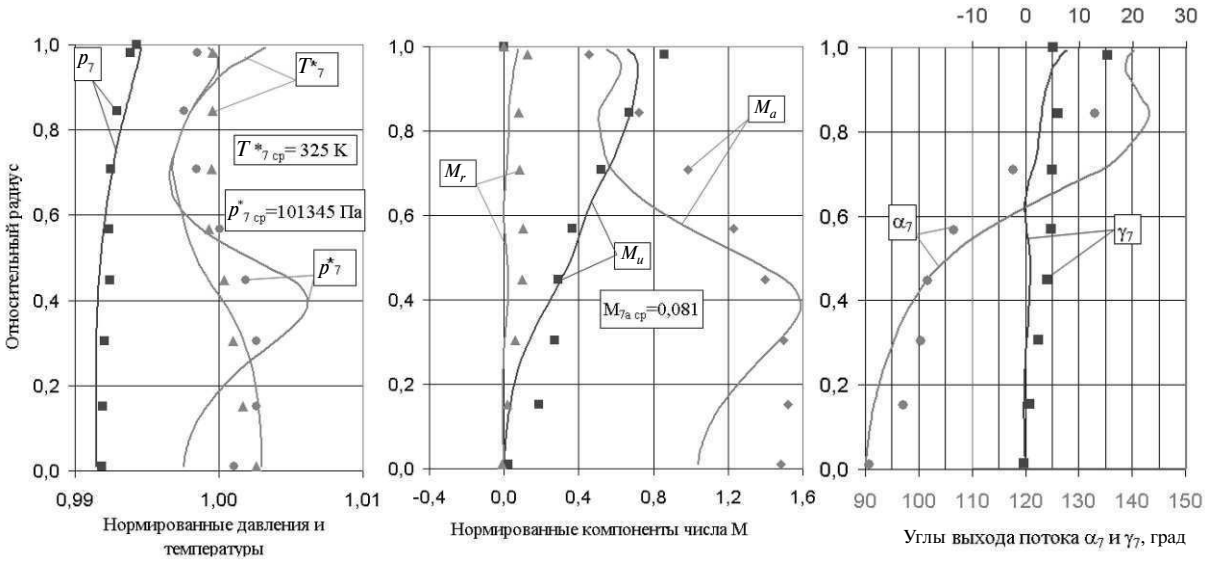


Рис. 8. Изменение параметров потока по радиусу в сечении 7–7 (конический диффузор)

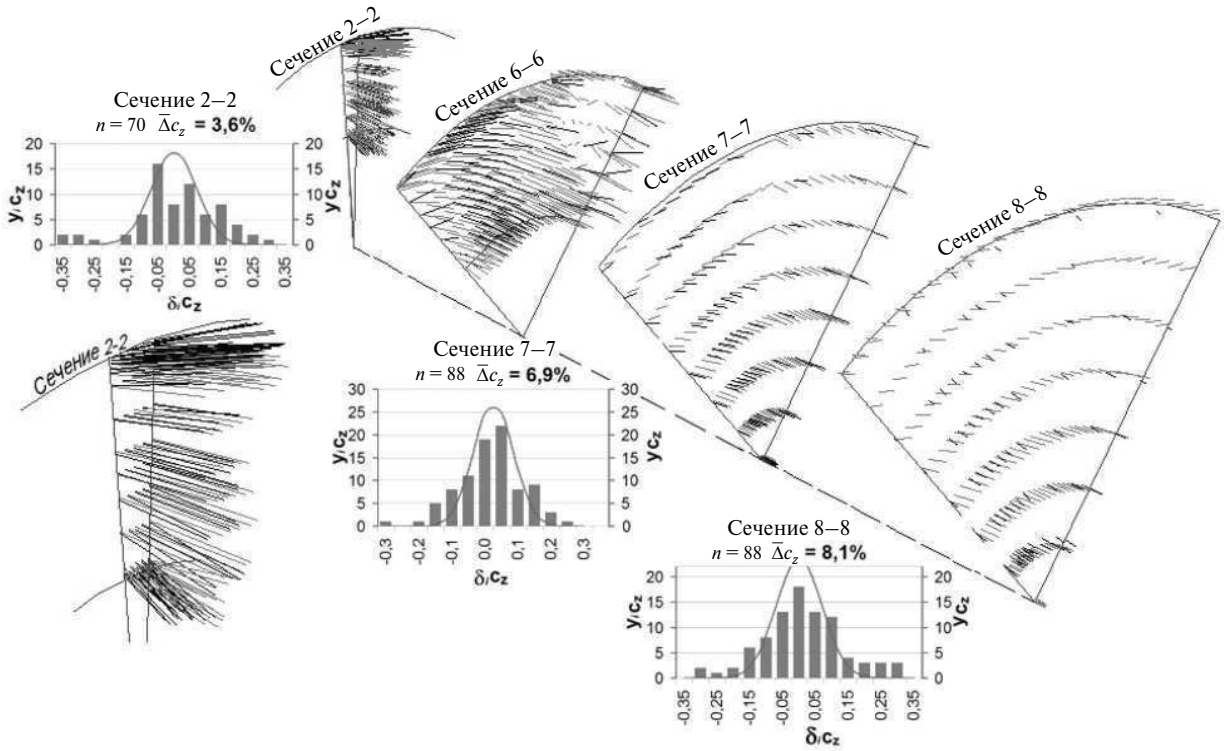


Рис. 9. Сопоставление экспериментального и расчетного поля скоростей в сечении 2–2

Подведем итоги.

1. Результаты CFD-расчетов показали вполне удовлетворительное в качественном отношении совпадение с экспериментом. В то же время по точности численное моделирование обеспечивает недостаточно удовлетворительный результат для стационарных газовых турбин большой мощности.

2. Причина недостаточной точности кроется, по-видимому, в стационарной постановке расчета для принятой комплексной модели блока «ступень — диффузор».

3. Для повышения точности блочного расчета «ступень — диффузор» методом CFD целесообразно применить квазистационарный подход с дискретным во времени поворотом РК в пределах шага НА.

4. Такой подход к моделированию позволит «перенести» вихревые структуры, покидающие НА, во вращающийся РК, а затем и в диффузор.

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 экспериментального стенда для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, Т.Ф. Баранова // Энергетические машины и установки.— 2008. № 1.— С. 24–34.

3. **Черников, В.А.** Аэродинамические характеристики выходного диффузора стационарной газовой турбины при различных режимах ее работы [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина // Энергетические машины и установки.— 2009. № 2.— С. 42–48.

4. **Черников, В.А.** Исследование аэродинамических характеристик блока «ступень— выходной диффузор» стационарной газовой турбины при различных режимах работы [Текст] / В.А. Черников, М.С. Зандер // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2011. № 2(123).— С. 61–68.

УДК 681.5.013

А.В. Борисевич, А.Н. Волков, Ю.В. Гичев,
В.А. Дьяченко, А.П. Петкова

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ И НАТЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СМОТКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ

Аморфные металлические сплавы (АМС) получают быстрым охлаждением расплавов при скоростях остывания жидкого металла $10^4 - 10^6$ град/с и при условии, что сплав содержит достаточное количество элементов-аморфизаторов [1]. Наиболее эффективными способами промышленного производства аморфной ленты являются охлаждение струи жидкого металла на внешней (охлаждение на диске) либо внутренней (центробежное охлаждение) поверхностях вращающихся барабанов или прокатка расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью [2].

По косвенным показателям производства аморфной ленты в США — весьма крупным объемам (132000 т/год) и сравнительно малой стоимости — есть основания полагать, что оно осуществляется на автоматизированном оборудовании непрерывной формовки ленты, включая, естественно, и автоматизированные установки смотки и формовки бобин с требуемой длиной ленты. Однако устройство таких установок — коммерческая тайна фирм-производителей, потому не отражено в открытой печати.

Моделированию и управлению механическими системами перемотки ленты или нити на высоких скоростях с низким натяжением посвящен ряд публикаций [3–5]. Предлагаемая статья посвящена моделированию и управлению перемоткой аморфной ленты на основе нелинейной модели процесса, а также ее полной линеаризации по обратной связи и адаптивной идентификации параметров модели.

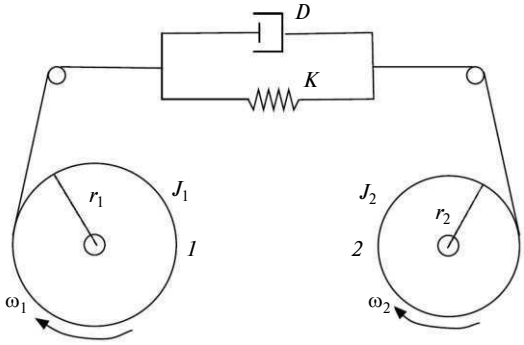


Рис. 1. Модель смотки ленты

Вначале рассматривается сама нелинейная модель кинематики намотки аморфной ленты, далее приводится один из вариантов управления на основе упрощенной модели процесса, а последняя часть статьи посвящена адаптивному управлению с линеаризацией обратной связью.

Модель процесса намотки аморфной ленты

Конфигурация модели представлена на рис. 1. Лента сматывается с технологического барабана *1* и наматывается на барабан *2* намоточного устройства. Величины J_i, r_i и ω_i — это соответственно моменты инерции, радиусы и угловые скорости каждого барабана. Причем $r_2(t)$ и $J_2(t)$ изменяются со временем при намотке ленты на барабан *2*. Радиус и момент инерции r_1 и J_1 для технологического барабана *1* не изменяется, поскольку расплав аморфного железа, затвердевая, тут же сматывается на барабан намоточного устройства *2*.

Лента между барабанами моделируется в виде демпфера с коэффициентом демпфирования D и пружины с коэффициентом упругости K.

Обозначим: $T(t)$ — усилие натяжения ленты между барабанами, а V — линейная скорость движения ленты. Каждый барабан приводится во вращения асинхронным приводом с частотным управлением в режиме стабилизации момента. Уставки моментов для частотного регулятора обозначим $u = (u_1(t), u_2(t))$. Действие асинхронного электропривода можно в первом

приближении моделировать как систему первого порядка с постоянной времени τ_i.

Известно, что момент инерции барабана *2* намоточного устройства может быть вычислен следующим образом:

$$J_2(t) = J_0 + K_J(r_2^4(t) - r_0^4), \qquad (1)$$

где J_0 — момент инерции барабана без ленты, r_0 — радиус барабана без ленты, $r_2(t)$ — радиус барабана с лентой в момент времени t, константа $K_J = \pi\rho w / 2$, в которой ρ — плотность ленты, w — ширина ленты.

Радиус $r_2(t)$ может быть найден как интеграл выражения

$$\dot{r}_2(t) = \frac{\delta\omega_2(t)}{2\pi}, \qquad (2)$$

в котором $r_2(0) = r_0$ и δ — толщина ленты.

Комбинируя (1) и (2), можно получить следующее:

$$\dot{J}_2(t) = \frac{2\delta K_j \omega_2(t) r_2^3(t)}{\pi}, \qquad (3)$$

где $J_2(0) = J_0$.

Далее, следуя [4], можно записать закон Ньютона для моментов:

$$J_1\dot{\omega}_1 = M_1 - \beta_1\omega_1 + Tr_1;$$

$$\dot{J}_2\omega_2 + J_2\dot{\omega}_2 = M_2 - \beta_2\omega_2 - Tr_2, \qquad (4)$$

где M_i — моменты, развиваемые двигателями барабанов *1* и *2*, β_i — коэффициенты вязкого трения; T — сила натяжения ленты.

Подставив (3) в (4) и выразив $\dot{\omega}_i$, можно записать

$$\dot{\omega}_1 = \frac{M_1 - \beta_1\omega_1 + Tr_1}{J_1};$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{M_2 - \beta_2\omega_2 - Tr_2 - 2\delta K_j r_2^3 \omega_2^2 / \pi}{J_2}. \qquad (5)$$

Для моделирования упругого натяжения ленты необходимо знать длину Δl, на которую лента растягивается между барабанами *1* и *2*:

$$\Delta l(t) = \int_0^t r_2(\tau)\omega_2(\tau)d\tau - r_1\int_0^t \omega_1(\tau)d\tau. \qquad (6)$$

Здесь интегралы — это длины намотанной и смотанной лент в момент *t*.

Управляемыми выходами системы являются натяжение ленты *T* и ее линейная скорость *V*, которые выражаются в виде

$$T = K\Delta l + D\Delta\dot{l} = K\Delta l + D(r_2\omega_2 - r_1\omega_1);$$

$$V = \frac{1}{2}(r_1\omega_1 + r_2\omega_2). \qquad (7)$$

Уравнения (7), (5) и (2) составляют нелинейную модель объекта управления.

Управление на основе упрощенной модели

Будем считать, что технологический барабан *1* и барабан *2* намоточного устройства приводится в движение с помощью двух двигателей, питаемых от частотных преобразователей. Технологический барабан вращается с постоянной скоростью ω_1. Управление барабаном *2* намоточного устройства осуществляется с поддержанием момента на валу M_2 и регулированием скорости ω_2. Целью управления является намотка ленты на барабан *2* намоточного устройства без превышения предельной силы T_{ref} натяжения ленты. Ленту считаем неупругой и нерастяжимой.

Из простейших кинематических соотношений можно вывести

$$T = \frac{M_2}{r_2}; \quad \omega_2 = \omega_1\frac{r_1}{r_2}. \qquad (8)$$

Уравнения (8) задают достаточно важные принципы управления системой. Поскольку непосредственно текущий радиус r_2 барабана намоточного устройства измерять затруднительно, то избавимся от переменной r_2, записав

$$T = \frac{M_2}{r_1}\frac{\omega_2}{\omega_1}. \qquad (9)$$

Измерение скорости ω_2 барабана намоточного устройства позволяет определить из (8) необходимый крутящий момент M_2 на валу двигателя для поддержания натяжения T_{ref}:

$$M_{ref\,2} = T_{ref} r_1 \frac{\omega_1}{\hat{\omega}_2}, \qquad (10)$$

где $\hat{\omega}_2$ — результат измерения скорости вращения барабана *2* намоточного устройства.

Для задания полной динамической модели системы уравнения (8) должны быть дополнены уравнением динамики момента M_2, обусловленной функционированием частотного преобразователя. Если аппроксимировать динамику частотного преобразователя звеном первого порядка с постоянной времени τ_M, то можно записать следующую модель:

$$\dot{M}_2 = \frac{u - M_2}{\tau_M}, \quad T = \frac{M_2}{r_2}, \qquad (11)$$

где u — уставка момента.

Рассмотрим влияние статических ошибок поддержания скорости ω_1 и измерения ω_2, приводящих к статической ошибке определения уставки M_{2ref}. Вычисляя полный дифференциал (12), можно записать погрешность уставки:

$$\Delta M_2^{ref} = T^{ref} \frac{r_1}{\omega_2}(\Delta\omega_1 + \frac{\omega_1}{\omega_2}\Delta\omega_2). \qquad (12)$$

Из выражений (13) и (14) можно получить погрешность силы натяжения в виде

$$\Delta T = T_{ref} \frac{r_1}{r_2\omega_2}(\Delta\omega_1 + \frac{\omega_1}{\omega_2}\Delta\omega_2) + \frac{\Delta M_2}{r_2}, \qquad (13)$$

где ΔM_2 — статическая ошибка поддержания момента для частотного преобразователя, управляющего движением барабана *2* намоточного устройства.

Для моделирования динамики измерения скорости ω_2 можно ввести в рассмотрение систему первого порядка $\dot{\hat{\omega}}_2 = (\omega_2 - \hat{\omega}_2)/\tau_{\omega_2}$, связывающую результат измерения $\hat{\omega}_2$ с текущей скоростью ω_2.

Модель системы с замкнутой обратной связью можно записать окончательно следующим образом:

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{r_1}{r_2}; \quad M_{2ref} = T_{ref} r_1 \frac{\omega_1 + \Delta\omega_1}{\hat{\omega}_2 + \Delta\omega_2}; \qquad (14)$$

$$T = \frac{M_2 + \Delta M_2}{r_2}; \quad \dot{M}_2 = (M_{2ref} - M_2)/\tau_M;$$

$$\dot{\hat{\omega}}_2 = (\omega_2 - \hat{\omega}_2)/\tau_{\omega_2}; \quad \dot{r}_2 = \frac{\delta\omega_2}{2\pi}.$$

Здесь $\Delta\omega_1$ — ошибка регулирования скорости вращения технологического барабана *1*; $\Delta\omega_2$ — ошибка измерения скорости барабана *2* намоточного устройства; ΔM_2 — ошибка управления моментом вращения барабана намоточного устройства *2*; δ — толщина аморфной ленты.

Модель (14) была реализована в среде MATLAB/Simulink. Параметры модели:

Радиус технологического барабана r_1, м..... 0,175
Толщина аморфной ленты ε, м ..... $0{,}02 \cdot 10^{-3}$
Начальный радиус барабана намоточного устройства $r_2(0)$, м 0,175
Постоянная времени частотного преобразователя барабана намоточного устройства τ_T, с 0,1
Постоянная времени измерения скорости барабана намоточного устройства τ_{ω_2}, с 0,02
Скорость вращения технологического барабана ω_1, рад/с 314
Уставка силы натяжения ленты F_{ref}, Н..... 2

Для того, чтобы оценить робастность предложенной схемы управления, было проведено моделирование с учетом возмущающих воздействий и эффектов квантования.

Выбраны следующие воздействия: $\Delta\omega_1 = 6\sin 10t$, $\Delta\omega_2 = 6\cos 10t$, что соответствует нестабильности поддержания и измерения скорости вращения барабанов в пределах 2 % от номинальной. Измеренный сигнал $\hat{\omega}_2$ был подвергнут квантованию по уровням, соответствующим точности измерения скорости в 1 об/мин. Сигнал задания для момента M_2 был квантован по уровням 0,02 Нм, что соответствует 2 % от номинального момента двигателя мощностью 400 Вт.

Полученные в результате моделирования временные зависимости параметров модели показаны на рис. 2 и 3.

Результаты моделирования свидетельствуют, что даже с учетом ощутимых возмущений и реалистичной точности измерения алгоритм управления обладает достаточной робастностью и позволяет стабилизировать натяжение ленты с погрешностью не более 5 % от номинала.

Из этих результатов следует также, что сила натяжения ленты не превышает 2 Н (200 г), при этом скорость вращения барабана намоточного устройства за 5 секунд упала с 314 до 297 рад/с, а момент на валу возрос с 0,35 до 0,37 Нм. Механическая мощность для двигателя барабана

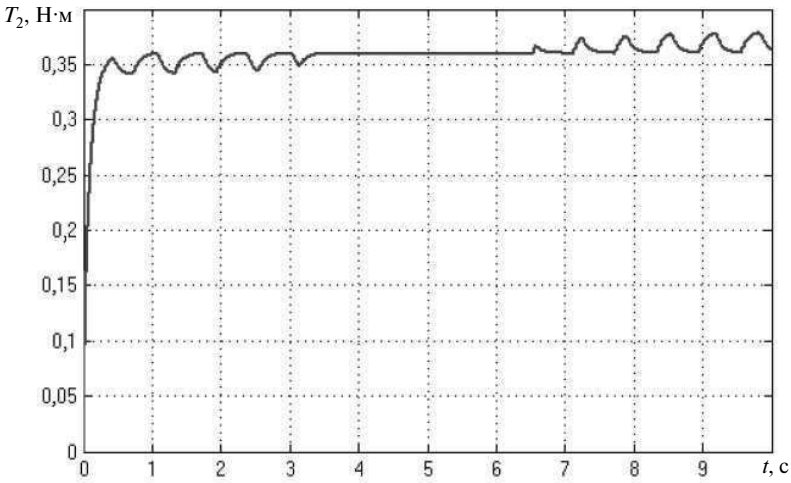


Рис. 2. Зависимость от времени момента вращения намоточного барабана $M_2(t)$, Нм

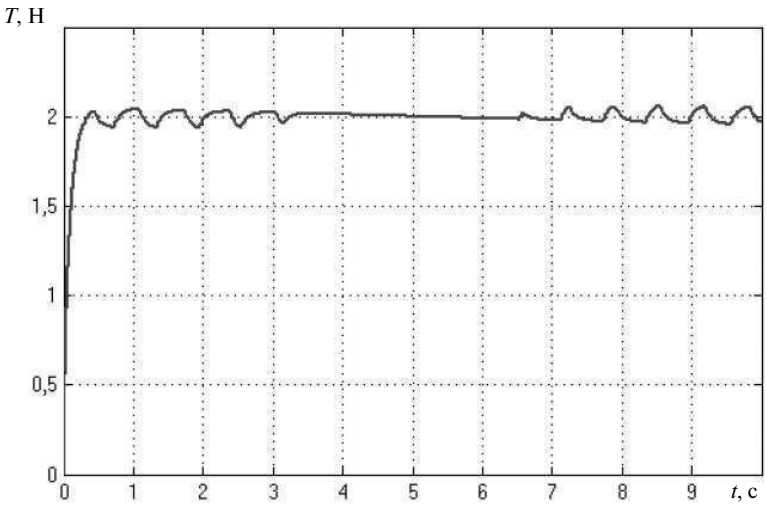


Рис. 3. Изменение силы натяжения ленты $T(t)$, Н

намоточного устройства оставалась постоянной и равной 110 Вт.

Управление на основе нелинейной модели

Нелинейную модель с уравнениями состояний (5), (2) и выходными переменными (7) можно привести к линейному виду с помощью специального преобразования координат. Для этого продифференцируем выражения (7) по времени:

$$\dot{T} = K(r_2\omega_2 - r_1\omega_1) + D(\dot{\omega}_2 r_2 - \dot{\omega}_1 r_1 + \omega_2 \dot{r}_2);$$

$$\dot{V} = \frac{1}{2}(r_1\dot{\omega}_1 + \dot{r}_2\omega_2 + r_2\dot{\omega}_2). \qquad (15)$$

Раскрывая выражения для производных $\dot{\omega}_i$ и $\dot{r}_2$, можно переписать (15) в виде

$$\begin{pmatrix} \dot{T} \\ \dot{V} \end{pmatrix} = B(T, r_2, \omega_1, \omega_2) + A(T, r_2, \omega_1, \omega_2)\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix};$$

$$A = \begin{pmatrix} \dfrac{-Dr_1}{J_1} & \dfrac{Dr_2}{J_2} \\ \dfrac{r_1}{2J_1} & \dfrac{r_2}{2J_2} \end{pmatrix};$$

$$B=\begin{pmatrix} K(\omega_2 r_2-\omega_1 r_1)+D\left[C_1+\delta\dfrac{\omega_2^2}{2\pi}\right] \\ \delta\omega_2^2 4\pi+C_2 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где обозначено

$$C_1=-\frac{r_1}{J_1}Tr_1-\omega_1\beta_1-$$

$$-\frac{r_2}{J_2}\left(Tr_2+\beta_2\omega_2+2K_j\delta r_2^3\omega_2^2/\pi+\delta\frac{\omega_2^2}{2\pi}\right);$$

$$C_2=\frac{r_1}{2J_1}(Tr_1-\omega_1\beta_1)-$$

$$-\frac{r_2}{2J_2}\left(Tr_2+\beta_2\omega_2+2K_j\delta r_2^3\omega_2^2/\pi\right).$$

Отсюда линеаризующая обратная связь для модели (16) задается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \dfrac{-Dr_1}{J_1} & \dfrac{Dr_2}{J_2} \\ \dfrac{r_1}{2J_1} & \dfrac{r_2}{2J_2} \end{pmatrix}^{-1}\times$$

$$\times\left(\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}-B(T,r_2,\omega_1,\omega_2)\right). \quad (17)$$

Обратная связь (17) преобразует нелинейную систему в линейную вида $\begin{pmatrix} \dot{T} \\ \dot{V} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$ со входами v_1, v_2, для которой задача управления может быть решена применением двух ПИД-регуляторов.

Рассмотрим адаптивную стратегию для идентификации параметра K, определяющего упругость ленты. Поскольку K входит в выражение (15) для M в линейном виде и при этом второй выход V не зависит от K, то задача адаптации параметра K становится одномерной и $\dfrac{\partial B}{\partial K}=\omega_2 r_2-\omega_1 r_1$. Отсюда можно записать схему адаптации оценки параметра $\hat{K}$ в таком виде:

$$\dot{\hat{K}}=k_\theta\frac{T-T_{ref}}{\omega_2 r_2-\omega_1 r_1}. \quad (18)$$

Нелинейная модель процесса намотки аморфной ленты была реализована в среде MATLAB/Simulink. В качестве параметров модели использованы следующие значения: J_1 = 10; J_0 = 0,184; r_0 = 0,175; β_1 = 0,1; β_2 = 0,1; δ = = 0,2·10^{-3}; K_j = 1,8·10^3; K = 10^4; D = 1; r_1 = 0,175. Для уставок выбрано V = 30 м/с, T = 2Н. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Для адаптации приняты начальное значение неизвестного параметра $\hat{K}(0)=0$ и коэффициенты $k=k_\theta=5$. Коэффициент K учитывает растяжение ленты при приложении силы T. Динамика изменения параметра $\hat{K}$ показана на рис. 5.

Из данных моделирования следует, что оба регулируемых параметра достигают своих значений за 2 с, а оценка коэффициента жесткости ленты достигает своего номинального значения $K=10000$.

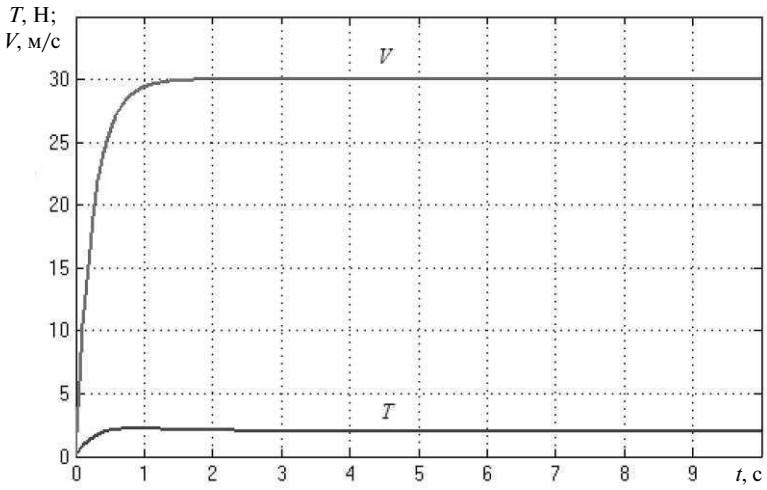


Рис. 4. Динамика управляемых выходов $T(t)$ и $V(t)$

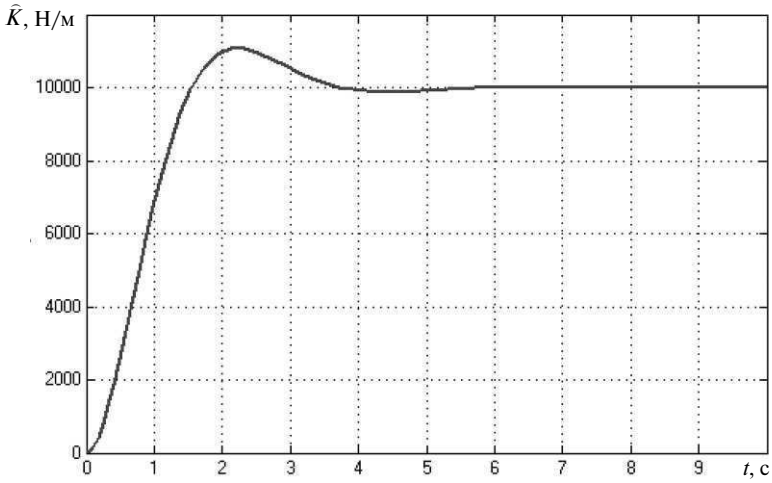


Рис. 5. Динамика адаптации параметра $\hat{K}(t)$

В работе рассмотрен процесс смотки с технологического барабана литейного комплекса аморфной ленты. Представлена нелинейная модель, учитывающая упругие свойства металлической ленты. Предложены два решения задачи управления с целью обеспечения заданной линейной скорости и допустимого уровня натяжения ленты.

Первое решение базируется на упрощенном допущении, что лента обладает абсолютной жесткостью. Также считается, что технологический барабан вращается с постоянной скоростью. Задача состоит в синхронной подстройке скорости и момента вращения барабана намоточного устройства к технологическому барабану литейного комплекса. Показано, что нелинейная обратная связь позволяет решить задачу синхронизации и предложенное решение обладает достаточной робастностью к внешним возмущениям.

Второе решение базируется на адаптивной линеаризации по обратной связи. С помощью нелинейного преобразования координат система с выходами поступательной скорости и силы натяжения ленты приводится к линейной управляемой форме. Для адаптации параметра жесткости использована еще одна линеаризующая обратная связь.

С практической точки зрения при проведении дальнейших исследований интерес представляет сравнение двух подходов и уточнение модели процесса намотки ленты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанотехнологии и специальные материалы [Текст] : учеб. пособие / Ю. П. Солнцев [и др.]. — СПб.: Химиздат, 2009. — 335 с.

2. **Волков А.Н.** Проблемы разработки и исследования вариантов конструкции автоматизированного оборудования для высокоскоростной намотки аморфной ленты [Текст] / А.Н. Волков, Ю.В. Гичев, В.А. Дьяченко, А.П. Петкова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. — 2011. №3(130) — С. 132–138.

3. **Baumgart, M.** Robust control of nonlinear web-winding systems with and without tension sensors [Текст] / M. Baumgart, L. Pao // ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control.— 2007. Vol. 129, № 1.— P. 41–55.

4. **Koc, H.** Modeling and robust control of winding systems for elastic webs [Текст] / H. Koc, D. Knittel, M. Mathelin, G. Abba // IEEE Trans. Control Systems Technology.— 2002. Vol. 10, № 2.— P. 197–208.

5. Lu, Y.. Advanced Control for Tape Transport [Текст]: Y. Lu.— Ph. D. Thesis, Carnegie Mellon University, 2002.

УДК 519.672

А.И. Боровков, В.В. Грунин, Ю.Л. Рутман

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Ежегодно в мире транспортируется около 10 млн упаковок с радиоактивными веществами различного вида [5]. Обеспечение безопасности транспортирования радиоактивных веществ и изделий на их основе имеет большое значение в связи с потенциальным риском нанесения ущерба людям, окружающей среде и имуществу при их перевозке, выполнении погрузочно-разгрузочных операций и промежуточном хранении. Мировое сообщество выработало ряд правил для хранения и перевозки радиоактивных веществ, такие, например, как правила МАГАТЭ [1].

Разработан так называемый сухой метод хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в специальных контейнерах [6]. Эти контейнеры могут использоваться для транспортировки ОЯТ в места их переработки или захоронения. Для этого было спроектировано множество разновидностей контейнеров (металлобетонные, чугунные, металлические). К контейнерам предъявляются серьезные требования по ударостойкости при возможных аварийных ситуациях. Одно из требований — сохранение прочности контейнеров при падении с 9 метров на абсолютно жесткую преграду. При таких падениях накапливается большая кинетическая энергия. Для ее поглощения разрабатывается специальная система амортизации (демпфирующие устройства), которая позволяет поглощать эту энергию и сокращать максимальные перегрузки, действующие на контейнер при падении. Демпфирующее устройство и контейнер вместе составляют транспортный упаковочный комплект (ТУК).

Данная статья посвящена исследованию системы упругопластической амортизации транспортного упаковочного контейнера ТУК-109, разработанной ОАО «КБСМ» и предназначенной для защиты контейнера с отработавшим ядерным топливом при вертикальном падении с 9 м [3]. В предварительных исследованиях был проведен ряд расчетов, которые позволили подобрать оптимальные параметры конструкции амортизации для ТУК-109. В процессе данных исследований был создан опытный образец ТУК и проведены испытания. В статье приведено описание конструкции транспортного упаковочного комплекта и строения его отдельных элементов. С помощью конечно-элементного пакета ANSYS/LS-DYNA выполнено исследование напряженно-деформированного состояния для пространственной модели транспортного упаковочного комплекта с учетом контактного взаимодействия [2]. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

Описание конструкции ТУК. Формирование и расчет динамической модели

Защитно-демпфирующий кожух (ЗДК) ТУК-109 состоит из трех соединенных между собой частей — корпуса, днища и крышки [3].

Защита боковой поверхности и торцевых поверхностей МБК осуществляется специальными пластическими амортизаторами, выполненными из труб. Материал труб — сталь.

Защита боковой поверхности ТУК осуществляется двумя поясами из 30 труб (292S8,5), установленных плотно (с минимально возможным по допускам зазором) на внутренней поверхности корпуса ЗДК.

Трубы в каждом поясе приварены через продольные прорези к оболочке корпуса и соединены между собой внутренними обечайками. Защита торцевых поверхностей ТУК осуществляется с помощью восьми радиально и восьми тангенциально установленных на днище и крышке ЗДК труб 299S12. Трубы соединены между собой на уровне середины сегментными пластинами. Днище и крышка ЗДК выполнены из двух пластин, соединенных между собой центральной втулкой, радиальными и тангенциальными ребрами, расположенными под трубами.

Днище и крышка через специальные фланцы соединяются с корпусом ЗДК, выполненным в виде цилиндрической оболочки с шпангоутно-

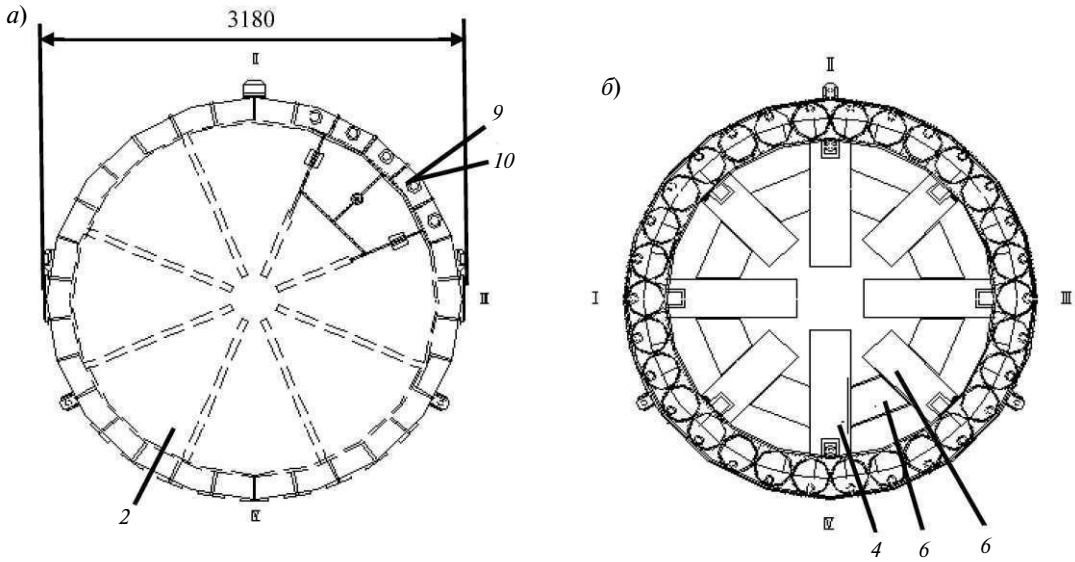


Рис. 1. Вид на крышку (*а*) и поперечный разрез ЗДК (*б*):
2 — крышка; *4* — труба; *5* — труба; *6* — вставка; *9* — втулка; *10* — гайка

стрингерным набором. Металлоконструкции ЗДК выполнены из стали.

На рис. 1 изображены вид на крышку и поперечный разрез ЗДК.

Как видно из рисунка, в силу того, что модель ТУК имеет восемь радиально расположенных ребер, четыре радиально расположенных трубы одной длины и еще другие четыре радиально расположенных трубы, то в силу циклической симметрии мы можем рассмотреть одну четвертую часть модели контейнера. При этом в модели учтены только те демпфирующие элементы ЗДК, которые находятся в зоне деформирования. Вертикальный пояс демпфирующих элементов, находящийся вне зоны деформирования и не влияющий на торможение контейнера, не рассматривается.

На рис. 2 представлена полная пространственная модель конструкции. Конечно-элементная модель ТУК (рис. 3) состоит из 8-узловых

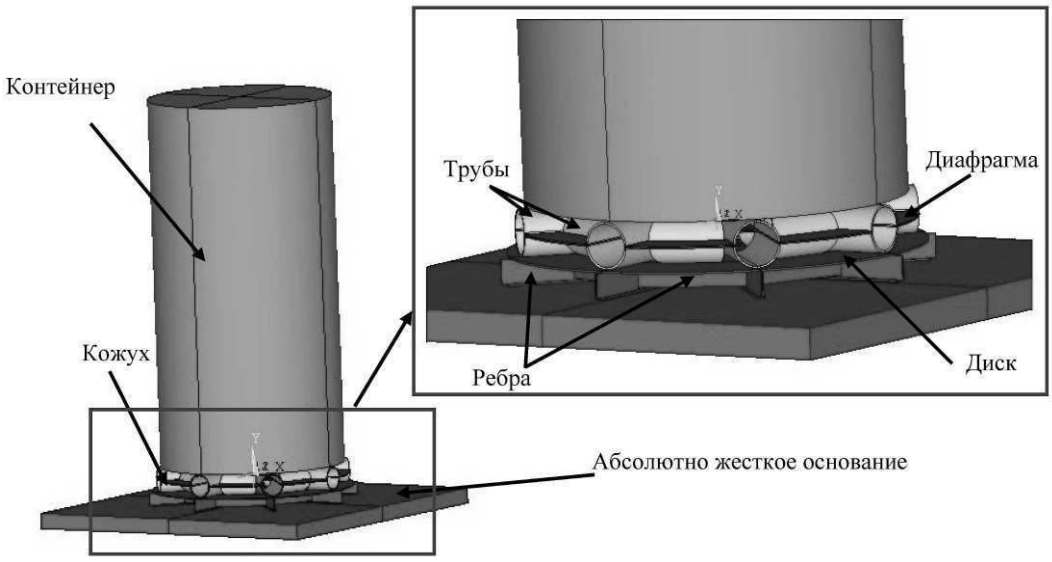


Рис. 2. Пространственная модель полной конструкции ТУК

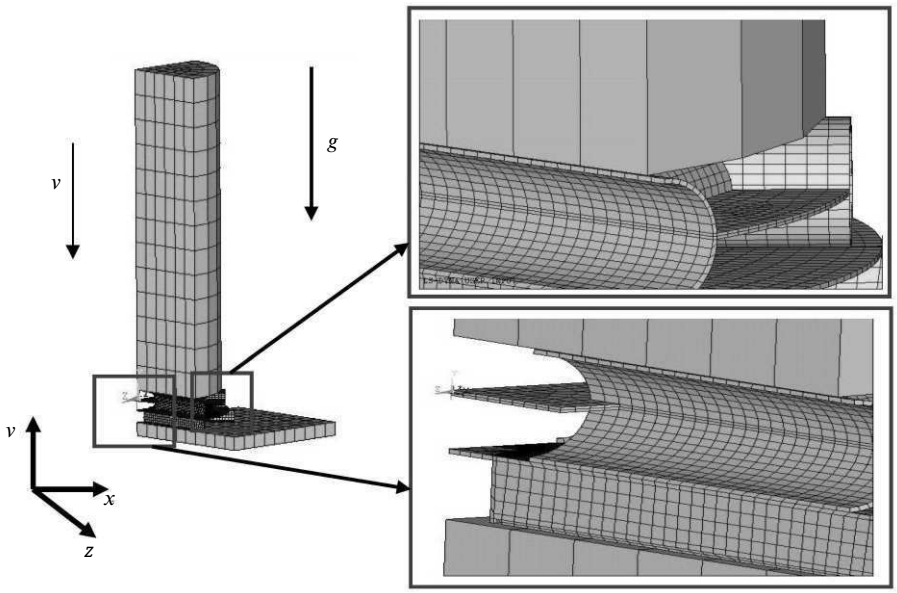


Рис. 3. Конечно-элементная модель пространственной модели ТУК

элементов «SOLID 164» [2]. Так как достаточно сложно предсказать точную зону контакта из-за постоянно меняющейся геометрии конструкции в процессе деформирования, то по всем плоскостям задан автоматический выбор контактных зон с коэффициентом трения $\mu = 0{,}15$. Конечно-элементная модель имеет NDF = 49656 (NDF — общее число степеней свободы), при этом сетка состоит из 16552 узлов и 8953 элементов.

В расчете рассматривалась соответсвующая кинематическому упрочнению билинейная упругопластическая диаграмма деформирования для материала элементов амортизации ТУК-109, труб и ребер.

Материал, из которого изготовлены трубы, — сталь 10Г2 [3].

При этом характеристики материала труб приняты следующими: модуль Юнга $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$; плотность $\rho = 7850$ кг/м^3; предел текучести $\sigma_{02} = 370$ МПа; предел временного сопротивления $\sigma_в = 516$ МПа.

Материал, из которого изготовлены ребра, — сталь 09Г2С-СА. При этом характеристики материала ребер приняты следующими [3]: модуль Юнга $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, плотность $\rho = 7850$ кг/м^3, предел текучести $\sigma_{02} = 455$ МПа, предел временного сопротивления $\sigma_в = 576$ МПа.

Контейнер моделировался упругим телом с соответствующими обобщенными физико-механическими и массовыми свойствами. Диски, диафрагмы, соединяющие ребра и трубы в кожухе, имеют материал ребер, т. е. сталь 09Г2С-СА, и такие же физико-механические характеристики.

Жесткое основание моделировалось как недеформируемое объемное твердое тело с помощью модели материала Rigid [2].

Как видно из рис. 3, трехмерная модель имеет две плоскости симметрии — *xy* и *yz*, нормальные перемещения и касательные напряжения равны нулю. На границе, полученной в результате разреза модели плоскостями симметрии, поставлены условия симметрии. К узлам элементов, моделирующих контейнер и кожух (рис. 3), приложены гравитация в виде ускорения свободного падения $g = 9{,}81$ м/с^2 и начальная скорость $v_y = -13{,}288$ м/с^2, равная скорости падения ТУК в момент удара о землю при вертикальном падении с 9 м. Длительность процесса составляет 30 мс.

На рис. 4 представлено поле вертикальных перемещений для трехмерной модели в момент, когда скорость контейнера равна нулю.

На рис. 5 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу для трехмерной модели в момент, когда скорость контейнера равна нулю.

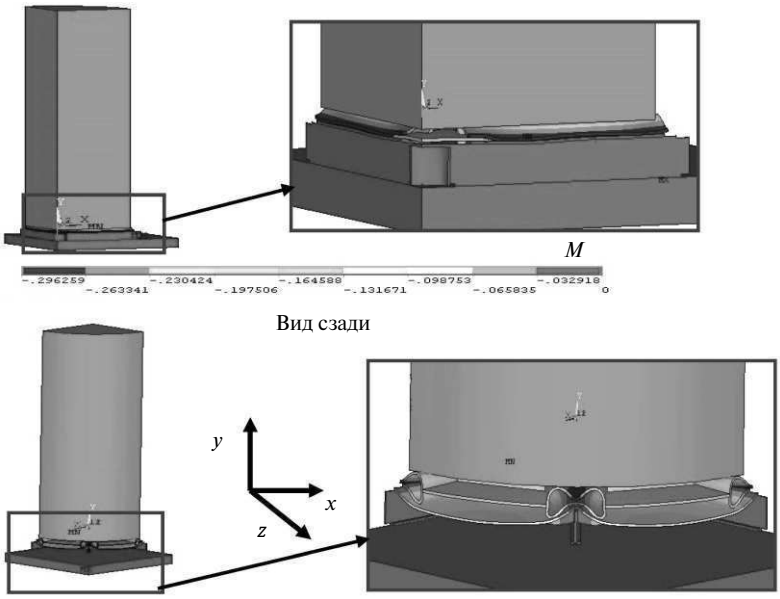


Рис. 4. Распределение вертикальных перемещений в момент равенства нулю скорости контейнера

Как видно из рис. 5, напряжения в элементах кожуха в процессе деформирования не превышают 544 МПа для материала ребер и соединительных элементов (диафрагма, диски) из стали 09Г2С-СА и 465 МПа для материала труб 10Г2. Поэтому можно сделать вывод, что не происходит разрушения элементов кожуха, т. к. не превышается предел прочности, но при этом возможны потрескивания в особенно напряженных местах. Поскольку кожух служит для обеспечения поглощения кинетической энергии при падении и уменьшения перегрузок, действующих на контейнер, то непревышение предела прочности для элементов кожуха — достаточное условие соблюдения прочности для его элементов [4], так как требования к прочности элементов кожуха не предъявляются [3]. Ход контейнера по вертикали составляет примерно 0,21 м (см. рис. 4), при этом трубы сжимаются не полностью, не происходит жесткого удара и амортизация сохраняет свою работоспособность в процессе всего времени падения.

На рис. 6 представлен график зависимости ускорения контейнера от времени.

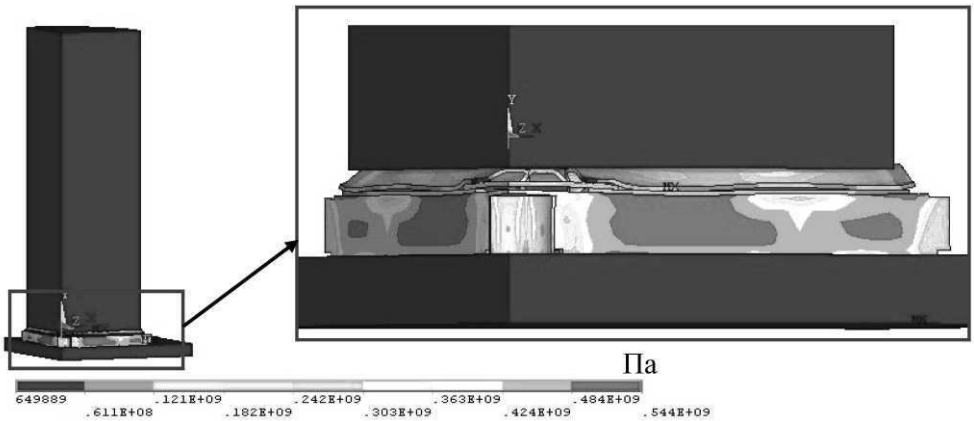


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в момент равенства нулю скорости контейнера

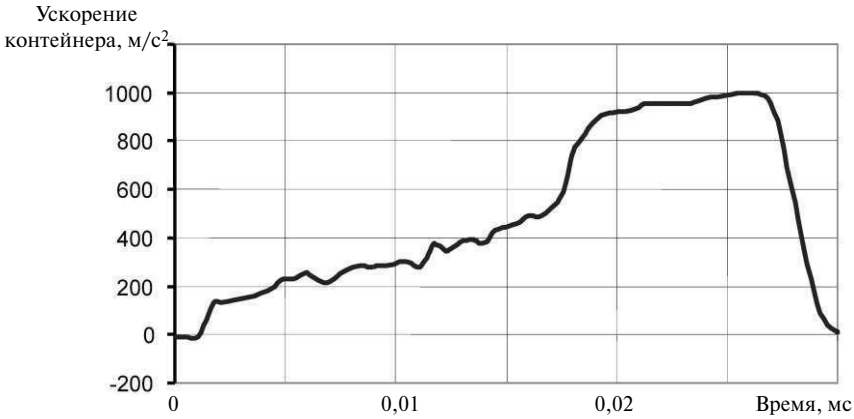


Рис. 6. График зависимости ускорения контейнера от времени

Как видно из графика, представленного на рис. 6, процесс до момента, когда скорость контейнера станет равной нулю, длится 27 мс. При этом максимальное ускорение, которое действует на контейнер и составляет 998 м/с^2 (перегрузка 102g), достигается в тот момент, когда скорость контейнера равняется нулю. Допускаемое максимальное ускорение, действующее на контейнер, составляет 200g. Как показали эксперименты, проведенные для экспериментального образца ТУК, перегрузки для различных вариантов падения не превышают 100g [3].

В результате проведенных исследований была разработана методика проведения конечно-элементного исследования напряженно-деформированного состояния ТУК с учетом пространственного контактного взаимодействия и меняющейся в процессе деформирования геометрии. Оценка сравнительно с экспериментальными данными показала достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных — расхождение составляет не более 5 %. На основании проведенных расчетов можно утверждать, что безопасность контейнера обеспечена при падении с 9 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нормы МАГАТЭ** по безопасности. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Требования безопасности. № TS-R-1 [Текст] / Международное агентство по ядерной безопасности.— 2009.

2. ANSYS 14.0 Manual.

3. Комплект транспортный упаковочный для хранения и транспортирования ОЯТ АЭС с реакторами РБМК-1000. Технический проект. Расчет нагрузок [Текст] / ГП КБСМ.— СПб., 1999.— 210 с

4. **Колмогоров, В.П.** Напряжения, деформации, разрушения [Текст] / В.П. Колмогоров.— М.: Металлургия, 1970. — 2 29 с.

5. Ядерная опасность. Вопросы транспортировки ОЯТ [Текст].— М.: Эпицентр, 2003.

6. **Вудвард, Б.** Технологии сухого хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива и высокоактивных отходов компании [Текст] / Holtec International 555.— Линкольн Драйв Уэст Марлтон.— Нью-Джерси, США. 2011.— М.: Атомэко, 2011.

УДК 681.784.3.

Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарёв, Е.Н. Соснов

ЛАЗЕРНО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ТРЕХМЕРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕЛЕКАМЕРЫ

В последние годы большое внимание уделяется созданию новых систем технического зрения (СТЗ) для робототехнических комплексов, в том числе космического назначения. Бурное развитие отрасли обусловлено стремительным прогрессом как телевизионной аппаратуры, так и лазерной техники. Уменьшение массогабаритов и энергопотребления позволяет оснащать активной сенсорикой космические манипуляторы и автономные мобильные платформы. Вместе с тем возникли новые задачи, в частности связанные с разработкой алгоритмов обработки большого объема информации в реальном времени в автономном или автоматическом режимах. В предлагаемой статье изложен подход к построению лазерно-телевизионной триангуляционной системы трехмерного позиционирования с высокоскоростной телекамерой для использования в космических транспортно-манипуляционных система (КТМС).

Лазерно-телевизионная триангуляционная система трехмерного позиционирования подразумевает, что измерения координат объектов осуществляются по триангуляционной схеме. Базу этой системы составляют лазерный источник структурированной подсветки и приемная телевизионная камера. Трехмерное позиционирование подразумевает управление положением зоны лазерной подсветки в пространстве и времени. Изменяя это положение и используя высокую скорость получения визуальной информации, можно существенно снизить длительность одного цикла измерений в фиксированной рабочей зоне. В основу разрабатываемой системы легли результаты ранее выполненных исследований систем технического зрения со структурированной подсветкой, приведенные в работах [1–6].

Основная особенность СТЗ, рассматриваемой в статье, — выполнение требований к достижению определенной точности измерения координат объектов в условиях высокого контраста освещенности при жестких ограничениях на массогабаритные характеристики и энергоемкость. Одним из существенных ограничений был малый размер базы измерений — он не превышал 15 см. В качестве приемной системы использовалась монохромная видеокамера Baumer HXC40NIR, имеющая CMOS матрицу 1″, с разрешением 2048×2048 пикселей и скоростью съемки до 180 кадров в секунду. При выборе объектива камеры необходимо было учитывать, какое поле зрения камеры мы должны обеспечить. На рис. 1 приведена зависимость поля зрения от фокусного расстояния объектива при размере приемной матрицы камеры 1 дюйм (1″).

Зная такие параметры, как фокусное расстояние объектива (угол зрения), расстояние до объекта, формат матрицы видеокамеры и общее количество пикселей видеокамеры, легко оценить минимальный размер обнаруживаемого объекта. На рис. 2 приведены зависимости минимально различимого объекта от угла зрения камеры при дальности до объекта 1,5 м, 2,5 м и 5 м. Из него видно, что зависимость носит линейный характер как по углу зрения, так и по дальности.

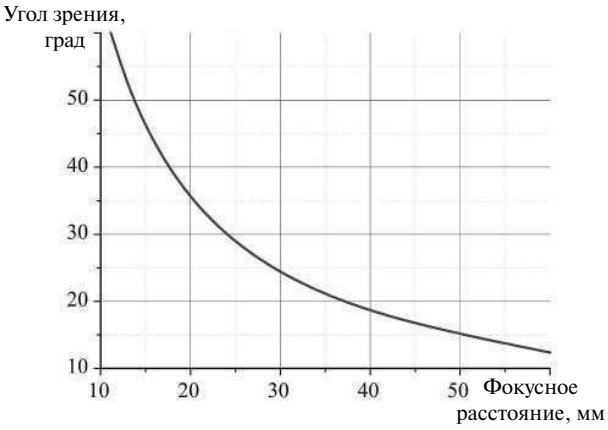


Рис. 1. Зависимость поля зрения от фокусного расстояния объектива при размере приемной матрицы камеры 1″

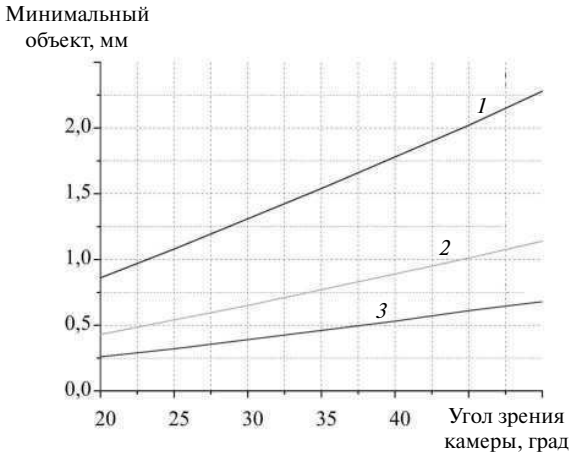


Рис. 2. Зависимость размеров минимального обнаруживаемого объекта камерой Baumer HXC40NIR от угла зрения камеры при различных дальностях до объекта (*1* – 5 м; *2* – 2, 5 м; *3* – 1, 5 м)

По классическим формулам триангуляции [7, 8] предельная дальность, на которой работает триангуляционный метод, может быть оценена следующим образом:

$$\frac{b}{d_{\max}} = \frac{1}{N}\operatorname{tg}\left(\varphi_{\max}/2\right),$$

где b — база измерений, $d_{\max}$ — максимально возможная дальность измерений, N — число элементов в строке (столбце) приемной матрицы, $\varphi_{\max}$ — полное поле зрения видеокамеры. В нашем случае она превышает 740 м. Что касается погрешности определения дальности, то данный параметр зависит не только от дальности, но и от углового разрешения камеры, а конкретнее — от точности определения положения центра линии. Относительная погрешность определения дальности при угловом разрешении в 1 пиксель можно оценить по формуле

$$\frac{\Delta d}{d} > \frac{1}{N}\frac{d}{b}\operatorname{tg}\left(\varphi_{\max}/2\right).$$

Выполненные оценки показывают, что погрешность определения дальности до объекта составит 13 см на расстоянии 10 м, 3 см — на дистанции 5 м, 1 см — на 3м, 5,4 мм — на 2 м, 1,3 мм — на расстоянии 1 м. Заметим, что полученные оценки соответствуют погрешности измерений координаты линии подсветки в 1 пиксель. При использовании специальных алгоритмов обработки информации (например, при определении центра тяжести линии) и достаточно сильном сигнале можно достичь субпиксельной точности определения координат объекта.

Еще один аспект, который требует достаточно серьезного рассмотрения, — это создание электронно-переключаемого лазерного узла структурированной подсветки. В предыдущих работах [1–6] для формирования диаграммы направленности использовалось единое цилиндрическое зеркало. Опыт работы показал, что юстировка такого узла — крайне сложная и трудоемкая задача, при этом формируемое семейство линий подсветки оказывается неудобным для вычислений, поскольку они образуют расходящийся веер.

В состав предлагаемой системы лазерных генераторов линий с независимыми зеркалами входят восемь лазерных диодов L808P200 фирмы THORLABS. Их характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры диодов L808P200

Параметр	Значение		
	Минимальное	Типичное	Максимальное
Длина волны излучения, нм	805	808	811
Пороговый ток, мА	60	80	100
Рабочий ток, мА	220	260	300
Рабочее напряжение, В	1,8	2,0	2,5
Выходная оптическая мощность, мВт	180	200	220
Расходимость 1, град	8	10	12
Расходимость 2, град	25	30	40

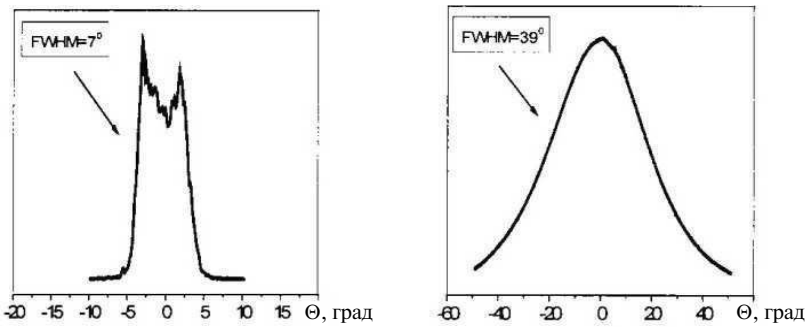


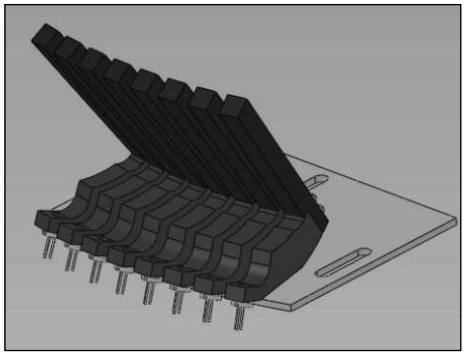
Рис. 3. Угловое распределение выходного излучения, характерное для лазерных диодов

Классическое угловое распределение выходного излучения лазерных диодов приведено на рис. 3. Одним из основных параметров, которые необходимо учитывать при построении лазерно-телевизионной системы измерения координат, является расходимость излучения в двух ортогональных направлениях. Контроль этого параметра осуществлялся с помощью системы комплексной диагностики параметров лазерного пучка BeamPro. Расходимость по двум ортогональным направлениям по уровню 0,7 составила соответственно 10,6 и 31,8 градусов с точностью до 20 угловых минут.

Для получения отдельной лазерной линии излучатель размещался таким образом, чтобы в направлении, в котором расходимость лазерного пучка составляет 10 градусов, он находился в фокусе своего цилиндрического зеркала. Тогда для другого направления распространения излучения (с расходимостью в 30 градусов) цилиндрическое зеркало работает как плоское. Для экспериментального образца был изготовлен набор цилиндрических зеркал с радиусом кривизны 60 мм (фокусное расстояние 30 мм). После отражения от зеркала по одному из направлений излучение оказывается сформированным в коллимированный пучок (вместо расходимости 10 градусов), а по другому направлению оно сохраняет расходимость в 30 градусов. Ширина коллимированного пучка определяется расстоянием между излучателем и зеркалом и расходимостью пучка. Для приведенных выше значений ширина лазерной линии в пространстве составляет 5,4 мм с учетом размеров излучающей площадки. Конструкция в трехмерном изображении (*а*) и фотография (*б*) блока излучателей приведены на рис. 4.

Блок управления лазерно-телевизионной триангуляционной системой трехмерного позиционирования, ориентированный на применение в составе КТМС, должен выполнять следующие основные задачи: во-первых, задавать режим работы видеокамеры, во-вторых, управлять работой лазерных излучателей подсветки и, в-третьих, обеспечивать синхронизацию работы этих двух основных частей измерительной системы.

а)



б)

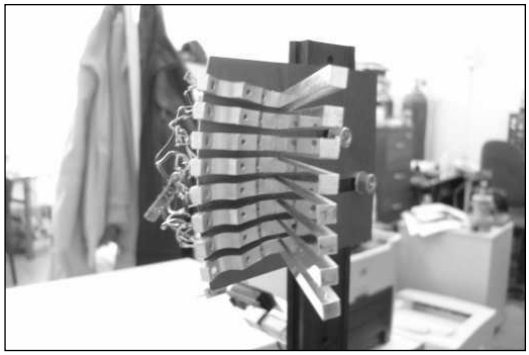


Рис. 4. Блок лазерных излучателей

Управление телевизионной камерой (время экспозиции, усиление сигнала и другие параметры) осуществляется из программно-аппаратного комплекса на базе персонального компьютера через USB-кабель при помощи программного обеспечения, поставленного разработчиком телевизионной камеры Baumer HXC40NIR. Параметры камеры задаются до начала работы и сохраняются в течение всего цикла измерений. При существенных изменениях условий освещенности, влияющих на точность измерений, программа останавливает сбор информации с камеры, перенастраивает режим, после чего заново запускает рабочий цикл.

Управление активной лазерной подсветкой осуществляется специально разработанной платой, в задачи которой входит включение и выключение одного или нескольких лазерных излучателей в определенные моменты времени, регулирование уровня выходной мощности излучателя. Как и управление видеокамерой, управление микропроцессором блока подсветки, размещенном на этой плате, также осуществляется из программно-аппаратного комплекса; с телевизионной камеры на него поступает только кадровый синхроимпульс, задающий момент начала времени экспозиции.

Микропроцессор осуществляет программную задержку на 30 мкс относительно кадрового синхроимпульса, после чего подает импульс синхронизации подсветки на 8-канальный ЦАП. Длительность импульса синхронизации подсветки выставляется равной длительности экспозиции, информация о которой поступает с программно-аппаратного комплекса.

Помимо информации о длительности экспозиции перед каждым кадровым синхроимпульсом на микропроцессор поступает информация о мощности каждого из восьми лазерных диодов. Эти данные микропроцессор транслирует на восьмиканальный цифроаналоговый преобразователь, выдающий соответствующие аналоговые сигналы на управляемые источники тока. Последние по импульсу синхронизации подсветки формируют импульсы тока заданной величины в лазерных диодах. Для лазерных диодов, не участвующих в работе при съемке данного кадра, информация о величине сигнала, подаваемая на микропроцессор, соответствует нулевому уровню выходной мощности.

Поскольку при измерении рельефа поверхности международная космическая станция (МКС) предполагает использовать дифференциальный режим измерений, то для его реализации осуществляется последовательная съемка рабочей зоны кадров с подсветкой и без подсветки с дальнейшим вычитанием одного из другого.

Для оптимизации работы системы используют синхронизацию съемки одного кадра с включением подсветки. Это осуществляют путем одновременного включения одного или нескольких лазерных диодов (в зависимости от режима работы) и съемки нечетного кадра. На рис. 5 показана временная диаграмма работы камеры с подсветкой в каждом кадре.

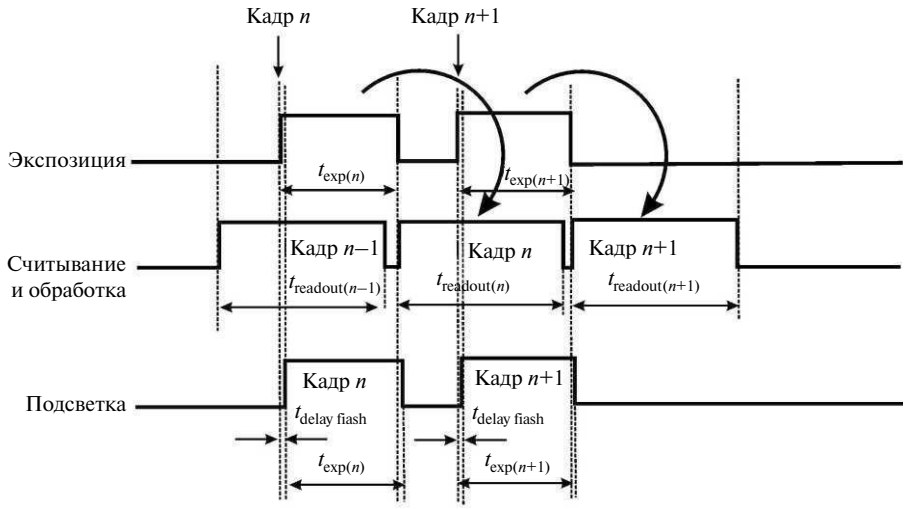


Рис. 5. Временная диаграмма схемы синхронизации

Обратная связь строится по освещенности, которую создает каждый из источников на матрице телекамеры. В связи с этим одной из функций управляемых источников тока является ограничение силы тока предельно допустимым значением. Использование импульсного режима подсветки с высокой скважностью позволяет в некоторой степени повысить пиковую мощность излучения по сравнению с допустимой средней интенсивностью излучения.

Подобная организация электронной схемы адаптивного управления подсветкой и телевизионной камерой позволяет гибко варьировать режимы работы, однако предъявляет определенные требования к программно-аппаратному комплексу. Его процессорных мощностей должно хватать на то, чтобы одновременно принимать данные с телевизионной камеры, обрабатывать их и управлять микропроцессором системы активной подсветки. При этом работа должна быть организована циклически так, чтобы передача данных о мощности излучателей на микропроцессор была полностью завершена до прихода кадрового синхроимпульса.

Созданная на основе изложенных соображений лазерно-телевизионная триангуляционная система трехмерного позиционирования была экспериментально исследована в условиях различной освещенности рабочей зоны. Измерения проводились в двух режимах освещенности. В первом (ночном) режиме создавались условия для максимального снижения фоновой засветки. Второй режим моделировал условия интенсивной солнечной засветки, характерной для околоземной орбиты. При этом речь шла только о световом поле излучения Солнца, никакие потоки заряженных частиц не моделировались.

Кроме того, чтобы промоделировать солнечную засветку не обязательно обеспечивать освещение всей рабочей зоны. В экспериментах создавалась засветка небольшого участка рабочей зоны и исследовалась возможность проведения измерений при различных наборах светофильтров, установленных на объективе видеокамеры. Имитатор солнечной засветки был создан на основе белого теплого светодиода HPR40E-19K100YWG (он имеет спектральное распределение излучения, максимально приближенное к излучению Солнца) и оптической системы формирования коллимированного пучка с интенсивностью непрерывной засветки 140 мВт/см^2.

Рис. 6 иллюстрирует важность использования специальных светофильтров для проведения измерений. Без применения специальных светофильтров проведение каких-либо измерений или мониторинга в зоне засветки не представлялось возможным (см. рис. 6, *а*). Использование абсорбционного светофильтра КС-19 значительно улучшало ситуацию (см. рис. 6, *б*). Лучшие результаты были получены при использовании специально изготовленного интерференционного фильтра на 808 нм (см. рис. 6, *в*).

При наличии узкополосного фильтра, имеющего максимум пропускания на рабочей длине волны лазерных излучателей, солнечная засветка не влияла на точность определения координат объектов. Используемая видеокамера способна работать со скоростью съемки до 180 кадров/с,

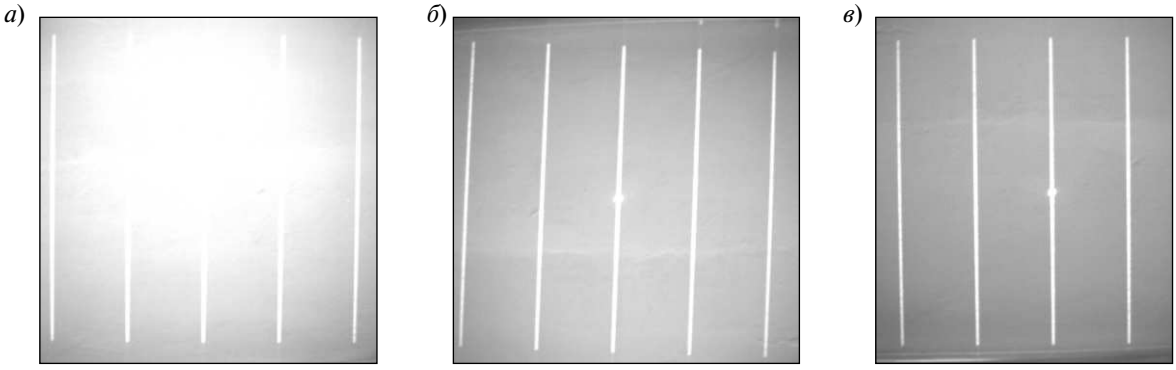


Рис. 6. Изображение лазерных линий, полученное в условиях имитации солнечной засветки без фильтра (*а*), с абсорбционным светофильтром КС-19 (*б*) и с узкополосным интерференционным фильтром (*в*)

однако основная серия опытов проводилась на частоте 100 Гц.

В табл. 2 приведены данные по экспериментально полученным погрешностям измерений координат объектов (серии по 10 измерений). Под погрешностью в проведенной серии измерений в данном случае понимается среднее отклонение измеренного значения дальности от истинного значения.

В проведенных измерениях не применялись специальные алгоритмы обработки информации. При тестовом использовании специальных алгоритмов обработки, позволяющих получать субпиксельное разрешение, которые проводились в полуавтоматическом режиме тестирования программы обработки, удалось повысить точность определения координат объектов практически на порядок.

Проведенные исследования зависимости точности определения координат от скорости съемки при полном разрешении показали, что для дальностей менее 3 м увеличение частоты кадров не оказывает заметного влияния на результаты измерений координат. Вместе с тем высокая частота обновления позволяет получать необходимый объем информации об объекте за меньшее время. На расстояниях более 7–8 м из-за уменьшения плотности мощности излучения в лазерной линии на больших частотах начинает сказываться уменьшение сигнала, приводящее к снижению точности определения расстояний.

Основная часть измерений проводилась с объективом телекамеры, обеспечивающим угол зрения 45 градусов. Переход к объективу с углом зрения 60 градусов приводил к увеличению погрешности на 20 %. Для больших дальностей необходимо или снизить требования по точности, что абсолютно естественно с точки зрения организации работы КТМС, или существенно повысить сложность алгоритмов подсветки и обработки информации.

Таблица 2

Результаты определения погрешности измерения координат

Дальность, м	Точность, мм	
	Без засветки	С засветкой
10,2	135	140
4,9	32	35
3,1	10	11
1,9	4	5
1,1	1,1	1,3

Из результатов исследований зависимости погрешности измерений от формы линии подсветки можно сделать следующие выводы. Во-первых, с точки зрения времени обработки информации и простоты построения алгоритмов обработки наиболее выгодным оказывается метка в виде одной прямой линии, т. е. режим последовательного переключения лазерных излучателей с одной линии подсветки на другую. При этом наличие подсветки соответствует только четным кадрам съемки.

Одновременное включение всех линий подсветки уменьшает время сбора координатной информации, но усложняет процедуру, а следовательно, и время обработки. Существует большой набор режимов, который требует значительного объема экспериментальных исследований. Однако при достижении требуемой точности с помощью простого алгоритма нецелесообразно усложнять схему управления и процедуру обработки без существенного выигрыша в результате.

Основным результатом проведенных экспериментальных исследований можно считать подтверждение на опыте всех основных сделанных ранее оценок и разработанных методик и алгоритмов, реализующих технологию лазерно-телевизионных измерений координат объектов для экспериментального модуля сенсорной системы КТМС. В наиболее интересном с точки зрения работы КТМС диапазоне дальностей система работает с требуемой погрешностью даже без сложных алгоритмов обработки получаемых изображений, что позволяет надеяться на возможность функционирования таких систем в полностью автоматическом режиме. Это обусловлено не только простотой и надежностью алгоритма, но и возможностью осуществлять все операции в реальном времени.

Из наиболее значимых результатов следует отметить следующее. Во-первых, использование узких интерференционных фильтров на входном объективе видеокамеры позволяет системе осуществлять измерения дальности с требуемой точностью даже в зоне интенсивной солнечной засветки. Во-вторых, работа видеокамеры на частотах кадров порядка сотен Герц в режиме поочередного включения лазерных излучателей

подсветки вместе с обеспечением необходимой точности измерений за счет дополнительного усреднения (или накапливания) получаемой координатной информации сопровождается существенным снижением потребляемой мощности, что крайне важно для мобильных систем космического назначения.

Эта экономия энергии определяется тем фактом, что в каждом четном кадре работает, т. е. потребляет энергию, только один излучатель. Кроме того, такой импульсный режим с большой скважностью позволяет использовать лазерный диод в сильно нагруженном режиме, повышая яркость генерируемых линий подсветки. Это, конечно, несколько снижает эффект экономии энергии, но по сравнению с восьмикратным снижением энергопотребления в нормальном режиме работы этот факт можно не принимать во внимание.

Возможность работы с повышенной яркостью означает увеличение предельных дальностей в случае, если такая проблема вдруг возникла. Хотя использовать такой режим в качестве штатного не рекомендуется, поскольку он снижает не только общий ресурс системы, но и степень ее надежности.

Еще один важный аспект — использование высокоскоростной камеры для созданной лазерно-телевизионной системы. Даже при полном разрешении по обеим координатам время получения координатной информации об объектах во всей рабочей области составляет от 50 до 100 мс в зависимости от используемого алгоритма включения-выключения линий подсветки. Для решения большинства задач КТМС допустимо снизить разрешение по одной из координат (параллельной линиям лазерной подсветки).

Использование такого режима (режим «Line Scan» для камер фирмы Baumer) позволяет получать информацию со скоростью более 700 кадров в секунду при разрешении 2048 512 пикселей. В этом случае время получения полного объема координатной информации не превышает 23 мс. Такие времена при простом алгоритме обработки позволяют восстанавливать трехмерный рельеф рабочей зоны в реальном времени. Кроме того, остается достаточно времени для сравнения выделенных объектов с априорно известными трехмерными моделями, для определения формы и ориентации этих объектов. Получение в реальном времени информации о координатах, образах и ориентации объектов обеспечивает возможность не только перемещения и фиксации КТМС на рабочей поверхности МКС, но и нормального манипулирования инструментами для поддержки внекорабельной деятельности космонавтов.

Несмотря на опасения, что величина базы измерений не позволит осуществлять определение дальности с требуемой точностью, эксперименты, последующая обработка их результатов и моделирование показали, что переход к более сложным алгоритмам на больших дистанциях полностью снимает указанную проблему. Вместе с тем можно смело утверждать, что в основной рабочей зоне система функционирует даже без применения специальных алгоритмов. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении выбранного угла обзора видеокамеры.

Общее сочетание широкого поля зрения, большой максимальной дальности и малой погрешности измерений на всем диапазоне углов и расстояний можно реализовать только за счет усложнения алгоритма обработки информации, мощности излучателей и увеличения времени обработки с заметным снижением достоверности получаемых результатов, что неминуемо отразится на уменьшении надежности работы комплекса в целом. Снижение надежности работы КТМС, предназначенной для функционирования в условиях космического пространства на поверхности МКС для обеспечения внекорабельной деятельности космонавтов, ради увеличения точности измерения координат на расстояниях более 10 м представляется абсолютно нецелесообразным.

Вместе с тем при работе КТМС желательно осуществлять контроль окружающего пространства, но данная процедура не выдвигает столь жестких требований по точности определения координат. Для этих целей можно и целесообразно использовать отдельную обзорную камеру для мониторинга окружающего пространства, а измерения производить только в ближней рабочей зоне.

Подводя итог сказанному, можно сделать вывод, что разработанная система измерения координат на базе высокоскоростной камеры и матрицы генераторов линий — весьма удобное

средство очувствления космических транспортно-манипуляционных систем, поскольку не содержит механических элементов сканирования, снижающих надежность комплекса в условиях космического пространства, легко адаптируется к условиям освещенности и спектру задач.

Кроме того, конечное число объектов позволяет эффективно осуществлять предварительное трехмерное моделирование процессов при относительно малых объемах передаваемой информации за счет эффективной векторизации изображения. Недостаток, связанный с большими зазорами между линиями подсветки при малом числе излучателей, в случае КТМС легко компенсируется как общим движением мобильной платформы, так и размещением разработанного лазерно-телевизионного комплекса на отдельном шарнире, играющем роль шеи и обеспечивающем вращение вокруг оси, общей для всех плоскостей излучений лазерных генераторов линий.

Статья была подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.518.11.7054 от 12 мая 2011 г. по мероприятию 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» и по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 27 мая 2010 г. № П 1003 с Минобрнауки России, заключенного в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». В работе использовался лазерный трекер API Radian, входящий в состав оборудования ЦКП ЛОТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грязнов, Н.А.** Объемное техническое зрение для автономизации робототехнических систем наземного базирования [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Труды IX Всеросс. научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника».— СПб.: Изд-во СПбПГУ, 2006.— С. 281.

2. **Gryaznov, N.** Structured laser lighting for camera-based analysis of 3D ambient image [Текст] / N. Gryaznov // Proceedings of the 15th ISTC / «Korea Workshop @ Future Intelligence and Material Technologies».— 2007.— P. 6.

3. **Грязнов, Н.А.** Структурированная лазерная подсветка для технологий трехмерного зрения робототехнических средств [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко, Е.В. Егоров // Оптический журнал.— 2007. Т. 74, № 8.— С. 37–43.

4. **Грязнов, Н.А.** Активные объектно-ориентированные системы технического зрения реального времени [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Труды XII-й Всеросс. научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника».— Дивноморское-Геленджик, Краснодарский край.— 2009.— С. 177.

5. **Грязнов, Н.А.** Тенденция развития и идеология построения систем сбора координатной информации [Текст] / Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев // Тр. межд. научн.-техн. семинара «Робототехника. Взгляд в будущее». СПб.: Из-во СПбПГУ, 2010.— С. 226–229.

6. **Грязнов, Н.А.** Компактные активные сенсорные средства для сбора информации с низким энергопотреблением [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Тр. междунар. конф. «Средства робототехники для обеспечения безопасности. Планетоходы, космическая робототехника, наземные роверы».— СПб.: Изд-во СПбПГУ, 2010.— С. 108.

7. **Назаров, А.С.** Фотограмметрия [Текст]: учебное пособие для студентов вузов / А.С. Назаров // Минск: ТетраСистемс, 2006.— 368 с.

8. **Обиралов, А.И.** Фотограмметрия [Текст] / А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова.— М.: КолосС, 2002.— 240 с.

УДК 539.261

В.Н. Востров, Н.А. Яблокова, П.А. Кононов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАСКАТАННЫХ ДЕТАЛЯХ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Целью данной работы было исследование неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей параметров напряженного и структурного состояний поверхностей детали с фланцем, изготовленным раскаткой на образующей части трубчатой заготовки из алюминиевого сплава АК7. Полученные данные необходимы для оценки ресурса работы детали.

Детали с фланцами, значительно удаленными от торца, находят широкое применение в машиностроении. Разработанная технология раскатки фланцев на образующей части трубчатой заготовки расширяет технологические возможности процессов объемного формообразования фланцев (поперечно-клиновая прокатка [1], выдавливание [2], торцовая раскатка [3] и др.).

Согласно новой технологии [4] деформирование заготовки осуществляют при поступательном перемещении инструмента одновременно с синхронным вращением заготовки и инструмента за счет контактного трения между их поверхностями. Процесс выполняется деформирующим роликом, установленным с возможностью вращения и поворота относительно оси заготовки.

Формообразование фланца выполняют в два этапа. На первом этапе осуществляют ротационную высадку заготовки и формируют на деформируемой части заготовки усеченный конус. При этом деформирующий ролик устанавливают под углом α_1 к оси приводной матрицы в диапазоне $15° < \alpha_1 < 40°$. На втором этапе деформируют образованный на первом этапе усеченный конус заготовки путем принудительного перемещения воздействующего ролика под углом α_2 к оси заготовки, причем $40° < \alpha_2 < 75°$.

Исследовался процесс раскатки деталей из алюминиевого сплава АК7. Химический состав сплава АК7 в процентах составляет: Al — от 87,4 до 93,86; Fe — до 1,3; Si — от 6 до 8; Ni — до 0,3; Cu — до 1,5; Mg — от 0,2 до 0,5; Zn — до 0,5; примесей — всего 4,1. Механические характеристики сплава: модуль упругости $E = 0{,}7 \cdot 10^5$ МПа (при температуре $T = 20$ °С), коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}345$.

Решетка сплава АК7 — гранецентрированная кубическая с размером ребра ячейки $a = 0{,}4047 \pm 0{,}0001$ нм. Данный параметр меньше, чем у чистого алюминия, что характерно для алюминиевых сплавов, содержащих кремний.

На точность определения методами рентгеноструктурного анализа величин компонентов напряжений в исследуемых деталях влияют метрологические параметры измерительного оборудования, структура и фазовый состав материала, форма и качество поверхности детали.

В деталях из алюминиевых сплавов, в отличие от других сплавов (никелевые, железо-никелевые, титановые и т. д.), неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей можно исследовать поверхностные слои до глубины порядка 20 мкм, используя рентгеновские трубки с разной длиной волны излучения. Таким путем можно получить информацию о влиянии способа обработки на напряженное состояние поверхностных слоев и структуру материала.

В работе использовался рентгеновский анализатор напряжений *XSTRESS* 3000 *G3R*. Данный дифрактометр имеет укороченную дугу гониометра, два полупроводниковых детектора, установленных на гониометре под углом 180 градусов, две оси вращения и проведения небольших осцилляций по направлениям вращения. Такая конструкция дифрактометра позволяет с высокой точностью проводить анализ параметров напряженного и структурного состояний сложных поверхностных слоев с крупнозернистой и текстурированной структурой материала.

Калибровка дифрактометра проводилась с использованием стандартного порошкового образца Al_2O_3 (ГСО 8631–2004) с параметрами кристаллической решетки $a = 0{,}47589 \pm 0{,}00004$ нм

и с = 1,29919±0,00001 нм (ромбоэдрическая сингония), а также эталонного порошкового образца из алюминия с параметром решетки a = 0,4049±0,0001 нм (кубическая сингония).

Первоначально выполнялась приближенная калибровка с использованием эталонного образца, которая позволила выбрать угловой диапазон сплава АК7. На следующем этапе проводилась точная калибровка с использованием стандартного образца. Данная калибровка обеспечила определение абсолютных значений межплоскостного расстояния исследуемого материала с точностью, необходимой для проведения трехосного анализа компонентов напряженного состояния поверхностных слоев деталей и параметров структуры материала.

Расчет структурных параметров детали

Точное определение положения дифракционной линии (пик интенсивности) — одна из наиболее важных задач при анализе параметров напряжений методом рентгеновской дифракции. Для определения положения дифракционной линии используют несколько видов расчетных функций, например кросс-корреляцию, функцию Пирсона VII и другие.

Функция Пирсона VII определяется по следующей формуле [5]:

$$F(X) = \frac{a_0}{\left[1 + 4\left(\frac{X - a_1}{a_2}\right)^2 \left(2^{1/a_3} - 1\right)\right]^{a_3}}, \qquad (1)$$

где a_0 — амплитуда интенсивности (интенсивность дифракционной линии при углах наклона ψ и φ; ψ — угол между нормалями к поверхности образца и к отражающей плоскости (hkl); φ — азимутальный угол), a_1 — центр дифракционной линии, a_2 — ширина дифракционной линии на полувысоте дифракционного максимума, a_3 — ширина дифракционной линии на основании пика.

Для расчета параметров дифракционной линии использовали следующие обозначения: $FWHM = a_2$; $I = a_0$; $2\theta = A - (k\,a_1)$, где 2θ — угол дифракции (угол Вульфа — Брегга); A — верхний предел диапазона углов дифракции 2θ, установленный во время калибровки; k — коэффициент перевода координаты шкалы линейного позиционно-чувствительного детектора на углы 2θ.

Процедура подгонки рентгеновского спектра с помощью рентгеновского анализатора напряжений *XSTRESS* 3000 *G3R* основывается на алгоритме Левенберга — Марквардта (*Levenberg — Marquardt*) [6, 7].

Экспериментальные и расчетные параметры рентгеносъемки

Анализ остаточных напряжений на поверхностях раскатанной детали с фланцем из сплава АК7 выполнялся для фазы Al при помощи рентгеновского анализатора напряжений *XSTRESS* 3000 *G3R* с геометрий рентгеносъемки χ -модифицированного гониометра. Углы наклона гониометра составляют $\chi = \pm 40°$, осцилляция $\Delta\chi = \pm 4°$.

В табл. 1 охарактеризованы режимы рентгеносъемки для неразрушающего анализа параметров напряжений и структурного состояния детали с фланцем из сплава АК7, которая проводилась с использованием рентгеновских трубок с различной длиной волны излучения.

В таблице обозначено: Z — глубина проникновения рентгеновского излучения; q — угол дифракции; m-линейный коэффициент ослабления излучения; (hkl) — отражающая плоскость; l — длина волны рентгеновского излучения.

Для χ-модифицированного дифрактометра [8]

$$Z = \frac{\cos 2\theta \cos\chi}{\mu \sin\theta (\cos 2\theta - 1)}. \qquad (2)$$

Таблица 1

Параметры рентгеносъемки раскатанной детали с фланцем из сплава АК7

Режим рентгеносъемки	Излучение	λ, нм	Фаза	(hkl)	2θ, град	μ, 1/мм	Z, мкм, при $\psi = 0°$	Z, мкм, при $\psi = 40°$
№ 1	Ti – K_α	0,274963	Al	220	147,8	76,8	6,2	4,8
№ 2	Cr – K_α	0,229090		311	139,5	45,8	10,0	7,7

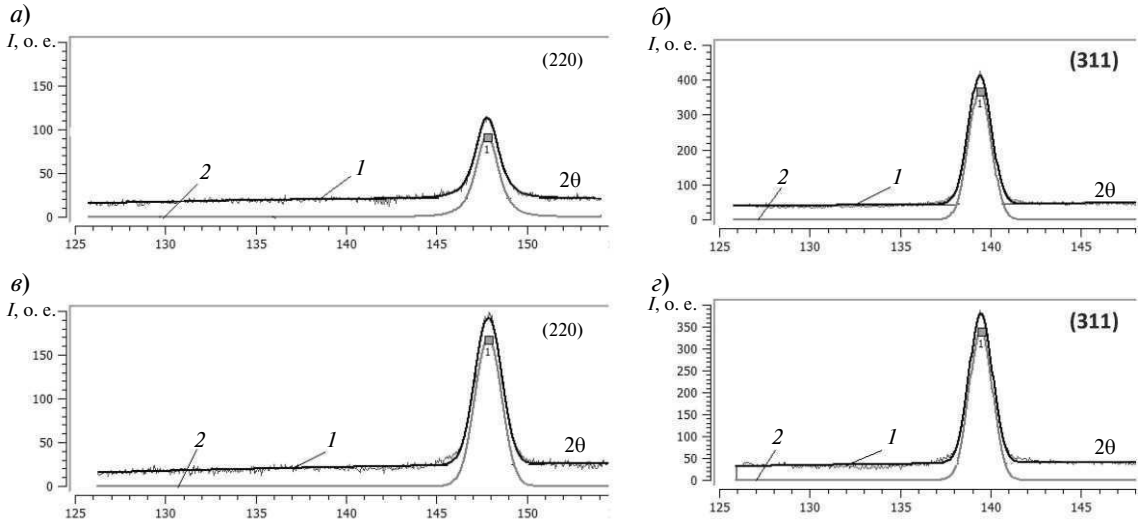


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные рентгенограммы:

а, *в* — режим 1 рентгеносъемки; отражающая плоскость (220); *б*, *г* — режим 2 рентгеносъемки; отражающая плоскость (311). Кривая *1* — экспериментальные значения, кривая *2* — расчетная функция Пирсона VII. Графики *а*, *б* соответствуют углу расположения детектора φ = 0, а *в*, *г* — φ = 180°

На рис. 1 показаны рентгеновские спектры сплава АК7, полученные с использованием режимов 1 и 2 рентгеносъемки. Верхняя кривая соответствует экспериментальным данным, нижняя — расчетной функции Пирсона VII. На графиках рис. 1 буквой *I* обозначена величина спектра в относительных единицах. Коэффициент подгонки экспериментальной кривой и расчетной функции составляет 0,991 для 1-го режима рентгеносъемки и 0,999 — для 2-го режима. Вычитание фона основано на параболической функции. Режим 1 рентгеносъемки характеризуется значительным изменением величины интенсивности дифракционной линии в различных направлениях измерения. На дифрактометре *XSTRESS* 3000 *G3R* детекторы *A* и *B* расположены под углом 180°, что позволяет одновременно исследовать два направления — φ = 0° и φ = 180°.

Максимальному значению угла наклона χ соответствует минимальное значение эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей — $Z_{\min}$. При оценке глубины проникновения рентгеновских лучей значение параметра шероховатости R_a анализируемой поверхности не должно превышать $Z_{\min}$.

Ослабление рентгеновских лучей зависит от длины волны излучения и от характеристик материала. Массовый коэффициент ослабления рентгеновских лучей для многокомпонентного (легированного) сплава АК7 определяли по формуле [9]

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \alpha_i \frac{\mu_i}{\rho_i}, \qquad (3)$$

где i — количество компонентов; α_i — весовая доля i-го компонента; ρ_i — плотность i-го компонента сплава; ρ — плотность сплава.

Измерение параметров напряженного и структурного состояний детали

Расположение точек и направления измерения на поверхностях раскатанной детали с фланцем из сплава АК7, где определялись остаточные напряжения (σ_φ и τ_φ), и структурное состояние поверхностей детали показаны на рис. 2. Направления измерения обозначены как *X* и *Y*. Во всех точках направление измерения *X* — тангенциальное. В точках 1, ..., 4, расположенных на цилиндрических поверхностях, направление *Y* совпадает с осью детали, а в точках 0, А, Б, В, находящихся на торцевых поверхностях, направление *Y* — радиальное.

Остаточные напряжения вычислялись по следующим формулам [6]:

нормальное напряжение в направлении измерения азимутального угла φ

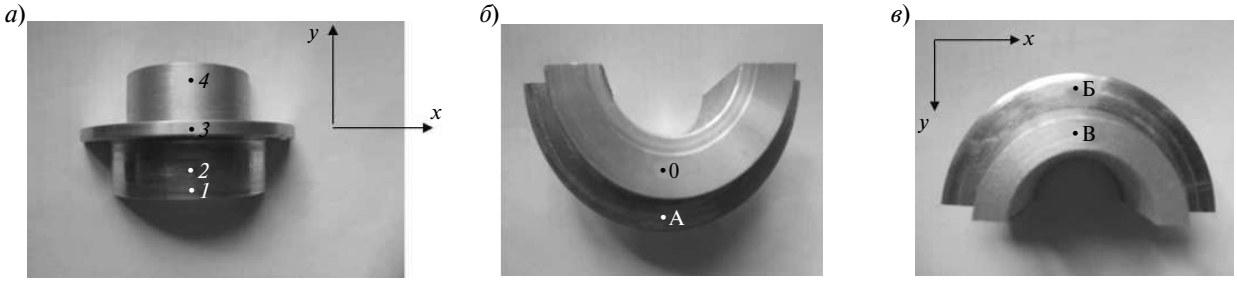


Рис. 2. Расположение точек и направления измерения параметров напряженного и структурного состояний раскатанной детали с фланцем из сплава АК7

$$\sigma_\varphi = \sigma_{11}\cos^2\varphi + \sigma_{12}\sin 2\varphi + \sigma_{22}\sin^2\varphi; \quad (4)$$

касательное напряжение в направлении измерения азимутального угла φ

$$\tau_\varphi = \tau_{13}\cos\varphi + \tau_{23}\sin 2\varphi, \quad (5)$$

где σ_{11}, σ_{22}, σ_{33}, τ_{12}, τ_{13}, τ_{23} — нормальные и касательные компоненты тензора напряжений.

Анализ напряженного состояния раскатанной детали с фланцем проводили по методике исследования трехосных напряжений согласно требованиям стандарта [8].

Согласно требованиям стандарта при рентгеноструктурном оценивании алюминиевых сплавов характеристики структуры металла должны удовлетворять следующим условиям: 1) ширина дифракционной линии должна быть более 1/3 углового диапазона регистрации спектра; 2) текстура — незначительная; 3) величина зерна материала должна быть не менее величины эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей в материал. Выполнение этих требований важно не только для повышения точности оценки напряжений, но и для контроля возможности разрушения материала.

Структурное состояние материала, под которым понимается его текстура, косвенно характеризуют параметры *FWHM* (ширина пика на полувысоте дифракционного максимума) и K_T (коэффициент текстурированности отражающей плоскости) [10]:

$$K_T = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (6)$$

где $I_{\max}$, $I_{\min}$ — максимальная и минимальная интенсивности дифракционной линии (*hkl*) при углах наклона χ.

В случае, когда параметр текстурированности $K_T < 3$, анализ напряжений проводился по методике, использующей линейную функцию аппроксимации межплоскостного расстояния кристаллической решетки — $d = d(\sin^2\chi)$. Если $K_T > 3$, то необходимо учитывать влияние текстуры [11].

Увеличение значения параметра *FWHM* служит признаком повышения микротвердости. Применение параметра *FWHM* для оценки уровня микротвердости позволяет неразрушающим способом провести приближенную оценку изменения величины микротвердости поверхности после ее обработки. Значение параметра *FWHM* зависит от режимов рентгеносъемки, свойств и структуры материала.

Для уменьшения влияния текстуры на точность определения угла дифракции применялись режимы рентгеносъемки с осцилляцией по углам наклона гониометра χ. Использовались по семь положительных и отрицательных углов наклона χ, а также различные плоскости кристаллической решетки. Это позволило уменьшить максимальную величину параметра K_T для режима 1 рентгеносъемки с 3,9 до 3,2, а для режима 2 — с 3,0 до 2,6 (см. табл. 3).

На рис. 3 показаны графики зависимости функции $d = d(\sin^2\chi)$ межплоскостного расстояния кристаллической решетки от угла наклона χ-модифицированного гониометра на поверхностях детали с раскатанным фланцем из сплава АК7 в точках измерения 0 и В при режиме 1 рентгеносъемки с различными параметрами текстурированности K_T. На рис. 4 графики соответствуют режиму 2 рентгеносъемки.

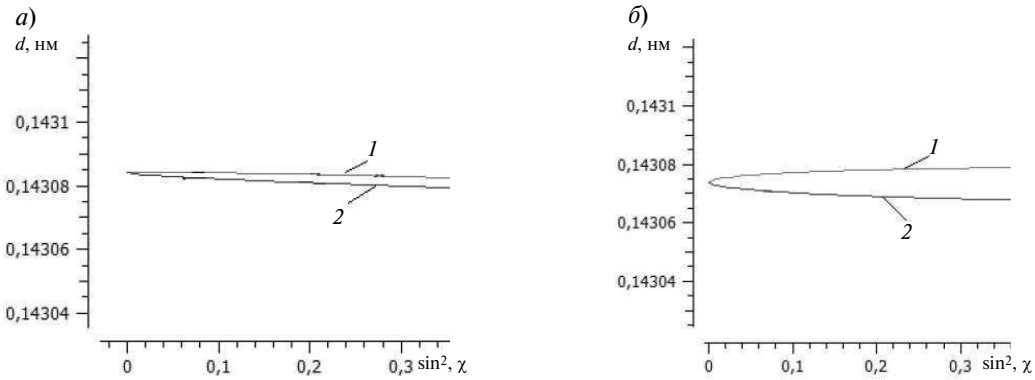


Рис. 3. Зависимости межплоскостного расстояния кристаллической решетки d от $\sin^2\chi$ при режиме 1 рентгеносъемки:

а) точка измерения — В; направление измерения — X (K_T = 2,2); *б*) точка измерения — 0; направление измерения — X (K_T = 3,1). Кривая *1* ответствует положительному углу наклона (χ^+) χ-модифицированного гониометра; кривая *2* — отрицательному углу наклона (χ^-)

Из рис. 3 и 4 следует, что для режима 1 рентгеносъемки с использованием титанового излучения параметр текстурированности больше, чем для режима 2. В процессе рентгеносъемки различным отражающим плоскостям — (220) и (311) — соответствует различная эффективная глубина проникновения рентгеновских лучей — 6,2 и 10,0 мкм. Это связано с тем, что в материале детали отражающая плоскость (311) менее текстурирована, чем отражающая плоскость (220).

В режиме 1 рентгеносъемки на точность определения межплоскостного расстояния в анализируемом слое детали шероховатость поверхности, степень пластической деформации поверхностного слоя после обработки и текстурированность материала влияют в большей степени, чем при использовании режима 2.

Анализ результатов экспериментов

В табл. 2 представлены результаты определения параметров напряженного состояния поверхностей раскатанной детали с фланцем из сплава АК7 неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей.

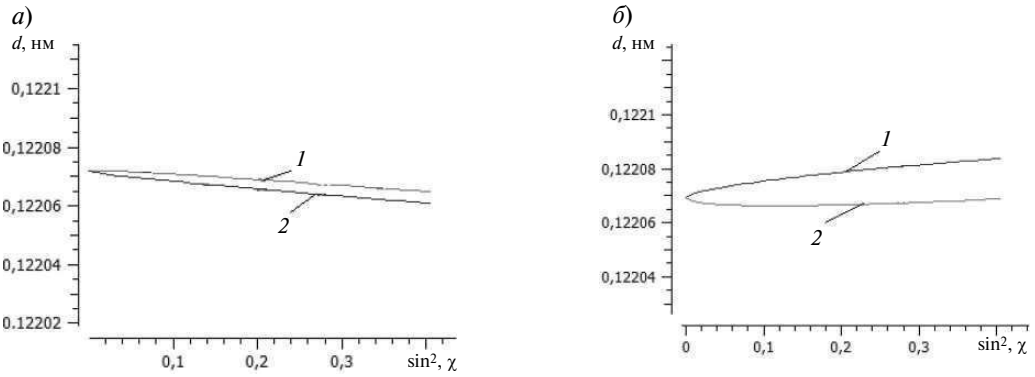


Рис. 4. Зависимости межплоскостного расстояния кристаллической решетки d от $\sin^2\chi$ при режиме 2 рентгеносъемки:

а) точка измерения — В; направление измерения — X (K_T = 1,8); *б* — точка измерения — 0; направление измерения — X (K_T = 2,6). Кривая *1* отвечает положительному углу наклона (χ^+) χ-модифицированного гониометра, кривая *2* — отрицательному углу наклона (χ^-)

Таблица 2

Результаты определения остаточных напряжений на поверхностях раскатанной детали с фланцем

Место измерения	Направление измерения	В режиме 1 рентгеносъемки		В режиме 2 рентгеносъемки	
		σ_φ, МПа	τ_φ, МПа	σ_φ, МПа	τ_φ, МПа
0	*X*	–5	2	10	3
	Y	–40	1	–60	1
1	*X*	–25	2	–40	1
	Y	–70	2	–80	1
2	*X*	–20	1	–25	2
	Y	–40	2	–35	1
3	*X*	–5	2	10	7
	Y	–20	2	–30	5
4	*X*	5	–3	40	–6
	Y	–25	–2	–60	–4
А	*X*	–5	2	–10	3
	Y	–30	0	–44	2
Б	*X*	–5	2	–18	4
	Y	–25	–2	–34	–2
В	*X*	3	1	–10	1
	Y	–20	–3	–20	–1

σ_φ — нормальные напряжения, τ_φ — касательные напряжения

Исследования выполнялись в двух режимах — 1 и 2. При использовании режима 1 глубина анализируемого слоя составляла 6 мкм, а в режиме 2 –10 мкм. Точность определения остаточных напряжений в детали более высокая при использовании режима 2 рентгеносъемки.

Полученное распределение остаточных напряжений в детали показывает наличие анизотропных свойств, характерных для пластической обработки. В случае приложения к детали во время ее эксплуатации значительных внешних нагрузок в тангенциальном направлении это может способствовать более быстрому накоплению повреждаемости материала и образованию трещины вдоль оси детали с распространением их в радиальном направлении. В направлении измерения *X* уровень остаточных напряжений сжатия меньше, чем в направлении измерения *Y*.

Наиболее неблагоприятное распределение остаточных напряжений (σ_φ = 5 МПа и σ_φ = = 40 МПа) в области точки 4, расположенной на поверхности ступицы не подвергавшейся пластической обработке детали, поскольку напряжения растяжения, действующие в тангенциальном направлении, способствуют уменьшению ресурса работы детали в процессе ее эксплуатации. Самое благоприятное напряженное состояние поверхностного слоя при эксплуатации детали — в точках измерения 1 и 2, расположенных в раскатанной ступице детали.

Исследование остаточных напряжений с использованием двух режимов рентгеносъемки показало что обработка поверхности раскаткой улучшает напряженно-деформированное состояние поверхности детали. Это связано с формированием в процессе обработки детали остаточных напряжений сжатия.

Значения параметров структурного состояния материала детали с фланцем, формообразованным раскаткой, представлены в табл. 3. Из

Таблица 3

Значения параметров *FWHM* и K_T структурного состояния материала детали с раскатанным фланцем при двух режимах рентгеносъемки

Точка измерения	Направление измерения	В режиме 1 рентгеносъемки		В режиме 2 рентгеносъемки	
		FWHM	K_T	*FWHM*	K_T
0	*X*	1,91	3,2	1,83	2,6
	Y	1,89	2,4	1,82	2,0
1	*X*	1,76	1,6	1,74	1,3
	Y	1,78	1,7	1,74	1,4
2	*X*	1,77	1,8	1,72	1,3
	Y	1,77	2,0	1,74	1,3
3	*X*	1,82	3,1	1,75	2,4
	Y	1,78	1,7	1,82	1,2
4	*X*	1,83	2,8	1,86	2,1
	Y	1,77	2,6	1,82	1,9
А	*X*	1,82	2,1	1,82	1,6
	Y	1,78	1,6	1,71	1,5
Б	*X*	1,83	2,3	1,75	1,3
	Y	1,77	1,6	1,75	1,1
В	*X*	1,81	2,2	1,78	1,8
	Y	1,86	1,3	1,78	1,5

нее следует, что величина параметра *FWHM* на участке в области исследуемой точки детали изменяется незначительно в направлениях измерения *X* и *Y*. Однако на разных участках поверхности детали величины параметров *FWHM* различаются. Наибольшие значения параметра *FWHM* наблюдаются в точках измерения 0 и В, расположенных на торцевых поверхностях детали.

Наибольшая величина параметра текстурированности K_T поверхности детали наблюдается на торце раскатанной ступицы (в точке 0). Параметры текстурированности K_T всех поверхностей детали в тангенциальном направлении измерения остаточных напряжений выше, чем в радиальном направлении. Преимущественная кристаллографическая ориентация формируется вследствие объемного формообразования раскаткой фланца и ступицы детали.

Полученные в исследовании распределения и величины остаточных напряжений в характерных точках поверхностей раскатанной детали с фланцем, значительно удаленным от торца, позволили оценить неразрушающим способом влияние пластической обработки на формирование напряженного состояния и структуры поверхностных слоев детали.

Определение неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей параметров напряженного и структурного состояний поверхностных слоев раскатанных деталей с фланцами, значительно удаленными от торца, из сплава АК7 показало, что объемное формообразование способом раскатки создает в поверхностных слоях детали толщиной 6 мкм остаточные напряжения сжатия и это обеспечивает повышение ресурса работы детали.

Структурное состояние деформированного материала, оцениваемое по показателям текстурированности, является удовлетворительной характеристикой для прогнозирования долговечности детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Патент RU 2179904 C2.** Устройство поперечно-клиновой прокатки изделий переменного сечения [Текст] / В.Г. Артабьевский, В.Н. Митяшин, С.С. Портной // Опубл. в Б.И.— 2002. № 12.

2. **Adams, B.** New forming method of complex hollow shafts made from tubes simulation supported process design and processing results [Текст] / B. Adams // В сб.: Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов.— СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2007.— С. 324–329.

3. Ковка и штамповка: справочник в 4-х томах. Т. 3: Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков [Текст] / [Е. Г. Белков [и др.]; под ред. А.М. Дмитриева // М.: Машиностроение, 2010.— 348 с.

4. **Кононов, П.В.** Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок [Текст] / П.В. Кононов, В.Н. Востров // В сб.: Материалы 2-й Международной научно практической конференции.— СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2012.— С. 391–397.

5. **Fitzpatrick, M.E.** Determination of residual stresses by X-Ray diffraction [Текст] / M.E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway // Measurement Good Practice Guide.— 2005. № 52.— P. 1–68.

6. **Яблокова, Н.А.** Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток ГТД методом рентгеноструктурного анализа и механическим методом [Текст] / Н.А. Яблокова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование— 2011. №1(117).— С. 117– 122.

7. **Noyan, I.C.** Residual stress.Measurement by diffraction and interpretation, Materials research and engineering [Текст] / I.C. Noyan, J.B. Cohen // Springer–Verlag.— 2003.— P. 122– 126.

8. **Suominen, L.** Selected methods of evaluating residual stress gradients measured by X-ray diffraction traditional, full tensor, and wavelet [Текст] / L. Suominen, D. Carr // Copyright(c)JCPDS-International Centre for Diffraction. Advances in X-ray Analysis. – 2000. Vol.43.— P. 78– 82.

9. XPA 09–285. Методы испытаний для анализа остаточных напряжений дифракцией рентгеновских лучей [Текст] // AFNOR (французская ассоциация по стандартизации).— 1999.— 108 p.

10. SAE J784. Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction [Текст].— Second edition.— Chapter 7.3.— 2003.— 61 p.

11. **Тейлор, А.** Рентгеновская металлография [Текст] / А.Тейлор // М: Металлургия, 1965.— 664 с.

УДК 621.9.048.7

Е.В. Земляков, Я. Туоминен,
Е.Ю. Поздеева, Г.А. Туричин, Е.А. Комарова

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Для реализации технологий лазерной наплавки используются твердотельные, газовые и диодные лазеры мощностью от 3 до 6 кВт. Лазерная наплавка, как правило, применяется для обработки небольших деталей либо локальных участков крупногабаритных изделий в горнодобывающей, аэрокосмической, энергомашиностроительной и других отраслях промышленности. Постоянное развитие лазерной техники и технологии привело к появлению мощных лазеров, имеющих высокие КПД и коэффициент поглощения лазерного излучения металлическими материалами и при этом низкие эксплуатационные расходы. Использование волоконных, дисковых и диодных лазеров мощностью более 10 кВт позволяет значительно повысить производительность процесса лазерной наплавки, что является ключевым моментом для использования лазерной технологии при обработке крупногабаритных изделий. Использование существующих технологий лазерной наплавки для получения покрытий большой площади ограничено их низкой эффективностью. Конечные свойства покрытий и промышленная применимость лазерных технологий определяется не только уровнем мощности лазерного излучения, но и характеристиками дополнительного оборудования: сопел, устройств подачи материала, систем фокусировки и формирования лазерного луча. В статье представлены результаты экспериментальных исследований формирования поверхностных слоев при лазерной наплавке порошков, проволоки и лент с использованием лазерного излучения мощностью до 15 кВт.

Твердотельные, газовые и диодные лазеры мощностью 3–6 кВт, используемые в промышленности для восстановительной наплавки небольших областей, обеспечивают производительность процесса в диапазоне 1–2 кг/ч. Основным стимулом к переходу от традиционных технологий получения покрытий (термическое напыление, дуговая наплавка) к лазерным служит более высокое качество получаемых покрытий, обусловленное низким коэффициентом перемешивания наплавляемого материала с материалом подложки при более высоких адгезионных характеристиках. Однако для нанесения покрытий большой площади в основном используются традиционные методы наплавки и напыления, обеспечивающие производительность процесса от 5 до 20 кг/ч и, соответственно, более высокую экономическую эффективность.

Получение функциональных покрытий большой площади актуально для широкого спектра отраслей тяжелой промышленности судостроения, энергетики, нефтегазовой и горнодобывающей отраслей, металлообрабатывающей, бумажной и других [1–4]. На сегодняшний день существуют примеры промышленного использования CO_2-лазера мощностью до 20 кВт при изготовлении и ремонте трубных панелей бойлеров электрогенераторов и массивных поршневых штоков для горнодобывающей и оффшорной индустрии* [5].

CO_2-лазеры долгое время были единственными лазерами, способными обеспечить такой высокий уровень мощности. Однако для CO_2-лазеров характерны низкие КПД и эффективность обработки, высокие эксплуатационные расходы, а также необходимость использования для транспортировки луча зеркального лучепро-

* Оффшорная индустрия охватывает нефтяные и газовые работы на шельфе (разведка месторождений, бурение скважин, установка стационарных или плавучих платформ, создание подводной инфраструктуры, прокладка трубопроводов, обслуживание нефтяных и газовых платформ), а также установку и обслуживание ветровых генераторов, дноуглубительные операции, проведение глубоководных работ, прокладку или ремонт кабелей и многое другое.

вода, что значительно снижает гибкость технологического процесса. В последнее время на рынке появились промышленные образцы мощных твердотельных (дисковых) и волоконных лазеров мощностью соответственно до 16 и 30 кВт, [6]. Кроме того, мощность диодных лазеров была увеличена до 15 кВт [7]. Эти типы лазеров обладают существенными преимуществами перед CO_2-лазерами: более высоким КПД; более высоким коэффициентом поглощения лазерного излучения металлами; возможностью транспортировки излучения по оптическому волокну; низкими эксплуатационными расходами. Очевидно, что использование новых типов лазеров позволит повысить производительность процесса наплавки [8, 9] и сделать лазерные технологии более эффективными.

Экспериментальные исследования

Основные эксперименты по лазерной наплавке проводились в Институте лазерных и сварочных технологий СПбГПУ на лабораторном стенде для лазерно-дуговой обработки, где используется волоконный лазер ЛС-15 мощностью 15 кВт. Лазерное излучение транспортировалось по волоконному кабелю к фокусирующей головке Precitec YW50 с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,6 мм. Встроенный в технологическую головку одномерный сканатор ILV DC обеспечивал развертку лазерного луча на поверхности мишени. Сканатор может работать в двух режимах, определяющих временную зависимость скорости колебания зеркала: синусоидальном и треугольном. В синусоидальном режиме работы предусмотрена возможность управления мощностью лазерного излучения. При этом траектория движения лазерного луча разбивается на 32 точки, в каждой из которой с помощью системы управления сканатором можно задать необходимый уровень мощности в диапазоне 0–100 % от максимального.

В ходе экспериментов наплавляемый материал подавался в зону лазерного воздействия в виде порошка, а также в виде присадочной проволоки. При лазерной порошковой наплавке со сканированием использовались как коаксиальное сопло, так и некоаксиальное. Наплавка осуществлялась на небольшие пластины (20×60×100 мм^3) и стержни диаметром 100 мм и длиной 500 мм из низкоуглеродистых сталей (S235, S355). В качестве наплавляемых порошков использовались порошки на основе никеля (Inconel 625), кобальта (Stellite 6) и железа (3.33LC).

Лазерная наплавка с использованием присадочной проволоки проводилась на пластины из низколегированной конструкционной стали 09Г2С. Подача присадочной проволоки в зону лазерного воздействия осуществлялась с помощью стандартной дуговой горелки и сварочного полуавтомата ПДГО-601. В качестве наплавляемого материала при реализации данной схемы лазерной наплавки использовалась присадочная проволока из нержавеющей стали AISI 316L (∅ = 1,0 мм), а также жаропрочного сплава Инконель 625 (∅ = 1,6 мм).

Экспериментальная установка для лазерной порошковой наплавки со сканированием с использованием некоаксиального щелевого сопла показана на рис. 1, *а*. Сопло оснащено циклоном, предназначенным для разделения частиц порошка и транспортного газа и формирования гравитационного потока порошка к поверхности мишени. Щелевое сопло формирует поток порошка шириной около 20 мм (см. рис. 2, *б*). Однородность потока порошка к соплу обеспечивает дисковый питатель Medicoat AG. Образцы перемещались относительно технологической головки с помощью двухкоординатного стола. Для наплавки на цилиндрические образцы дополнительно использовался вращатель. В качестве коаксиального сопла для лазерной наплавки со сканированием использовалось сопло COAX 11 (см. рис. 1, *б*), разработанное и изготовленное в Институте материалов и лучевой техники (Fraunhofer IWS, Дрезден, Германия) для наплавки с помощью диодных лазеров мощностью 8–10 кВт.

Структура потока порошка анализировалась с использованием теневого (шлирен) метода.

Наплавляемый материал может подаваться в зону лазерного воздействия также в виде лент, в том числе порошковых. При использовании лазерного излучения высокой мощности со сканированием или другими способами формирования лазерного пятна заданной геометрии этот метод весьма перспективен [10].

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, *а* представлен поперечный макрошлиф одиночного валика, полученный способом порошковой наплавки сплава Inconel

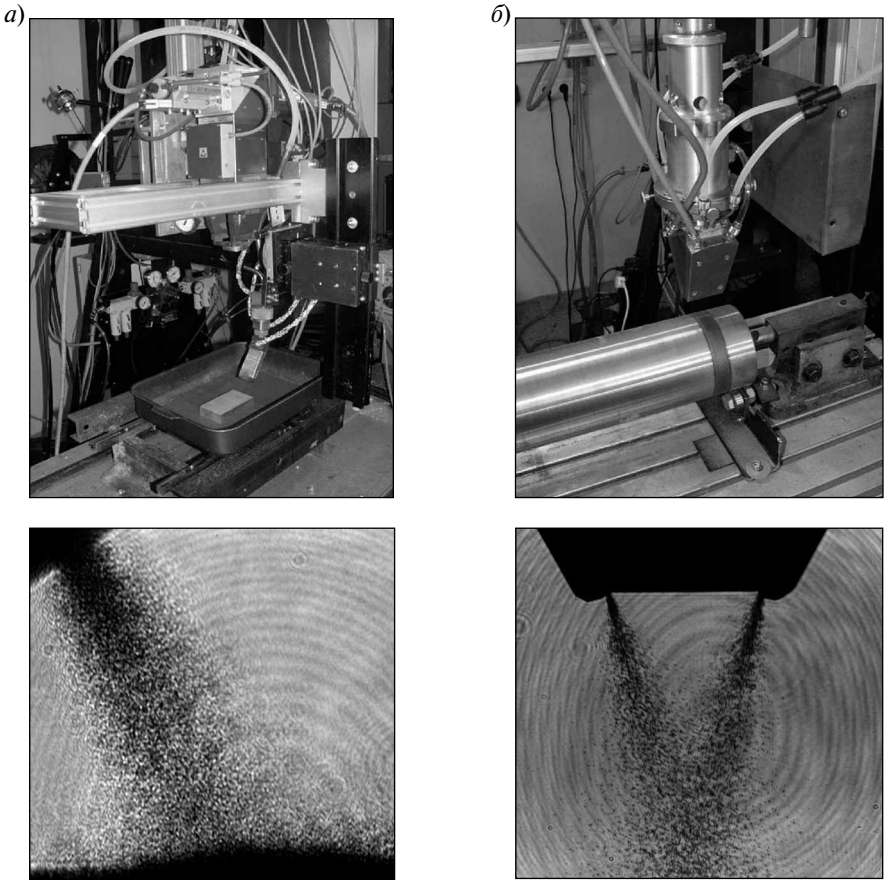


Рис. 1. Экспериментальная установка для лазерной порошковой наплавки со сканированием:

а — с некоаксиальным щелевым соплом; *б* — с коаксиальным соплом COAX 11

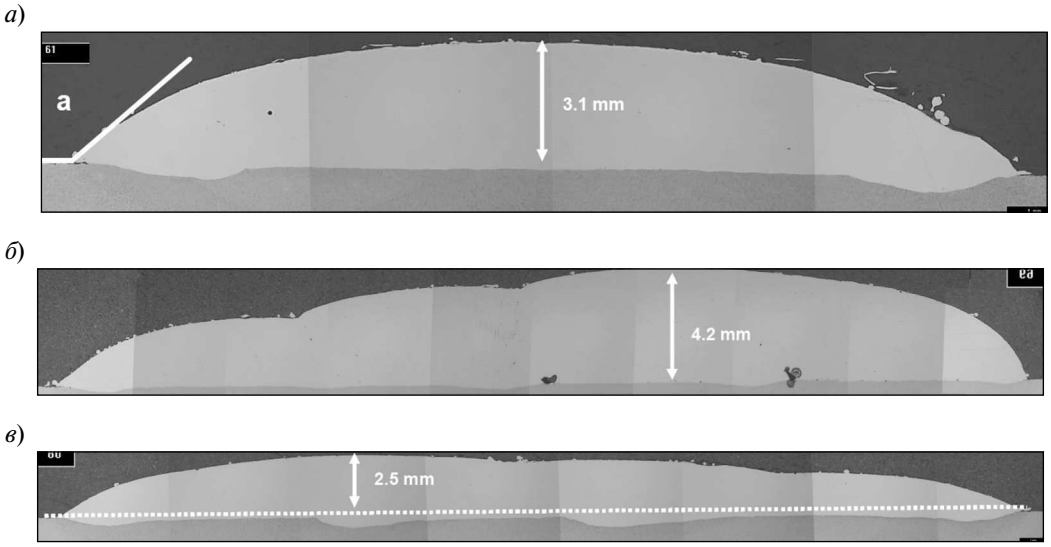


Рис. 2. Макрошлиф наплавленного слоя (Inconel 625):

а — одиночный валик; *б* — сплошное покрытие (три одиночных валика с перекрытием 9 мм); *в* — сплошное покрытие (три одиночных валика с перекрытием 10 мм), скорость перемещения — 1000 мм/мин

625 на плоский образец с использованием некоаксиального щелевого сопла при следующих технологических параметрах: мощность лазерного излучения — 15 кВт; скорость перемещения образца — 750 мм/мин; расход порошка — 295 г/мин. Лазерный луч был расфокусирован до диаметра 5 мм и сканировался с частотой 100 Гц и амплитудой 20 мм. Сканирование осуществлялось в «треугольном» режиме работы сканатора. Эти технологические параметры обеспечили производительность процесса около 14 кг/ч при эффективности использования порошка 77 %. Перемешивание наплавляемого материала с материалом подложки металла основы составило 3 % и было вызвано в основном перегревом металла в поворотных точках сканирования.

На рис. 2, *б* показан пример формирования сплошных покрытий при последовательной наплавке одиночных валиков с перекрытием. Сплошные покрытия также наплавлялись при скорости перемещения образца 750 мм/мин. Расход порошка был увеличен до 315 г/мин. Коэффициент перемешивания при этом составил 4 %, производительность наплавки — 15,6 кг/ч, эффективность использования порошка — 79 %.

На макрошлифе сплошного покрытия в зоне перекрытия валиков были обнаружены неметаллические включения (окислы) (см. рис. 2, *б*). При увеличении скорости перемещения образца до 1000 мм/мин, а величины перекрытия до 10 мм уменьшилась толщина покрытия и исчезли неметаллические включения (см. рис. 2, *в*).

Содержание железа в этих слоях было 1,8 (рис. 2, *б*) и 4 масс. % (рис. 2, *в*). Рентгеноспектральный анализ покрытия с большей толщиной показал равномерность распределения железа по всему поперечному сечению образца.

Основной целью проведения экспериментов по лазерной наплавке на цилиндрические образцы было получение информации о нагреве сопла и оптических элементов фокусирующей головки отраженным лазерным излучением при продолжительных технологических операциях. Продолжительность одного эксперимента в среднем составляла 6 минут при мощности лазерного излучения от 10 до 15 кВт. Во время экспериментов перегрев сопла и оптики не наблюдался, несмотря на высокий уровень отраженного от ванны расплава лазерного излучения, характерный для лазерной наплавки. Для снижения негативного влияния отраженного лазерного излучения на технологический инструментарий во время экспериментов сопло было смещено на 10 мм относительно оси цилиндрического образца (см. рис. 3, *а*). В качестве наплавляемого материала в этом эксперименте использовался порошок на остове кобальта (Stellite 6). Наплавка проводилась с использованием некоаксиального сопла при следующих режимных параметрах: мощность лазерного излучения — 12,5 кВт, линейная скорость вращения образца — 750 мм/мин; расход порошка — 170 г/мин; величина перекрытия — около 8 мм. Микротвердость полученного покрытия составила $500HV_5$. Поперечное сечение центральной части покрытия показано на рис. 3, *а*.

На рис. 3, *б* показано покрытие, полученное при лазерной наплавке порошка на основе железа (3.33LC) с использованием коаксиального сопла. Наплавка проводилась при следующих режимных параметрах: максимальная мощность лазерного излучения — 15 кВт (средняя мощность — 10,7 кВт); линейная скорость вращения образца — 500 мм/мин; расход порошка — 186 г/мин; величина перекрытия — около 5 мм. Сканатор работал при этом в синусоидальном режиме. Для снижения перегрева металла в поворотных точках при сканировании использовалась функция контроля мощности, что позволило избежать чрезмерного подплавления основного материала в точках остановки лазерного луча (см. рис. 3, *б*). Однако при использовании функции управления мощностью заметно снизилась производительность процесса наплавки по сравнению с результатами, полученными без регулировки мощности. Но при этом, благодаря используемой программе управления мощностью лазерного излучения, задающей в крайних точках линии сканирования нулевую мощность, а в нескольких точках вдоль линии сканирования — значения менее 100 % от максимальной мощности, энергетическая эффективность процесса значительно выше, чем в опытах без регулировки мощности.

Металлографический анализ одиночных валиков и сплошных покрытий, полученных при лазерной наплавке присадочной проволоки, показал, что все покрытия характеризуются высо-

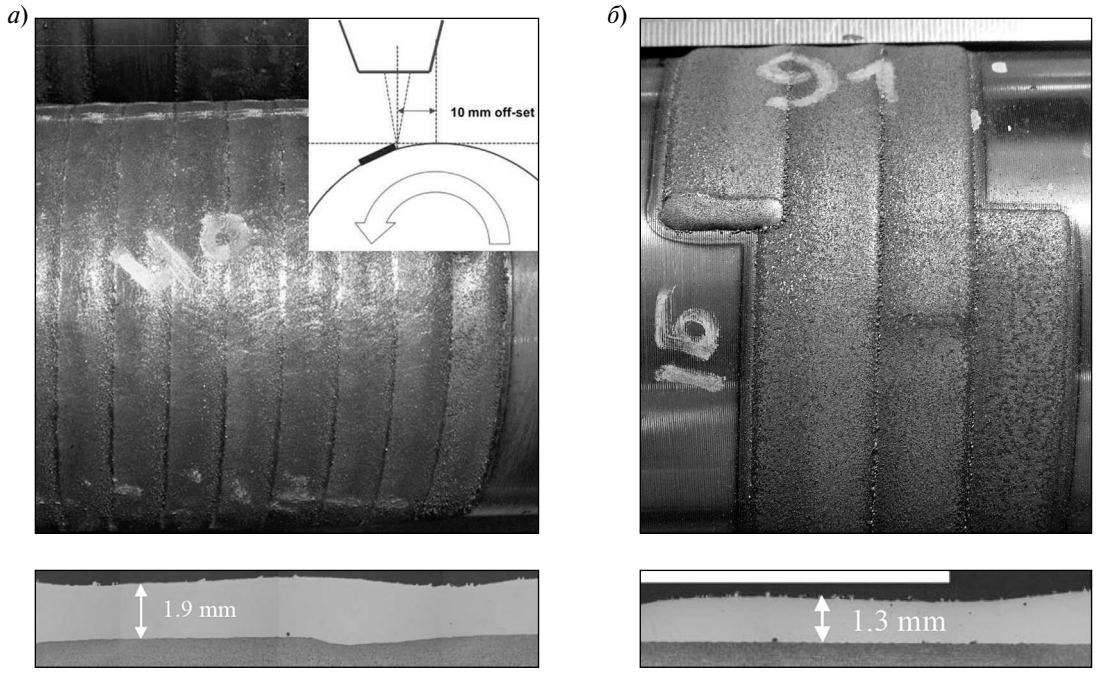


Рис. 3. Сплошные покрытия, полученные при лазерной наплавке порошков на основе кобальта (*а*) и железа (*б*) с использованием некоаксиального (*а*) и коаксиального сопла (*б*)

ким коэффициентом перемешивания наплавляемого и основного металла. Пример покрытия, полученного при наплавке стали сплава Инконель 625, с наименьшим коэффициентом перемешивания 19 % показан на рис. 4, *а*. Данный образец был получен при следующих режимных параметрах: скорость перемещения образца — 1000 мм/мин, скорость подачи проволоки — 5,5 м/мин, мощность лазерного излучения — 15 кВт, диаметр лазерного пятна — 10 мм.

Высокое переплавление и трудность его контролируемого изменения главным образом связано с неоднородностью распределения плотности мощности в сильно расфокусированном с помощью стандартной сварочной оптики лазерном луче. Производительность лазерной наплавки присадочной проволоки с помощью волоконного лазера мощностью 15 кВт составляла 130–170 г/мин.

На рис. 4, *б* показан пример лазерной наплавки ленты из нержавеющей стали 316L на низкоуглеродистую сталь. Из-за довольно большой ширины сканирования (~30 мм) и ограниченной мощности лазерного излучения (~4,4 кВт) на-

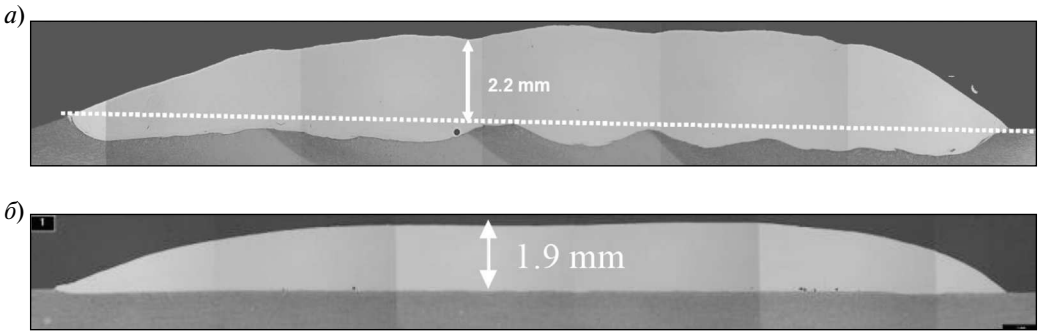


Рис. 4. Результаты лазерной наплавки компактных материалов:

а — сплошное покрытие при наплавке присадочной проволоки (Inconel 625); *б* — одиночный валик, полученный при наплавке металлической ленты (сталь 316L)

плавка осуществлялась на низких скоростях (60–70 мм/мин). Сканирование осуществлялось в «треугольном» режиме с частотой 20–30 Гц.

Незначительное перемешивание наплавляемого и основного материалов, наблюдаемое при наплавке металлической ленты, а также большой контактный угол с обеих сторон валика позволяют прогнозировать получение бездефектных покрытий при последовательной наплавке валиков с некоторым перекрытием.

Современные мощные твердотельные и волоконные лазеры, характеризующиеся высоким КПД и низкими эксплуатационными расходами, открывают новые возможности для лазерной обработки материалов и внедрения лазерных технологий в промышленность. Результаты проведенных экспериментов показали, что с использованием волоконного лазера мощностью 15 кВт и одномерного сканирования могут быть реализованы высокопроизводительные процессы получения различных функциональных покрытий. Наиболее эффективны процессы лазерной порошковой наплавки. Применение лазеров высокой мощности (15 кВт и более) позволяет значительно увеличить производительность технологического процесса при сохранении качества наплавляемых покрытий, характерного для уже существующих и используемых в промышленности технологий лазерной наплавки.

Весьма перспективное направление развития технологии лазерной наплавки с помощью мощных лазеров — использование наплавляемого материала в виде сплошных и порошковых металлических лент.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12–08–31165.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oh, Y.** Low-dilution electroslag cladding for shipbuilding [Текст] / Y.K. Oh, J.H. Devletian, J. Chen // Welding Journal.— 1990.— August.— P. 37–43.

2. **Takano, G.** Welding of stainless steel in nuclear energy industry [Текст] / G. Takano, O. Matsumoto, Y. Uratani.— Welding in the World.— 1995. Vol. 36.— P. 193–200.

3. **Paschold, R.** Electroslag strip cladding for corrosion resistance [Текст] / R. Paschold.— Svetsaren, 2001. № 2–3.— P. 62–67.

4. **Consonni, M.** Electroslag strip cladding of steam generators with alloy 690 [Текст] / M. Consonni, F. Maggioni, F. Brioschi // Proc. of the ICONE14.— Miami, USA.— P. 539–545.

5. **Brennan, M.S.** Laser cladding of nickel and iron base alloys on boiler waterwall panels and tubes [Текст] / M.S. Brennan, R.C. Gassmann // Proc. of the CORROSION 2000, NACE International.— Orlando, USA.— P. 13–19.

6. **Grupp, M.** Welding of high thicknesses using a fibre optic laser up to 30 kW [Текст] / M. Grupp, K. Klinker, S. Cattaneo // Welding International.— 2011.— DOI: 10.1080/09507116.2011.600043.

7. LDF Series Diode laser for industrial needs [Текст] / Materials of Laserline Inc.— 2011.— P. 4

8. **Martukanitz, R.** Deposition Technology: Current Trends and Future Direction [Текст] / R. Martukanitz, S. Kelly, E. Reutzel, [et all.] // Proc. of LAM2010.— Laser Institute of America, Houston, USA.

9. **Туричин, Г.А.** Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров [Текст] / Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, Е.Ю. Поздеева, Я. Туоминен, П. Вуористо // МиТОМ.— 2012. № 3.— С. 35–40.

10. **Tuominen, J.** Recent developments in high power laser cladding techniques [Текст] / J. Tuominen, J. Näkki, H. Pajukoski, T. Peltola, P. Vuoristo // Proc. of 31st ICALEO.— 2012.— P.192–196

УДК 621.791.754.3

В.В. Сомонов

ВЛИЯНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Алюминиевые сплавы, благодаря своим хорошим прочностным характеристикам в сочетании с низким удельным весом, активно используются в различных отраслях машиностроения из-за возможности снижения удельного веса конструкции. Им также присуща высокая коррозионная стойкость. Применение ее сварных конструкций из алюминия существенно ограничено из-за их склонности к образованию трещин при сварке. Все чаще для сварки алюминиевых изделий используются современные лазеры, например волоконные или дисковые. Они позволяют получать относительно большое проплавление при небольшой погонной энергии [1]. Это, в свою очередь, уменьшает коробление и сводит к минимуму последующую обработку, сокращая этапы производства. При лазерной сварке алюминиевых сплавов также существуют проблемы, связанные с их предрасположенностью к трещинообразованию, поскольку быстрое охлаждение расплава во время сварочного процесса делает этот метод сварки особенно способствующим трещинообразованию.

Целью наших исследований было изучение влияния индукционного нагрева на предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов за счет уменьшения скорости охлаждения сварного шва и околошовной зоны.

Исследование проблемы образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов

Трещины в алюминиевых материалах формируются преимущественно во время затвердевания шва, возникая при усадке и кристаллизации эвтектических фаз в середине сварного шва [2]. В. Пеллини, а потом и Т. Кляйн с Г. Дэвисом в своих исследованиях утверждают, что склонность к образованию горячих трещин в сплавах этих групп связана с «критическим интервалом». Это расстояние между дендритами, растущими в противоположных друг другу направлениях, при кристаллизации шва [3]. У. Фойрер предположил, что трещины появляются в «мягкой» (квазиравновесной двухфазной) зоне, если скорость охлаждения междендритной жидкости меньше или равна скорости усадки [4]. Т.С. Пивонка и М.К. Флеминг в своем подходе к трещинообразованию основываются на уравнении Р. Пойссеуля, которое описывает градиент давления, вызывающий течение жидкости по «междендритному пути» [5]. Все эти теории связаны с методом кристаллизации сплавов, и склонность к горячим трещинам может быть определена путем получения кривых охлаждения при тепловой калориметрии. Для некоторых бинарных сплавов проверяются типичные С-образные кривые, когда склонность к трещинообразованию является функцией от содержания растворенных элементов [6]. Первое количественное описание образования трещин было предложено А.М. Прохоровым в середине XX-го века [7]. Прохоров считал механическую деформацию растяжения причиной образования трещин. Им не учитывались металлургические условия в «мягкой зоне», т. е. образование микроструктур при кристаллизации в двухфазной области не принималось во внимание. Прохоров не давал точного количественного критерия для прогнозирования склонности к трещинообразованию. Большинство работ по моделированию затвердевания трещин в сварных швах основаны на подходе Прохорова, т. е. без учета накопления деформаций и дефектов микроструктуры. Его критерии рассматривают лишь некоторые механические условия, например критические значения напряжения или скорости деформации. Совместный критерий М. Раппаца [6] и других авторов учитывает охлаждение междендритной жидкости и деформацию растяжения твердого тела перпендикулярно к направлению роста ден-

дритов. По их мнению, горячие трещины зарождаются при достижении кавитацией давления критического значения, которое может быть рассчитано по физико-химическим свойствам сплава и микроструктурным размерам материала. Склонность к образованию горячих трещин во время сварки традиционно оценивается для случая, когда напряжение или деформация изменяются во время процесса. Так, например, Н. Кониглио в своих исследованиях основывается на концепции улучшения свариваемости за счет увеличения содержания, полагая что в алюминиевых сплавах Si восприимчивость к образованию трещин определяется критической скоростью деформации, возникающей во время сварки [8].

В последнее время сформировались два подхода к моделированию появления трещин. Они основаны на учете аспекта локализации образования трещин. Первый из них предлагает М. Шибахара [9]. Он предложил взять за основу физический механизм образования трещин, принятый в механике разрушения твердых тел. В качестве критерия образования трещин выбран уровень напряжения в системе «жидкость — твердое тело». Для моделирования трещин он использовал специальную вычислительную технику и так называемый метод конечных элементов. Предположения о существовании металлургических условий в двухфазной области не учитываются. Значения напряжения в системе сравниваются с критическим значением, полученным заранее путем корреляции с поверхностной энергией расплава. Поверхностная энергия считается известной величиной и имеет уникальное значение для данной температуры, при этом рассматривается аспект локального образования трещин.

Второй подход к моделированию разработан Р.М. Хильбенгером [10]. В нем за основу взята теория В. Пеллини. Моделирование горячих трещин, как и в предыдущем подходе, реализуется с помощью метода конечных элементов. Локализация растягивающих напряжений в пленке жидкости в остальном расплаве учитывается путем введения «жидкого» элемента в середине сварного шва. Эти элементы имеют очень низкую текучесть в температурном диапазоне ликвидус — солидус. За критерий трещинообразования взята максимально допустимая деформация «жидкого» элемента в двухфазной области. Параметры критической деформации устанавливаются экспериментально. Подход Хильбденгера подобно методу Шибахара позволяет получить визуальное представление о зарождении и распространении трещин.

Обобщая теоретические представления, можно предположить, что горячие трещины образуются при критическом сочетании значений следующих факторов:

температурного интервала хрупкости (ТИХ) в период кристаллизации металла шва;

минимальной пластичности δ_{min} в ТИХ;

темпа α высокотемпературной сварочной деформации [11].

В литературе указывается несколько способов предотвращения образования горячих трещин при лазерной сварке, такие, например, как введение присадочного материала, предварительный подогрев образцов в печи, использование защитного флюса во время сварки для предотвращения активного взаимодействия сварочной ванны с внешней средой, использование параллельного подогрева лазером меньшей мощности для компенсации растягивающих напряжений, возникающих в сварном шве. Сообщается и о том, что можно влиять на процесс лазерной сварки с помощью магнитного поля. Например, может быть увеличена глубина проплавления, изменено сечение, могут быть подавлены периодические дефекты шва под названием хампинг [12]. Лазерная сварка с применением индукционного нагрева значительно снижает градиенты температуры на границе шва и свариваемого металла, что благоприятно сказывается на технологической прочности сварного соединения [13].

Моделирование технологического процесса индукционного нагрева пластин из алюминиевых сплавов

Использование компьютерного моделирования процесса зачастую позволяет резко снизить затраты на разработку бездефектной технологии за счет уменьшения объема экспериментальных исследований. В ходе исследований был смоделирован технологический процесс в компьютерном программном пакете SYSWeld 2012, реализующем конечно-элементную схему расчета. Он применяется при статическом и динамическом анализе конструкций с учетом физической и гео-

метрической нелинейностей, а также при анализе усталостных характеристик, позволяет моделировать электромагнитные поля, гидрогазодинамические, акустические и другие процессы. Основной задачей проводимых исследований было изучение влияния индукционного нагрева на уменьшение или предотвращение образования горячих трещин при лазерной сварке алюминиевых сплавов. При помощи численной модели, созданной в SYSWeld, были исследованы поля температур и термических напряжений, возникающие в результате индукционного нагрева образцов. При построении модели учитывалось, что при индукционном нагреве металлических заготовок в переменном электромагнитном поле КПД установки, как правило, не превышает 60 % [14]. Во время исследований моделировался процесс одностороннего индукционного нагрева пластины из алюминиевого сплава при ее перемещении. Подготовка файла для расчета включала в себя создание трехмерной геометрической модели образца с заданными характеристиками источника индукционного нагрева, задание условий охлаждения, фиксации образцов и параметров процесса нагрева. На выходе получали два файла с результатами изменения во времени полей температуры и напряжений. Пример результата расчета полей температуры и напряжений, возникающих в образце при индукционного нагреве, представлен на рис 1.

а)

б)

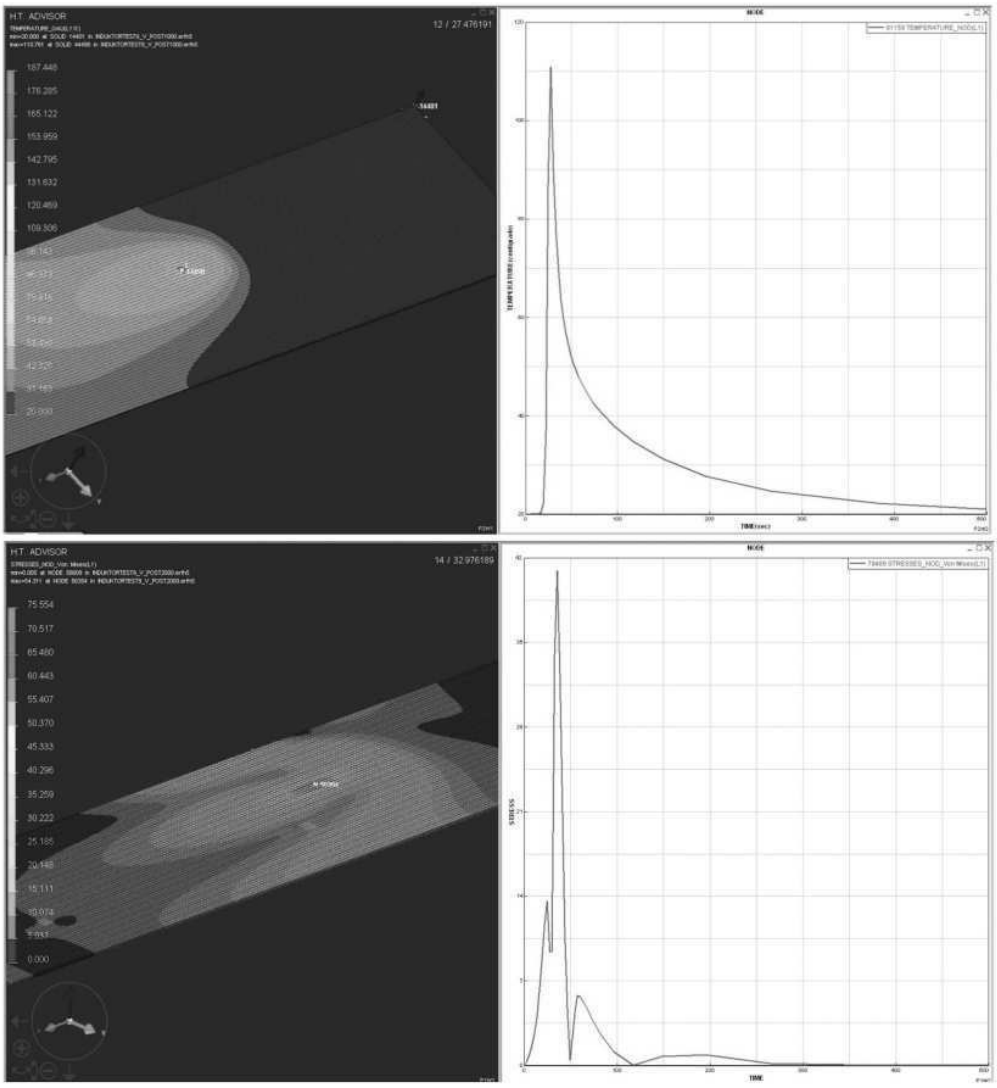


Рис. 1. Пример результата расчета полей: температуры (*а*) и напряжений (*б*)

В качестве нижней границы значений температурных напряжений был взят предел упругости. При достижении данного предела в металле начинают возникать пластические деформации. Для алюминиевых сплавов он составляет более 30 МПа. Конечной задачей было получить параметры индукционного нагрева, при которых в околошовной зоне возникают термические напряжения, компенсирующие растягивающие напряжения в сварном шве. Затем результаты моделирования проверялись экспериментально. Оптимальный диапазон растягивающих напряжений, полученный в результате моделирования, составляет 40–60 МПа.

Был смоделирован процесс лазерной стыковой сварки с целью определения его параметров, а также оптимальных параметров режима сквозного проплавления пластин. При расчете были приняты необходимая мощность лазерного излучения 2 кВт, диаметр луча 0,4 мм, фокусное расстояние 200 мм, длина волны излучения примерно 1 мкм, скорость сварки 50 мм/с.

В результате глубина проплавления составила 2,1 мм, ширина шва — 3 мм. Наблюдался эффект кинжального проплавления, характерный для лазерной сварки. В дальнейшем планируется моделирование процесса лазерной стыковой сварки совместно с индукционным нагревом двумя равноудаленными от места стыка индукторами. С целью уменьшения требуемой компьютерной мощности и времени расчета процесс моделировался только для половины сварочного стыка. Изображение трехмерной геометрической модели представлено на рис. 2.

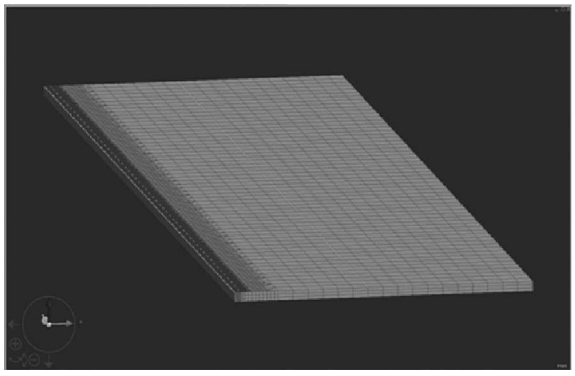


Рис. 2. Изображение построенной в SYSWeld 2012 трехмерной геометрической модели лазерной стыковой сварки с индукционным нагревом околошовной зоны в образце толщиной 2 мм из сплава 6082 T4

Экспериментальные исследования и результаты

Материалы. При проведении экспериментов использовались плоские образцы размером 600S150S2 мм двух марок алюминиевых сплавов — 6082T4 (сплав системы Al–Si–Mg–Mn, российский аналог АД35) и 5754H22 (сплав системы Al–Mg, российский аналог АМГ3). Перед экспериментом поверхности пластин очищались от жира и грязи при помощи ацетона.

Для исследований использовался специально разработанный экспериментальный стенд, оснащенный коаксиальным индуктором KI–112–U–30° фирмы IFF GmbH (Германия) (рис 3).

Составные части экспериментального стенда для исследования влияния индукционного нагрева на генерацию сжимающих напряжений в алюминиевых сплавах имеют следующие характеристики:

Составные части	Интервал изменения параметров
1. *Линейный привод* фирмы Festo EGC-80–800-TB-KF-0H-GK (плюс коркас стенда, собранный из алюминиевых профилей):	
максимальная скорость перемещения, мм/с,	2000
2. *Оборудование для индукционного нагрева* производства IFF GmbH:	
Генератор импульсов EW100W:	
максимальная мощность, кВт,	10,0
мощность импульса, %,	0–750
частота импульсов,кГц,	8–20
Чиллер:	
температура эксплуатации, °С	18–30
Коаксиальный индуктор Kl-112-U-30°:	
максимальное время процесса при использовании максимальной мощности импульса, с,	0–100
допустимый зазор для использования, мм,	0,2–0,5
температура нагрева, °С	0–300

В ходе экспериментов производился индукционный нагрев пластин, при этом пластины перемещались со скоростью сварки, полученной в результате моделирования. Осуществлялось онлайн-измерение температуры в трех разных зонах и линейного изменения размеров во время индукционного нагрева. Повышение температуры фиксировалось с помощью двухканального измерителя температуры GMH 3250 фирмы Greisinger electronic GmbH (Герма-

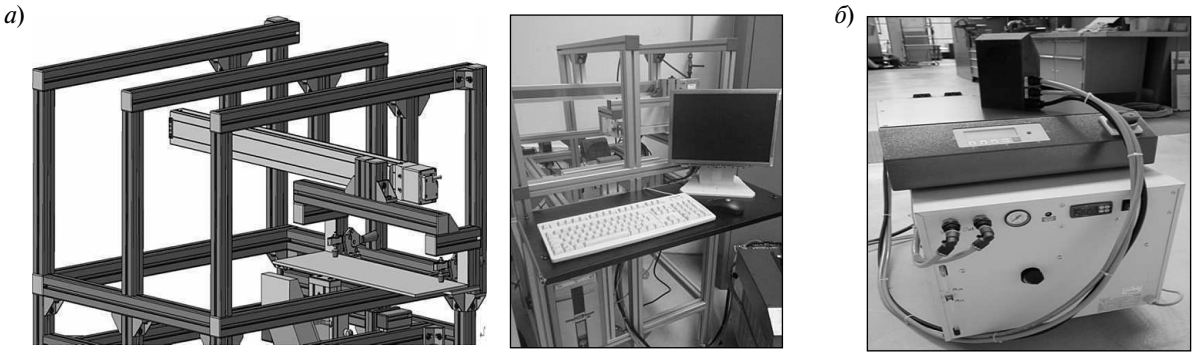


Рис. 3. Изображение экспериментального стенда (*а*) и коаксиального индуктора KI–112–U–30° вместе с генератором импульсов EW100W и чиллером (*б*)

ния) и потенциометра IAS838 фирмы Mastech с функцией измерения температуры. Перемещение температурного поля регистрировалось с помощью инфракрасной камеры i60 фирмы Flir Systems GmbH (Германия). Линейное изменение ширины образца и его искривление в ходе нагрева измерялось при помощи лазерного триангуляционного датчика ScanControl 2700–50(500) фирмы Micro-Epsilon. Некоторые из результатов измерения температуры представлены в таблице.

Процесс индукционного нагрева описывают параметры на двух его стадиях:

параметры процесса разогрева индуктора (шаг 1);

параметры процесса индукционного нагрева пластины в движении (шаг 2).

По результатам моделирования и экспериментов на данном этапе исследований были выбраны следующие параметры индукционного нагрева:

на шаге 1

частота импульсов в индукторе f_1 = 12,5 кГц;

мощность импульсов в процентах от максимально вырабатываемой генератором PWM_1 = = 750 %;

время нагрева t_1 = 5 с;

установленная максимальная температура нагрева индуктора $T_{уст}$ = 300 °С.

на шаге 2

частота импульсов в индукторе f_2 = 13 кГц;

мощность импульсов в процентах от максимально вырабатываемой генератором PWM_2 = = 700 %,

время нагрева t_2 = 10,5 с;

длина перемещения 483 мм;

скорость перемещения 50 мм/с;

зазор между индуктором и пластиной перед нагревом 0,25 мм.

Зарегистрированные значения температуры колебались в пределах от 100 до 140 °С. При этом температурные напряжения в околошовной зоне изменялись в пределах от 38 до 68 МПа, что совпадает с результатами моделирования. Скорость нагрева до высокой температуры зависела от количества повторных нагревов. Это объясняется изменением внутренней структуры материала и его восприимчивости к индукционному нагреву после нагрева до температуры более 140 °С. Существует также зависимость и от положения индуктора по отношению к краю пластины: чем ближе к краю, тем меньшая мощность необходима для нагрева и генерации необходимого уровня напряжений. Однако близко к краю располагать индуктор нельзя из-за быстрой деформации пластины в этом случае. Невозможно было поддерживать параметры нагрева пластины в процессе ее движения на постоянном уровне.

В дальнейшем планируется осуществить экспериментальную проверку результатов моделирования процесса лазерной стыковой сварки, используя излучение, генерируемое с помощью иттербиевого волоконного лазера YLS 10000 с максимальной выходной мощностью в 10 кВт фирмы IPG. Перемещение луча будет осуществляться при помощи робота REIS RV60–60 фирмы Reis Robotics (Германия).

На проведенном этапе исследований было выяснено, что в результате индукционного нагрева пластин из алюминиевых сплавов

Результаты измерения температуры

Номер измерения	Перемещение, мм	$T_{уст}$, °С	Время регул. T, с	На шаг 1			На шаг 2				Направление перемещения при нагреве; расстояние между центром индуктора и краем пластины	Зазор З между индуктором и пластиной перед нагревом			Температура T, °С					
															перед нагревом			во время нагрева		
				f_1, кГц	PWM_1, %	Время, t_1, с	f_2, кГЦ	PWM_2, %	Время, t_2, с	V, мм/с		$З_1$, м	$З_2$, м	$З_3$, м	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
1	500	300	1	12,5	750	10	13	600	10	50	Справа налево; 60 мм	1,0	0,9	0,25	21,4	21,5	22	237,4	86,7	40
2	500	300	1	13,5	750	10	15	700	10	50	Справа налево; 60 мм	1,5	1,0	0,7	35,2	28	25	246,2	93,9	53
4	500	300	1	12,5	750	10	13	600	10	50	Слева направо; 60 мм	0,5	0,5	0,5	23,1	24,4	26	297,8	86,6	52
5	500	300	1	12,5	750	10	15	600	10	50	Слева направо; 60 мм	1,0	0,3	0,25	21,4	21,4	21	266,8	96,4	42
11	483	300	1	12,5	750	5	15	700	10,5	50	Справа налево; 40 мм	0,25	0,25	0,25	24	23,3	22,9	146	122,7	83
12	483	300	1	12,5	750	5	13	700	10,5	50	Справао налево; 40 мм	0,25	0,25	0,25	26	24,9	23,7	143	141,3	97,4
13	483	300	1	12,5	750	5	13	700	10,5	50	Справа налево; 40 мм	0,25	0,25	0,25	28	27,1	25,4	144	142,7	97,8

6082T4 и 5754H22 толщиной 2 мм в них возникают температурные поля, генерирующие поля растягивающих термонапряжений. Выяснено, что возможно достигнуть уровня генерируемых термонапряжений, при котором они способны компенсировать нежелательные внутренние напряжения в сварном шве, приводящие к образованию горячих трещин при лазерной сварке. Подобраны режимы индукционного нагрева, дающие необходимый дополнительный подогрев.

В ходе исследований установлено, что уровень термических полей сильно зависит от первоначальной мощности источника нагрева и постоянства зазора между поверхностью индуктора и алюминиевой пластины. На скорость нагрева пластины влияет и первоначальная структура сплава. Были проведены опыты по многократному индукционному нагреву пластины с последующим охлаждением на воздухе после каждого нагрева. Зафиксировано, что после каждого нагрева средняя регистрируемая температура увеличивается на несколько градусов. Запланировано проведение в дальнейшем проверочных экспериментов по лазерной сварке совместно с индукционным нагревом для подтверждения результатов моделирования. Также будут проведены механические испытания сварных швов и металографические исследования структуры шва. Ввиду задержек, вызванных поставкой необходимого оборудования, эксперименты по сварке перенесены на 2013 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Thomy, C.** Schweißen mit Hochleistungsfaserlasern [Текст] / C. Thomy, T. Seefeld, F. Vollertsen // Werkstatttechnik.— 2005. № 10.— P. 815–820.

2. **Ploshikhin, V.** Integrated Mechanical-Metallurgical Approach to Modeling Solidification Cracking in Welds [Текст] / V. Ploshikhin [et al.] // [Buchverf.] T. Böllinghaus, H. Herold.— Hot Cracking Phenomena in Welds. S. l.— Springer Verlag.— 2005.

3. **Clyne, T.W.** The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems [Текст] / T.W. Clyne, G.J. Davies // British Foundry.— 1981. Vol. 74.— P. 65.

4. **Feurer, U.** Influence of alloy composition and solidification conditions on dendrite arm spacing, feeding and hot tearing properties of aluminum alloys [Текст] / U. Feurer // Proceedings International Symposium on Engineering Alloys.— Delft. The Netherlands. –1977.— S. 131–145.

5. **Piwonka, T.S.** Pore Formation in Solidification [Текст] / T.S. Piwonka, M.C. Flemings // Transactions of the Metallurgical Society of AIME.— 1966. Vol. 236.— P. 1157.

6. **Rappaz, M.** A new hot-tearing criterion [Текст] / M. Rappaz, J.-M. Drezet, M. Gremaud // Metallurgical and Materials Transactions.— 1999. Vol. 30A.— S. 449–455.

7. **Prokhorov, N.N.** The Technological Strength of Metals While Crystallising During Welding [Текст] / N.N. Prokhorov // Welding Production 4.— 1962.— P. 1–8.

8. **Coniglio, N.** Aluminum Alloy Weldability: Identification of Weld Solidifi cation Cracking Mechanisms through Novel Experimental Technique and Model Development [Текст] / N. Coniglio // BAM-Dissertationsreihe Band. Berlin.— 2008. Vol. 40.— P. 208.

9. **Shibahara, M.** Finite Element Method for Hot Cracking Analysis under Welding Using Temperature Dependent Interface Element [Текст] / M. Shibahara, H. Serizawa, H. Murakawa // Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX Ed. P.R. Sahm [et al.]. Aachen: Shaker-Verlag, 2000.— P. 844–851.

10. **Hilbinger, R.M.** Considering of Dynamic Mechanical Boundary Conditions in the Characterisation of a Hot Cracking Test by Means of Numerical Simulation [Текст] / R.M. Hilbinger, H.W. Bergmann, W. Köhler, F. Palm // Mathematical Modelling of Weld Phenomena / Ed. Cerjak [et al.].— IOM Communications Ltd, London.— 2001. Vol. 5.— P. 847–862.

11. **Abbaschian, L.** Cracking susceptibility of aluminum alloys during laser welding [Текст] / L. Abbaschian, Milton Sergio Fernandes de Lima // Materials Research. S-Carlos.— 2003. Vol. 6, № 2.

12. **Васильев, В.И.** Введение в основы сварки [Текст] / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов.— Томск, 2010.— 338 с.

13. **Lindenau, D.** «Magnetisch beeinflusstes laserstrahlschweißen [Текст]: Dissertation / D. Lindenau / Universität Stuttgart.— Herbert Utz Verlag Wissenschaft.— München, 2007.— P. 188.

14. **Рапопорт, Э.Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла [Текст] / Э.Я. Рапопорт.— М.: Металлургия, 1993.— 279 с.

УДК 517.97

О.А. Иванова, В.И. Зубов,
А.Ф. Зубова, М.В. Стрекопытова

ЗАДАЧА ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ АБЕЛЯ

В своем трактате «О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями» [1] А. Пуанкаре приводит несколько примеров (третий мемуар, гл. X). Один из них такой:

$$\frac{d\rho}{d\omega} = (\rho - 1)(\rho - 2), \qquad (1)$$

где ρ — радиус-вектор на плоскости $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; ω — полярный угол. Прямоугольные координаты x, y определяются соотношениями $x = \rho\cos\omega$, $y = \rho\sin\omega$. Окружности $\rho = 1$, $\rho = 2$ являются предельными циклами. Причем, поскольку общее решение есть

$$\rho = \frac{Ce^{\omega} - 2}{Ce^{\omega} - 1},$$

легко видеть, что решение, выходящее из окружности достаточно малого радиуса с центром в начальной точке, никогда более не возвращается в нее. Подвижная точка, находящаяся внутри этого кольца, все время остается внутри него. Для качественного исследования уравнения (1) нет необходимости применять аппарат функций Ляпунова, поскольку роль такой функции уже выполняет радиус-вектор $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Возможно, что именно эти рассуждения и являются предысторией второго метода.

Постановка задачи

Основная задача математической теории автоматического регулирования — установление условий и конструирование систем, при которых траектории системы остаются в заданном множестве G_t, начинаясь в множестве G_{t_0}. Если таким заданным множеством G_t для системы (1) будет кольцо, ограниченное окружностями $\rho = 1$, $\rho = 2$, то множество G_{t_0} — это круг $0 \le \rho \le 2$. Если ставится задача о «двусторонней устойчивости» такого кольца, то уравнение (1) не годится, так как траектория, начинающаяся вне круга $0 \le \rho \le 2$, уходит на бесконечность.

Для конструирования систем с подобными требованиями (они являются обобщением требования об устойчивости решения $\rho = \beta$, $\beta = \text{const}$) систему (1) модифицируем следующим образом:

$$\frac{d\rho}{d\omega} = (\rho - 1)(\rho - 2)(\alpha - \rho), \qquad (2)$$

где $1 < \alpha < 2$. Действительно, при $\rho_0 < 1$ будет выполняться $\rho \underset{\omega \to +\infty}{\to} 1$; при $\rho_0 > 2$ будет $\rho \underset{\omega \to +\infty}{\to} 2$; решение $\rho = \alpha$ — неустойчиво; для всех траекторий, начинающихся в кольце $1 < \rho_0 < \alpha$, будет $\rho \underset{\omega \to +\infty}{\to} 1$, а для всех траекторий, начинающихся в кольце $\alpha < \rho_0 < 2$, будет выполняться $\rho \underset{\omega \to +\infty}{\to} 2$. Уравнение (2) известно как уравнение Абеля 1-го рода и было открыто Н. Абелем в 1824 году. Из уравнения (2) видно, что все траектории неограниченно продолжаемы. Заметим, что характер поведения кривых не изменится, если правую часть уравнения (2) умножить на любую положительную функцию аргументов x, y, $t(\omega)$. Таким образом, общим видом уравнения, обеспечивающего асимптотическую устойчивость кольца с радиусами a, $b\,(a \le b)$ при условии существования решений, будет обобщенное уравнение Абеля 1-го рода

$$\frac{d\rho}{d\omega} = (\rho - a)(\rho - b)(\alpha - \rho) f(x, y, \omega), \qquad (3)$$

где $f > 0$, причем величины a, b, α могут быть функциями времени [2]. Заметим, что при $b \to a$ наша задача переходит в задачу об устойчивости предельного цикла $\rho = a$ и уравнение принимает вид

$$\frac{d\rho}{d\omega} = -(\rho-\alpha)^3 f(x, y, \omega).$$

Если задача не состоит в изучении траекторий внутри кольца G_t, то уравнение (3) может быть заменено уравнением Абеля II-го рода

$$(\alpha-\rho)\frac{d\rho}{d\omega} = (\rho-a)(\rho-b)f(x, y, \omega). \qquad (4)$$

В этом случае при $b \to a$ наша задача переходит в задачу об устойчивости предельного цикла $\rho = a$ и уравнение принимает привычный в теории устойчивости вид

$$\frac{d\rho}{d\omega} = -(\rho-a)f(x, y, \omega). \qquad (5)$$

Все вышеизложенное наводит на мысль о том, что, рассматривая задачу об устойчивости нулевого решения возмущенной системы по второму методу Ляпунова, не представляется возможным конструировать системы управления для задач в общей постановке. Для построения математической модели управляемого процесса желательно использовать подход, который совмещал бы в себе основные черты классических постановок в предельном случае, но в то же время был работоспособен и в случае неединственности решений. Иначе говоря, желательно строить такие математические модели, для которых требование устойчивости или асимптотической устойчивости положения равновесия $X = 0$ заменяют требованием устойчивости множества, возможно, даже не инвариантного, причем устойчивость понимается в определенном смысле [4].

В теории нелинейных систем автоматического управления (САУ) это известно как элемент типа «люфт» [3].

Покажем, что качественная картина плоских траекторий сохраняется и в скалярном случае. Рассмотрим скалярное уравнение

$$\dot{X} = f(X, t) \qquad (6)$$

и поставим вопрос о существовании двух решений — $X = a$, $X = b$, каждое из которых было бы условно асимптотически устойчивым. Пусть сначала a, b — постоянные и $a < b$. Потребуем, чтобы

$$X(t, X_0) \underset{t\to+\infty}{\to} a \quad \text{при} \quad X_0 < a,$$

$$X(t, X_0) \underset{t\to+\infty}{\to} b \quad \text{при} \quad X_0 > b.$$

Поведением решений при $a < X_0 < b$ пока интересоваться не будем.

Рассмотрим уравнение Абеля II-го рода

$$(X-c)\dot{X} = (X^2 + a_1 X + a_0)f(t).$$

Если $a_1^2 \geq 4c$, то это уравнение приводится к виду

$$\dot{X} = (X-a)(X-b)(c-X)^{\alpha} G(X,t); \qquad (7)$$

здесь $a < c < b$, $\alpha = -1$. Пусть также пока $c = \text{const}$.

Теорема 1. Если функция $G(X,t)$ является знакопостоянной положительной в полосе

$$\{0 < t_0 < t;\ X < a - \varepsilon_1;\ b + \varepsilon_2 < X\},$$

где ε_1, ε_2 — положительные числа, то решения $X = a$, $X = b$ условно асимптотически устойчивы, причем при $\alpha = +1$ все решения системы (7) неограниченно продолжаемы вправо и ограничены.

Доказательство. Продифференцируем функцию

$$V(X) = (X-c)^2.$$

В силу системы (7) получим

$$\dot{V}(X) = 2V(X-b)(c-X)^{\alpha} G(X,t). \qquad (8)$$

Знак производной функции $V(X)$ определяется произведением сомножителей $(X-b)(c-X)^{\alpha}$, которое всегда отрицательно при $X < a$. Следовательно, решение $X = a$ условно асимптотически устойчиво при $X_0 < a$. Продифференцируем теперь функцию $V_1(X) = (X-b)^2$ в силу системы (7); получим

$$\dot{V}_1(X) = 2V_1(X-a)(c-X)^{\alpha} G(X,t). \qquad (9)$$

Знак производной функции $V_1(X)$ определяется произведением сомножителей $(X-a)(c-X)^{\alpha}$, которое всегда отрицательно при $b < X$. Следовательно, решение $X = b$ условно асимптотически устойчиво при $b < X_0$. При $\alpha = +1$ правая часть системы (7) определена и непрерывна, а решения, учитывая (8), (9), ограничены:

$$\| X(t, X_0, t_0) - a \| < \| X_0 - a \| \quad \text{при} \quad X_0 < a;$$

$$\| X(t, X_0, t_0) - b \| < \| X_0 - b \| \text{ при } b < X_0 .$$

При $a < X_0 < b$ справедливо $a \le X(t, X_0, t_0) \le b$.

Не ограничивая общности, можно считать, что $a = 0$. Заметим, что при $b \to a$ и $\alpha = -1$ уравнение (7) принимает вид

$$\dot{X} = -XG_1(X,t), \qquad (10)$$

где функция $G_1(X,t)$ — положительна в некоторой окрестности точки $X = 0$ при $t > 0$, что обеспечивает асимптотическую устойчивость решения $X = 0$, если оно существует. Если в уравнении (3) $G(X,t) = G(t)$, то при $\alpha = 1$ уравнение (7) является уравнением Абеля 1-го рода, при $\alpha = -1$ — уравнением Абеля II-го рода. Таким образом, показано, что этот известный тип уравнений является не математической «экзотикой», а весьма актуальным направлением в анализе и синтезе математических моделей управляемых систем.

Можно рассматривать эту задачу и в иной постановке, считая параметры *a*, *b*, *c* функциями времени.

Существование автоколебаний в динамических системах, устойчивых по Лагранжу

При компьютерном моделировании пренебрежение наличием инвариантных множеств может привести к принципиально неверным прогнозам динамики системы. Прогнозирование состояния системы, сделанное с помощью компьютера, может иметь приемлемую точность, если дискретизованная модель сохраняет основные структурные особенности моделируемой системы, в число которых входят наличие стационарных и нестационарных инвариантных множеств, их свойства и характер предельного поведения траекторий системы. Все это требует тщательного аналитического исследования уравнений динамики для обнаружения этих свойств. Кроме того, сами алгоритмы дискретизации требуют такого их изменения, чтобы указанные структурные свойства непрерывной модели сохранялись и у дискретной модели, уже пригодной для компьютерной реализации.

Пусть исследуемая система описывается динамической системой *f*(*p*, *t*) в ограниченном замкнутом множестве *R* евклидова пространства E_n.

Определение 1. Множество $M \subset R$ называется *инвариантным по отношению к динамической системе* $f(p,t)$, если оно состоит из траекторий этой динамической системы, т. е. из $p \in M$ следует $f(p,I) \subset M$.

Определение 2. Инвариантное множество $M \subset R$ динамической системы *f*(*p*, *t*) называется *устойчивым по Ляпунову*, если $\forall \varepsilon > 0$, $\exists \delta > 0$: $\rho(p, M) < \delta \Rightarrow \rho(f(p,t), M) < \varepsilon$, $\forall t > 0$.

Если δ к тому же можно выбрать так, что будет выполняться

$$\rho(f(p,t), M) \underset{t \to \infty}{\to} 0,$$

то инвариантное множество *M* называется *асимптотически устойчивым*.

Согласно терминологии А.М. Ляпунова, устойчивость инвариантного множества *M* означает устойчивость всех движений *f*(*p*, *t*) (где $p \in M$) по отношению к величине $\rho(p, M)$.

Определение 3. *Автоколебанием динамической системы f*(*p*, *t*) называется инвариантное устойчивое по Ляпунову и асимптотически устойчивое множество *M*, не имеющее собственного подмножества с такими же свойствами [2].

Определение 4. Точка $q \in R$ называется *ω-предельной точкой движения динамической системы f*(*p*, *t*), если существует последовательность значений параметра $\{t_k\} : t_k \underset{k \to \infty}{\to} \infty$ такая, что

$$f(p_k, t_k) \underset{k \to \infty}{\to} q .$$

Множество ω-предельных точек индивидуального движения *f*(*p*, *t*) обозначим Ω_f. Это множество — инвариантное и связное [4]. В нашем случае, когда траектории всех движений принадлежат ограниченному множеству *R*, множество Ω_p не пусто для любой точки $p \in R$ [3]. Обозначим Ω_f совокупность всех ω-предельных точек движений *f*(*p*, *t*) при $p \in R$: $\Omega_f = \bigcup_{p \in R} \Omega_p$.

Теорема 2. Множество Ω_f является инвариантным, устойчивым по Ляпунову и асимптотически устойчивым множеством динамической системы $f(p,t)$.

Доказательство. Множество Ω_f является инвариантным, так как представляет собой совокупность инвариантных множеств Ω_p, где точ-

ки p принадлежат замкнутому множеству R. Докажем свойство его устойчивости по Ляпунову. Покажем сначала, что $f(p,t) \underset{t\to\infty}{\to} M \quad \forall p \in R$.

Действительно [2], для каждого индивидуального движения $f(p, t)$ выполнено

$$\rho(f(p,t),\Omega_p) \underset{t\to\infty}{\to} 0.$$

Но по свойству метрического расстояния справедливо

$$\rho(f(p,t),\Omega_f) \le \rho(f(p,t),\Omega_p).$$

Это означает, что по любому $\varepsilon > 0$ можно указать T такое, что при $t > T$ будет выполнено $\rho(f(p,t),\Omega_f) < \varepsilon \ \forall p \in R$. По свойству непрерывности $f(p, t)$ по своим аргументам по величинам T, ε можно указать величину $\delta > 0$ такую, что при $\rho(p,\Omega_f) < \delta$ будет выполнено $\rho(f(p,t),\Omega_f) < \varepsilon$ при $0 \le t \le T$.

Покажем, что найденная величина δ удовлетворяет определению устойчивости по Ляпунову. Действительно, при выполнении условия $\rho(p,\Omega_f) < \delta$ величина $\rho(f(p,t),\Omega_f)$ остается меньше величины ε на интервале $[0, T]$ по свойству интегральной непрерывности, а на интервале $(T, +\infty)$ — по доказанному выше свойству, из которого следует также асимптотическая устойчивость множества Ω_f.

Теорема 3. Множество Ω_f содержит автоколебание.

Доказательство. Действительно, если у Ω_f нет собственного подмножества с установленными свойствами, то оно само является автоколебанием; если есть, то возьмем это подмножество в качестве «подозрительного» на автоколебание. Продолжая данный процесс, можно найти множество, обладающее установленными в теореме 1 свойствами и не имеющее собственного подмножества с указанными свойствами. Оно и будет автоколебанием.

Изложенное связано с исследованиями Дж. Биркгофа и Г. Хильми [1], однако ранее не была установлена устойчивость по Ляпунову совокупности множеств предельных точек индивидуальных движений, принадлежащих ограниченному множеству.

Из полученного результата следует наличие предельного режима у броуновского движения. Иными словами, совокупность движений в ограниченном множестве имеет предельный режим, однако структура этого предельного режима может быть весьма сложной. Имеющиеся примеры странных аттракторов доказывают это.

Наличие только неустойчивых по отношению к расстоянию между ними движений, принадлежащих предельному режиму, показывает, что в этом случае траектории предельного режима Ω_f будут плотными.

Следует отметить, что понятия устойчивости и асимптотической устойчивости инвариантного множества подразумевают его изолированность, т. е. существуют точки пространства, не принадлежащие инвариантному множеству и находящиеся в его достаточно малой окрестности. Если таких точек нет, то и исследование устойчивости инвариантного множества становится бессмысленным. Возможно, это условие следовало бы включить в определения устойчивости и асимптотической устойчивости для парирования экзотических контрпримеров. Кроме того, необходимо помнить о том, что наличие достаточно малой компактной окрестности, не содержащей целых траекторий, является необходимым условием асимптотической устойчивости инвариантного множества [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (пр. № 10–08–00624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубов, А.В.** Математические методы качественного анализа систем управления и устойчивость расчетных движений [Текст] / А.В. Зубов, С.В. Зубов.— СПб: ВВМ, 2011.— 323 с.

2. **Зубов, А.В.** Управление динамическими системами [Текст] / А.В. Зубов, О.А. Шабурова.— СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2005.— 83 с.

3. **Зубов, А.В.** Динамическая безопасность управляемых систем [Текст] / А.В. Зубов, Н.В. Зубов.— СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2009.— 172 с.

4. **Зубов, А.В.** Математические методы качественного анализа систем управления и устойчивость расчетных движений [Текст] / А.В. Зубов, С.В. Зубов.— СПб.: АООТ «Мобильность-плюс», 2012.— 357 с.

УДК 681.51

В.Е. Брунман, А.Н. Волков, А.В. Коняшин,
А.П. Петкова, А.В. Смородов

ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Анализ существующих конструкций мембранных электролизеров

Практически все существующие мембранные электролизеры для производства хлора и каустической соды имеют конструкцию типа фильтр-пресса (рис. 1, *а*).

По электрическому соединению электролизеры разделяются на моно- и биполярные. В монополярных электрический ток подводится непосредственно к аноду и катоду каждой ячейки, в биполярных — только к крайнему аноду и катоду. Монополярные электролизеры характеризуются высокой токовой нагрузкой (сотни кА) и низким напряжением (до 4 В), биполярные — токовой нагрузкой 10–20 кА и напряжением несколько сотен Вольт.

В настоящее время, особенно при создании новых производств, используются биполярные электролизеры. Они позволяют получать аппараты большой единичной мощности за счет увеличения числа ячеек, в них нет необходимости подвода тока к каждому электроду через шину, что упрощает саму конструкцию и ее монтаж, уменьшает вес электролизера и расход меди, обеспечивает поддержание одинаковой токовой нагрузки во всех ячейках.

Совершенствование конструкций биполярных мембранных электролизеров осуществлялось в основном за счет разработки электрических схем заземления и изоляции, а также путем установки специальных токосъемников в местах, опасных в плане коррозии. Также серьезной проблемой в биполярных электролизерах был выбор и изготовление деталей из биметаллов.

Кроме того, в процессе совершенствования конструкций мембранных электролизеров были решены проблемы, выявленные в процессе эксплуатации. Из-за колебаний перепада давления между ячейками электролизера и обезвоживания верхней части мембран за счет разделения фаз газожидкостной смеси происходило разрушение в виде выкрашиваний мембран в этом месте. В современных конструкциях электролизеров разделение фаз происходит в местах, не соприкасающихся с мембраной, а мембрана не разрушается, поскольку при работе прижимается в сторону анода и не подвергается биениям за счет создаваемого избыточного давления в катодных камерах, по величине превышающего возможные колебания давления (не менее 0,4 м вод. ст.).

Ликвидация протечек электролизеров обеспечивается использованием герметизирующих

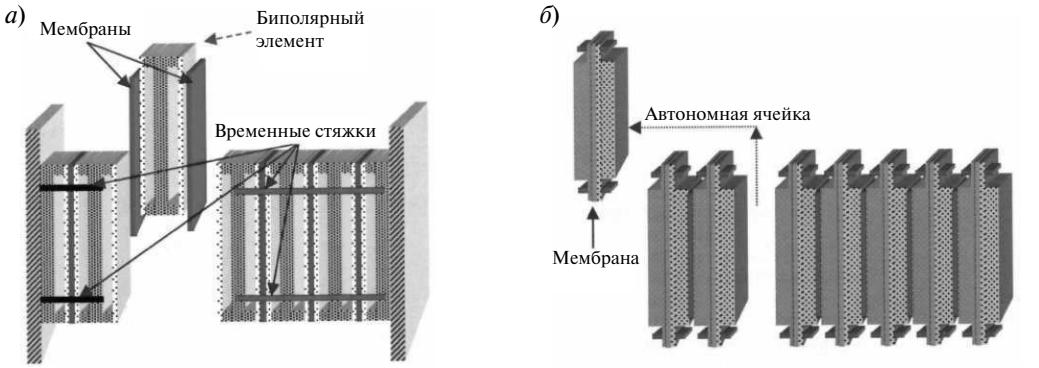


Рис. 1. Конструкции мембранных электролизеров фильтр-прессного типа (*а*) и из автономных ячеек (*б*)

прокладок, проточек и специальных замковых соединений «прокладка — уплотняющая плоскость», а также приемами сборки электролизеров, обеспечивающими равномерное распределение давления сжатия.

При переходе от монополярной конструкции к биполярной значительно повысилась равномерность распределения тока по поверхности мембраны. Некоторые конструкции, например «Chlorine Engineers Corp. Ltd» [1, 2], дополнительно предусматривают устройства-распределители тока, так называемые «пауки», повышающие равномерность тока между отдельными ячейками электролизера. Равномерность распределения тока по высоте повышена за счет конструкции электродных пластин, имеющих элементы, которые отводят выделяющиеся газы в заэлектродное пространство, а также благодаря организации высокой скорости движения газожидкостной смеси в межэлектродном пространстве за счет газлифта. Последнее позволило отказаться от технически сложной и затратной принудительной циркуляции электролитов.

Биполярные мембранные электролизеры представлены на международном рынке такими компаниями, как «Asahi Kasei» (Япония), «Uhde Nora» (Германия), «Chlorine Engineering Corp. Ltd» (Япония), «Eltecsystems» (США), «Ineos» [1–4]. В конструкциях перечисленных производителей биполярные электролизеры выполняются как с «нулевым зазором» (когда электроды непосредственно прижаты к ионообменной мембране), так и с фиксированным на уровне 1,5–2,0 мм расстоянием между электродами.

Плотность тока на мембранах составляет 4,0–8,0 кА/м^2, что соответствует линейной токовой нагрузке 10–20 кА. Для электролизеров с фиксированным межэлектродным расстоянием напряжение на одной ячейке при плотности тока 4,0 кА/м^2 составляет 2,88–2,95 В. Для электролизеров с «нулевым зазором» напряжение при 4,0 кА/м^2 равно 2,8 В, при 6,0 кА/м^2 — 3 В.

На металлической раме фиксируются биполярные электродные элементы (биполяры), между которыми располагают ионообменные мембраны (рис. 2). При монтаже мембрану вручную устанавливают и стягивают между двумя биполярными элементами (см. рис. 1). Общую стяжку электролизера осуществляют гидравлическим прессом (см. рис. 2).

Общими тенденциями повышения энергоэффективности, надежности и долговечности мембранных электролизеров на международном рынке являются:

применение титановых диафрагм анода и катода с защитными электрокаталитическими покрытиями соответственно из оксидов титана,

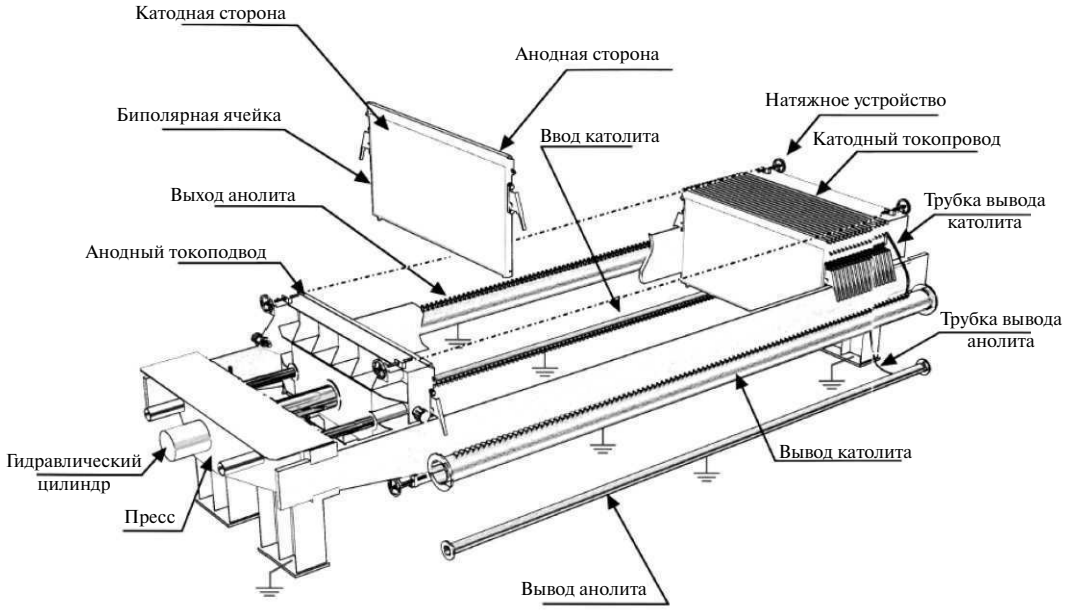


Рис. 2. Общий вид биполярного электролизера ML 32NCH

рутения и иридия для анода и никеля или его оксидов для катода; выполнение биполярных элементов электролизера из полученного сваркой взрывом биметаллического листа, состав которого аналогичен аноду и катоду. Это позволяет снизить стоимость и повысить производительность установки;

сужение пространства между электродами, что позволяет снизить потребляемую мощность, в том числе работать с менее мощным источником питания, чем у обычного электролизера;

использование тока более высокой плотности (5–6 кА/м^2) по сравнению с применявшейся (3–4 кА/м^2), что обеспечивает повышение производительности реактора и снижение первоначальных затрат благодаря использованию электролизных установок меньшего размера;

применение лучших в своем классе сульфакатионитных мембран ведущих производителей — «Du Pont» (США), «Asahi Kasei» (Япония), «Asahi Glass» (Япония), которые позволяют получать конечные продукты электролиза очень высокого качества при максимальной стабильности ведения процесса по сравнению с более дешевыми аналогами.

Российские мембранные биполярные электролизеры МБЭ производства ООО НПО «Экотехнология НН» (г. Дзержинск) [5] представляют собой конструкции фильтр-прессного типа с фиксированным на уровне 1,5–2,0 мм расстоянием между электродами. Производительность установок обеззараживания воды на основе мембранных биполярных электролизеров типа МБЭ — 25, 50, 100, 150, 300, 900 кг активного хлора в сутки; они отличаются от базовой модели количеством биполярных элементов.

Корпус анода выполнен из стойкой к агрессивной среде нержавеющей стали, внутри располагается анодная сетка из титана, покрытая оксидом рутения. Корпус катода выполнен из нержавеющей стали, внутри располагается катодная сетка из нержавеющей стали. Биполярные электродные элементы (биполяры) из биметаллического листа состава «нержавеющая сталь — титан с рутениевым покрытием» фиксируются на металлической раме, между ними располагаются ионообменные мембраны.

Электролизеры комплектуются сульфакатионитными мембранами Nafion-624 производства фирмы «Du Pont» (США) или мембраны Flemion F811 производства фирмы «Asahi Glass» (Япония). При монтаже мембрану устанавливают вручную и стягивают между двумя биполярными элементами, общую стяжку электролизера осуществляют гидравлическим прессом. Размеры мембраны в электролизере МБЭ-5 составляют 0,5×0,70 м, рабочая площадь мембраны — 0,24 м^2.

Анализ характеристик и структуры ионообменных мембран

Основными показателями мембран, близкими для марок Nafion, Aciplex и Flemion ведущих фирм-производителей «Du Pont» (США), «Asahi Kasei» (Япония), «Asahi Glass» (Япония) при всех различиях в составе и технологии их изготовления, являются [6]:

высокая химическая стойкость при воздействии сильных окислителей и концентрированной щелочи при температурах до 100–120 °С;

высокая селективность, обеспечивающая выход по току не ниже 96 % в начале срока службы мембран;

низкое электрическое сопротивление, обеспечивающее падение напряжения на мембране не выше 0,5 В при плотности тока 4–6 кА/м ^{2};

высокая механическая прочность, стабильность размеров и характеристик мембраны в процессе эксплуатации (не менее 4 лет).

Все выпускаемые ионообменные мембраны для производства хлора (каустика) состоят из двух основных слоев (рис. 3). Тонкий слой, обращенный к катоду, выполняется из карбоксильного полимера и обеспечивает высокую селективность мембраны по ионам Na^+. Относительно толстый слой со стороны анода (как правило, из сульфополимера) обеспечивает механическую прочность и имеет низкое электрическое сопротивление.

Со стороны анода мембраны имеют поверхностное покрытие, предназначенное для устранения прилипания выделяющихся при электролизе пузырьков хлора к поверхности мембраны. К анодной стороне примыкают жертвенные пустотелые нити; они при разрушении активным хлором создают внутри мембраны каналы и отверстия, по которым раствор хлорида натрия проникает внутрь мембраны. Это обеспечивает работу мембраны без разрушения при высоких плотностях тока и снижение осаждения при-

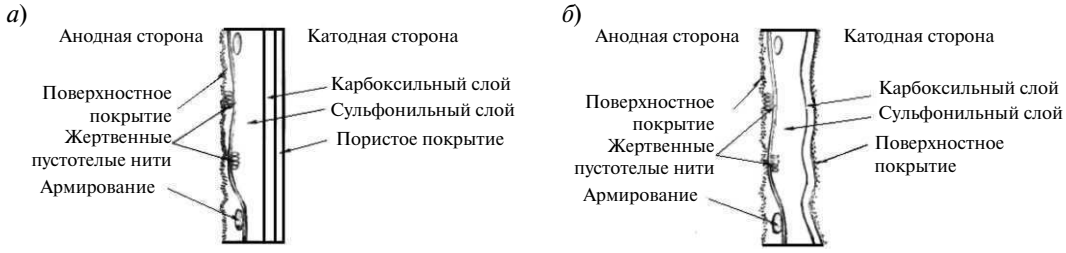


Рис. 3. Структура катионообменных мембран

месей в ней. Основное, чем отличаются мембраны, представленные на рис. 3, — это наличие с катодной стороны пористого покрытия (рис. 3, *а*). Назначение такого покрытия — снижение накопления загрязняющих примесей около катодной стороны мембраны, которые снижают выход по току и повышают электрическое сопротивление.

Армирование в виде политетрафторэтиленовой сетки обеспечивает высокую механическую прочность мембраны и сопротивление раздиру.

Одним из наиболее широко используемых типов ионообменных материалов в зарубежных и отечественных мембранных электролизерах являются мембраны Nafion фирмы Du Pont. Они представляют собой сополимер тетрафторэтилена и перфторированного сульфосодержащего винилового эфира [7]. В таблице приведены основные характеристики мембран Nafion [8] и их аналогов [9, 10] по данным, заявленным фирмами-производителями. Мембраны марки Nafion превосходят отечественные и зарубежные аналоги по химической стойкости, механической прочности и ионной проводимости в интервале температур до 100 °С [11].

В качестве перспективных материалов для изготовления сульфокатионитных ионообменных мембран можно рассматривать ароматические полиамиды и полисульфоны, которые разрабатываются совместно ООО НПП «Технофильтр» (г. Владимир) и ОАО «Институт пластмасс» (г. Москва). На их основе были получены тонкие гомогенные мембраны, обладающие высокими физико-механическими свойствами. Удельная протонная проводимость при комнатной температуре ряда образцов достигает 10^{-2} $Ом^{-1}см^{-1}$ [12] и вполне соответствует лучшим промышленным образцам гомогенных мембран по данным таблицы.

В процессе эксплуатации показатели работы ионообменных мембран ухудшаются, притом у рассмотренных мембран отечественного производства в большей степени, чем у более дорогих западных аналогов. У лучших из рассмотренных образцов мембран марок Nafion, Aciplex и Flemion снижение выхода по току составляет в среднем 0,5–1,0 % в год, и если выход по току в начальный период составляет 96–97 %, то через 4 года снижается до 92–95 %, при этом одновременно увеличивается напряжение на

Основные характеристики некоторых катионообменных мембран

Мембрана	Фирма производитель	Тип мембраны	Ионообменная емкость, мг-экв/г	Набухание, %	Ионная проводимость, $Ом^{-1}см^{-1}$
Nafion-117	Du Pont, США	гомогенная	0.9–1.0	<20	0,012 (0,5 M NaCl) [9]
МФ-4СК	«Пластполимер», Россия	гомогенная	0.9–1.0	20	0,008 (0,5 M NaCl) [9]
Ralex CM	Mega, Чехия	гетерогенная	2.2	<50	>0,0062 [9]
МК-40	«Щекиноазот», Россия	гетерогенная	2.2	30 ± 5	0,007 (0,5 M NaCl) [10]

мембранах. Расход электроэнергии в расчете на 1 т производимого хлора за каждый год эксплуатации увеличивается на 25–50 кВт·ч.

Проект экспериментального мембранного электролизера

Для проведения исследований на базе мембранного электролизера МБЭ-3,2 производительностью 3,2 кг в сутки по активному хлору была разработана экспериментальная малогабаритная биполярная электролизная установка ЭМБЭ. На рис. 4 представлена ее принципиальная технологическая схема. В соответствии с приведенной схемой станция обеззараживания воды включает электролизер, узел растворения и дозирования хлорида натрия, эжектор, коммуникации. Между электролизером и эжектором установлен циркуляционный контур, содержащий накопитель щелочи, теплообменник и насос. Узел растворения и дозирования состоит из регулировочного бачка, солевого бака, насоса-дозатора, ротаметра и аккумулирующей емкости.

На рис. 5 — электролизерный блок мембранного биполярного электролизера. Электролизер, выбранный для проведения экспериментальных исследований, состоит из анода, биполярного элемента (имеет прямоугольную форму и включает рамку, анодную и катодную камеры, которые разделены перегородкой, выполненной из биметаллического листа) и катода.

Катодный элемент выполнен из перфорированной нержавеющей стали с никелевым покрытием и приварен к токоведущим ребрам катодной камеры. Анодный элемент выполнен из перфорированного листа титана, покрытого окислами рутения и титана, и приварен к токоведущим ребрам анодной камеры. Между электродными элементами установлена ионообменная сульфокатионитная мембрана Nafeon-624. Общая стяжка электролизера осуществляется гидравлическим прессом.

Применение защитных покрытий для биполяра, катодного и анодного элементов, а также использование сульфокатионитной мембраны Nafeon-624 обеспечивают стабильность электрохимических показателей процесса в течение длительного времени.

Автоматизированная система управления экспериментальным мембранным электролизером АСУ ЭМБЭ

Весьма актуальна задача разработки оптимального алгоритма управления установками электролиза для обеспечения заданного уровня концентрации хлора в питьевой воде одновременно при минимизации ресурсопотребления установкой и максимальном быстродействии

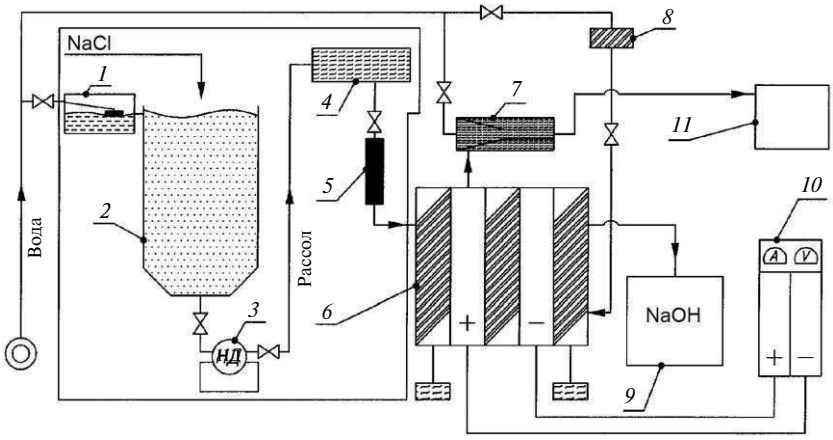


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема станции обеззараживания воды, включающая узел дозирования и растворения хлорида натрия, состоящий из регулировочного бачка *1*, солевого бака *2*, насоса-дозатора *3*, аккумулирующей емкости *4*, ротаметра *5*. Станция также включает экспериментальный мембранный электролизер *6*, эжектор *7*, установку умягчения воды *8*, накопитель щелочи *9*, электрический блок управления *10*, контактный резервуар *11*

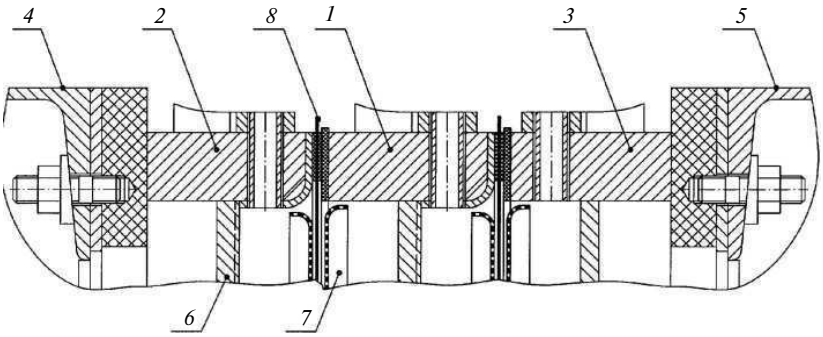


Рис. 5. Электролизерный блок мембранного биполярного электролизера, состоящий из биполяра *1*, монополяра анода *2*, монополяра катода *3*, прижимной рамы *4*, опорной рамы *5*, биметаллической плиты *6*, листа перфорированного *7*, ионообменной сульфокатионитной мембраны *8*

реакции на возможные колебания расхода воды. В рассмотренных отечественных и зарубежных конструкциях электролизеров такая система отсутствует.

Регулирование, осуществляемое системой управления, предусматривает несколько основных режимов работы: режим начального пуска, работу на холостом ходу, вывод на режим (режим регулирования со стабилизацией по напряжению генератора), работу в процессе электрохимического синтеза, а также отработку различных аварийных режимов, в том числе при коротких замыканиях.

Адаптивное управление экспериментальным мембранным электролизом осуществляет АСУ, построенная на базе программируемых контроллеров автоматизации CompactRIO, производимых компанией «National Instruments» (США). Программное обеспечение АСУ ЭМБЭ написано в среде графического программирования LabVIEW производства той же компании.

АСУ ЭМБЭ представляет собой распределенную автоматизированную систему управления процессом электролиза, включающую три уровня:

а) нижний уровень управления осуществляется исполнительными устройствами, сервоклапанами и силовозбудителями, а также датчиками и измерительными преобразователями CompactRIO. Он обеспечивает получение объективной информации об изменении параметров процесса электролиза на отдельно взятом электролизере, а также регулирование процесса электролиза. Конструкция предполагает минимальное расстояние от датчика до контроллера, а следовательно, минимизацию шумов и увеличение точности измерения. Таким образом, нижний уровень обеспечивает сбор и обработку сигналов с датчиков, расположенных вблизи объекта мониторинга, а также управление и регулирование процесса электролиза в соответствии с разработанными алгоритмами оптимизации его производительности;

б) средний уровень АСУ МЭ осуществляется контроллером измерения и контроллером управления, исполненными на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) реконфигурируемого шасси CompactRIO. Управление вводом/выводом и обработка сигналов происходят на уровне ПЛИС и под управлением операционной системы реального времени (ОСРВ), что дает высокую надежность программного кода и наилучший детерминизм в выдаче команд. Применение для установки ПЛИС корпусов шасси, защищенных от повышенной влажности, повышенной температуры и большой запыленности, дает возможность размещения контроллеров непосредственно в объекте испытания;

в) верхний уровень управления осуществляется исполненным на основе сигнального процессора контроллером автоматизации Compact RIO, который связан с пультом АРМ оператора станции обеззараживания. Верхний уровень выполняет:

получение по сети Internet проанализированных данных с распределенных контроллеров (электролизных установок);

подготовку, создание, хранение циклограмм испытаний;

визуализацию процесса испытаний в удобном графическом, табличном и текстовом виде;

запись всех параметров процесса электролиза в журнал на сетевом дисковом массиве;

быструю и удобную подготовку и создание отчета о результатах процесса электролиза;

отображение регулируемых параметров на дисплее АРМ оператора

осуществление обратной связи с удаленной электролизной установкой на основании анализа и обработки данных электролиза;

удаленный контроль и управление работой любого из электролизеров, объединенных в общую сеть, из любой точки мира.

Работа системы АСУ ЭМБЭ позволила получить объективную информацию о работе мембранного электролизера в различных режимах эксплуатации. Такой подход позволяет эффективно, с минимальными трудозатратами исследовать широкий спектр параметров и получать оперативный доступ к большим объемам данных. Мониторинг параметров электролизной установки в условиях эксплуатации открывает новые возможности по изучению и оценке реальных режимов работы и других параметров обеззараживания воды. Собранная информация может быть использована для отработки новых технических и технологических решений, повышающих эффективность работы и КПД установок мембранного электролиза.

Испытания АСУ ЭМБЭ в области автоматизации сбора, обработки сигналов с датчиков и выдачи информации на верхний уровень

Для проведения испытаний экспериментальный малогабаритный биполярный электролизер был оснащен автономной системой управления мембранным электролизером (АСУ ЭМБЭ), обеспечивающей процесс обеззараживания воды, включая управление элементами ЭМБЭ, регулирование параметров рабочих компонентов по заданным алгоритмам, сбор, регистрацию, отображение, хранение и обработку информации всех необходимых сигналов и параметров процесса электролиза.

Производилась проверка возможностей оборудования и программного обеспечения системы АСУ ЭМБЭ по обработке сигналов с подключенного к модулю аналогового ввода контроллера автоматизации датчика давления PC-28 производства компании «Aplisens» (Польша).

С помощью измерительного преобразователя CompactRIO, входящего в состав АСУ ЭМБЭ, осуществлялась оцифровка с частотой 10 кГц сигнала с датчика давления воды PC-28, установленного на выходе мембранной электролизной установки. Затем производилась обработка полученных данных с помощью алгоритмов фильтрации, имеющихся в составе программного обеспечения АСУ ЭМБЭ.

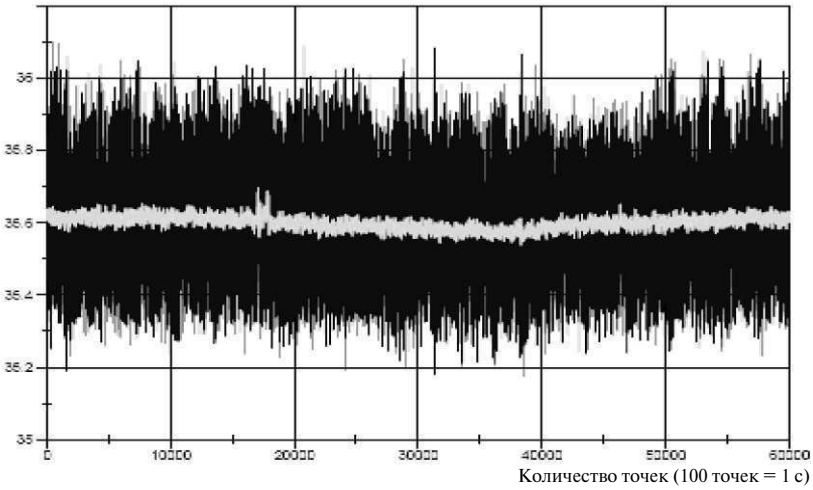


Рис. 6. Сравнение исходного сигнала от датчика давления воды PC-28, полученного через порт Ethernet от контроллера АСУ ЭМБЭ CompactRIO и записанного в файл Excel, и полезного сигнала после цифровой обработки программным обеспечением АСУ ЭМБЭ

Для необходимой в будущем синхронизации сбора данных с контроллеров, установленных на разных мембранных электролизерах станции обеззараживания и водоподготовки, использовался сигнал GPS приемника, подаваемый на один из дифференциальных входов модуля аналогового ввода. Результаты измерений были представлены в формате числовых данных, графиков и диаграммы. Результаты сохранены в формате xls (MS Excel). Обмен данных между контроллером и компьютером производился на скорости 100 Мбит/сек. Выделенный полезный сигнал изображен на рис. 6. Проведенное тестирование подтвердило получение данных через порт Ethernet, сохранение их в виде файлов и последующую их обработку программным обеспечением АСУ МЭ верхнего уровня.

Дальнейшая математическая обработка производилась как в контроллере, так и на сервере сбора данных, в том числе и с помощью приложений, разработанных с применением средств программного обеспечения АСУ ЭМБЭ.

Результаты проведенного тестирования показывают, что контроллер АСУ ЭМБЭ по своим возможностям полностью удовлетворяет целям сбора, скоростной обработки технологических сигналов и выдачи команд управления в производственных условиях станций обеззараживания и водоподготовки, а программное обеспечение АСУ ЭМБЭ обеспечивает простоту разработки, открытость и легкость понимания алгоритмов скоростной обработки и графической визуализации как технологических сигналов состояния оборудования, так и телеизмерений давления в составе систем мембранного электролизера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Takahashi, Y.** New Electroliser Design for High Current Density [Текст] / Y. Takahashi, H. Obanawa, Y. Noaki.— Modern Chlor-Alkali Technology / ed. by John Moorhouse. 2001. Vol. 8.— P. 213–234.

2. BITAC-CME-MBC the advanced membrane electrilyzer [Текст] // Chlorine Engineers.— 2004.

3. Acilyzer [Текст] // Membrane Chlor-Alkali Electrolyzers Asahi Kasei.— 2008.

4. KU Electrolysis Technology [Текст].— Uhde, 2002.

5. **Патент РФ № 113735 на полезную модель** Станция обеззараживания воды [Текст] / Е.П. Новичков, Е.Н. Аракчеев, О.А. Коняхин, С.А. Африн // БИ.— 2012. № 6.

6. **Мазанко, А.Ф.** Промышленный мембранный электролиз [Текст] / А.Ф. Мазанко, Г.М. Камарьян, О.П. Ромашин // М.: Химия, 1989.

7. **Hickner, M.A.** Alternative polymer systems for proton exchange membranes (PEMs) [Текст] / M.A. Hickner, H. Ghassemi, Y.S. Kim [et all.] // Chem. Rev.— 2004. Vol. 104.— P. 4587.

8. **Roziere, J.** Non-fluorinated polymer materials for protonexchange membrane fuel cells [Текст] / J. Roziere, D.J. Jones // Ann. Rev. Mater. Res.— 2003. Vol. 33.— P. 503–555.

9. **Березина, Н.П.** Электротранспортные и структурные свойства перфторированных мембран Нафион-117 и МФ-4СК [Текст] / Н.П. Березина, С.В. Тимофеев, А.-Л. Ролле, Н.В. Федорович, С. Дюран-Видаль // Электрохимия.— 2002. Т. 38.— С. 1009–1015.

10. **Карпенко, Л.В.** Сравнительное изучение методов определения удельной электропроводности ионообменных мембран [Текст] / Л.В. Карпенко, О.А. Демина, Г.А. Дворкина, С.Б. Паршиков [и др.] // Электрохимия.— 2001. Т. 37, № 3.— С. 328.

11 **Багоцкий, В.С.** Топливные элементы. Современное состояние и основные научно-технические проблемы [Текст] / В.С. Багоцкий, А.М. Осетрова, А.М. Скундин // Электрохимия.— 2003. № 9. Т. 39.— С. 1027–1036.

12 **Федотов, Ю.А.** Сульфосодержащие ароматические полиамиды в качестве перспективных мембранных материалов [Текст] / Ю.А. Федотов, Ю.Э. Кирш // Мембраны. Критические технологии. — 2000. № 5.— С. 17.

УДК 621.001.5:331.01

А.Г. Ташевский

МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Редкими событиями можно считать быстро развивающиеся изменения больших масштабов, самопроизвольно возникающие в системе. Примером такого процесса может быть развитие трещины в твердом теле.

Из-за редкости событий условия их возникновения, сколь детерминированными они бы ни были, воспринимаются как крайне редкое сочетание маловероятных случайностей. Выделить «суть дела», «параметры порядка» оказывается очень сложно.

В теории обеспечения безопасности сложных технических систем было пройдено два больших этапа. На первом этапе предполагалось, что надлежащие инженерные решения, организационные меры, квалифицированные и дисциплинированные сотрудники могут обеспечить абсолютно надежное функционирование сколь угодно сложных технических или социально-технологических систем. Такой взгляд часто называют теорией абсолютной надежности.

Жизнь заставила скорректировать его. Начиная с определенного порога сложности приходится иметь дело с вероятностными характеристиками аварий и катастроф в природной и техногенной сфере. И до недавнего времени снижение соответствующих вероятностей рассматривалось как один из главных путей управления риском. Родился вероятностный подход к анализу надежности сложных технических систем. Его характерные трудности таковы. Во многих случаях приходится сталкиваться с редкими событиями и уникальными конструкциями, для которых корректно определить соответствующую вероятность очень трудно, поскольку, с одной стороны, нет достаточной статистики, чтобы опираться на опыт, а с другой, — нет теории, которая позволяла бы выводить эти величины исходя из первых принципов.

Традиционный подход теории надежности, связанный с построением дерева отказов, учитывает лишь простейшие взаимосвязи между элементами сложной системы, в то время как для сложных систем характерно взаимное влияние различных элементов, более сложные причинно-следственные связи. Кроме того, зачастую неудовлетворительным оказывается сам характер ответов, связанных с вероятностным анализом. Допустим, что надежность уникального объекта, от которого зависит наше существование, определяется как одна возможная авария на миллион лет. Удовлетворит ли нас такая информация? Знание только этой вероятности ничего не говорит о том, когда можно ждать наступления такого события: оно может произойти и завтра, и через тысячи лет. Этот парадокс сродни следующему. Вероятность того, что бесконечно тонкое острие иглы попадет в данную точку листа бумаги, равна нулю, но если мы бросаем иглу, то в какую-то точку она тем не менее попадет. Если авария произошла, естественно пересчитать те вероятности, на основе которых принимались решения о строительстве и эксплуатации объекта. Найти корректную процедуру для этой операции обычно оказывается нелегко.

Поскольку зачастую «слабым звеном» является человек, состояние сложной системы, ее безопасность сплошь и рядом нельзя оценивать без учета того, какие люди и в каких условиях работают в ней. Возникает проблема комплексной оценки риска в эргономико-технологических системах. Нелинейная динамика выявляет общие закономерности функционирования и развития сложных систем в природной, техногенной и социальной сферах. На ее основе удалось выделить многие важные универсальные закономерности в различных областях. Другими словами, анализ риска и безопасности предполагает сегодня междисциплинарный анализ, основой которого могут служить концепции, идеи и методы нелинейной динамики.

Исключительно важное значение как для нашей страны, так и для других промышленно развитых стран имеет достигнутый уровень проектного обоснования безопасности потенциально опасных объектов. Применительно к объектовым и локальным авариям для крупносерийных технических систем, в которых опасные повреждения возникают в нормальных условиях эксплуатации, уровень достоверности проектного обоснования безопасности и надежности составляет от 10 до 100 %. При этом большое значение имеют национальные и международные нормы проектирования, изготовления и эксплуатации, а также огромный и длительный опыт обеспечения безопасного функционирования этих систем.

Опасные и катастрофические разрушения крупно- и среднесерийных технических систем в условиях нормальной эксплуатации прогнозируются уже в существенно меньшей мере — от 1 до 10 %. Предварительный количественный анализ крупных аварийных ситуаций удается пока проводить в 0,1–1,0 % случаев. Конкретные техногенные катастрофы регионального и национального характера получают отражение в расчетах и прогнозах не более чем в 0,001–0,1 %. Глобальные катастрофы, как правило, не предсказываются.

При анализе безопасности сложных технических систем сформулированы аварийные ситуации трех основных видов: проектные, запроектные и гипотетические. Во многих технических системах их характеризуют такие параметры, как локальное напряжение σ и деформация ε, число циклов N, температура t и время τ эксплуатации. В зависимости от типа потенциально опасных объектов имеет место очень широкая вариация этих параметров ($100 < N < 1012$; -270 °C $< t < 10000$ °C; 100 с $< \tau <$ 80 лет).

Проектные аварийные ситуации, как правило, охватывают области накопления повреждений, описываемых классическими теориями сопротивления материалов — теориями упругости, пластичности и ползучести. Расчетные и экспериментально определяемые напряжения и деформации при этом остаются на уровне предела упругости. При переходе к запроектным авариям обычно анализируются нелинейные закономерности деформирования и разрушения; при этом напряжения становятся менее информативными параметрами, чем деформации. Повреждения от вибраций переходят в повреждения от малоцикловой усталости. Еще большее возрастание σ и ε обусловливает переход к гипотетическим авариям и катастрофам. При этом теоретической основой анализа таких ситуаций служит статическая и динамическая нелинейная механика разрушений.

Одним из примеров такого подхода к количественному анализу развития аварийных ситуаций может служить расчетно-экспериментальное обоснование безопасности атомной станции теплоснабжения АСТ-500, выполненное в ОКБМ МАЭ (г. Нижний Новгород) и ИМАШ РАН (г. Москва). В качестве барьеров выхода радиоактивности при тяжелой аварии рассмотрены корпус реактора, страховочный корпус и контаймент. Поэтому рассчитываемое и контролируемое развитие аварий с образованием и распространением трещин, с раскрытием главных болтовых разъемов дает не мгновенное катастрофическое разрушение, а монотонно нарастающие (в течение часов) давление, температуру и утечки. В этом случае могут быть применены системы аварийной защиты, меры локализации аварии и механизмы управления чрезвычайной ситуацией. По такому пути предстоит идти во многих других потенциально опасных ситуациях.

Высокая цена ошибочных решений при прогнозировании явлений техногенной природы и эксплуатационных процессов предъявляет свои требования к совершенствованию математического аппарата, методам моделирования редких событий и экстремальных значений случайных величин. Наиболее распространенной моделью редких событий является распределение Пуассона

$$P_n = P\{r = n\} = \frac{V^n e^{-v}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (1)$$

Но довольно часто приходится сталкиваться с редкими событиями реального мира, которые не могут быть строго и точно предсказаны с помощью закона Пуассона. Роль и универсальность этого закона в литературе, ориентированной на решение прикладных задач, оказалась, к сожалению, преувеличенной. Дадим краткое описание некоторых типов распределений редких событий, которые обладаюют определенной

степенью универсальности (в рамках схематизации стохастического эксперимента) и допускают содержательную модификацию, учитывающую специфику приложений в области экономических проблем. Общее в формировании таких моделей — это рандомизация параметра закона Пуассона и использование аппарата производящих функций (ПФ).

Рассмотрим некоторые обобщения (модификации) пуассоновского распределения. Пусть параметр v пуассоновского распределения сам является случайной величиной с математическим ожиданием m, дисперсией σ^2 и распределением по нормальному закону. Для решения такого род задач целесообразно воспользоваться аппаратом производящих функций.

Если случайная величина r принимает только целые неотрицательные значения, то производящей функцией распределения называется функция комплексного переменного t вида

$$f_r(t) = E\left[t^r\right] = \sum_{n=0}^{\infty} t^n p_n(r=n),$$

где $|t| \le 1$.

Перечислим важнейшие и вполне очевидные свойства производящих функций:

1. Если $P\{n<0\}=1$, то $f_r(t)=1$.

2. Если $E|n|^k < \infty$ для некоторого целого $k \ge 1$, то $\frac{d^k}{dt^k} f_r(t)\Big|_{t=1} = E\left[r^k\right]$.

3. Если случайные величины $r_1, r_2, \ldots r_n$ независимы, то $f_{r_{1+r_2+r_n}}(t) = f_{r_1}(t) f_{r_2}(t) \ldots f_{r_n}(t)$.

4. Если производящие функции распределений случайных величин r_1 и r_2 совпадают, то совпадают и функции распределения r_1 и r_2.

По производящей функции распределение восстанавливается однозначно согласно формуле

$$P_n = \frac{1}{n!} f_r^{(n)}(0).$$

Обратимся снова к задаче рандомизации параметра v пуассоновского распределения.

Производящая функция распределения Пуассона имеет вид

$$f(t) = e^{v(t-1)}. \qquad (2)$$

Математическое ожидание ПФ $\overline{f}(t)$ определяется в результате осреднения:

$$E\left[f(t)\right] = \overline{f}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{v(t-1)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{(m-v)^2}{2\sigma^2}} dv. \qquad (3)$$

Нижний предел интеграла (3) предполагает справедливость условия $\sigma \ll m$ практически (то есть $m > 3\sigma$). Сводя интеграл (3) к интегралу Пуассона, находим

$$\overline{f}(x) = e^{m(1-t)+\frac{\sigma^2}{2}(t-1)^2}. \qquad (4)$$

По вновь полученной ПФ (4) сложнопуассоновское распределение определяется однозначно по формуле

$$P_n = \frac{1}{n!} \overline{f}^{(n)}(t)\Big|_{t=0}.$$

Так, например, последовательно дифференцируя и приравнивая $t=0$, находим

$$P_0 = e^{-m+\frac{\sigma^2}{2}};$$

$$P_1 = P_0 c;$$

$$P_2 = P_0\left(c^2+\sigma^2\right)\frac{1}{2};$$

$$P_3 = P_0\left(c^3+3c\sigma^2\right)\frac{1}{6};$$

$$P_4 = P_0\left(c^4+6c^2\sigma^2+3\sigma^4\right)\frac{1}{24};$$

$$P_5 = P_0\left(c^5+10c^3\sigma^2+15c\sigma^4\right)\frac{1}{120};$$

$$P_6 = P_0\left(c^5+15c^4\sigma^2+45c^2\sigma^4+15\sigma^6\right)\frac{1}{720};$$

$$P_7 = P_0\left(c^7+21c^5\sigma^2+105c^3\sigma^4+105\sigma^6\right)\frac{1}{5040};$$

.....

$$P_{12} = P_0\left(c^{12}+66c^{10}\sigma^2+1485c^8\sigma^4+13860\sigma^6+\right.$$

$$\left.+51975c^4\sigma^8+62370c^2\sigma^{10}+10395\sigma^{12}\right)\frac{1}{4{,}79\cdot 10^8},$$

где $c = \left(m-\sigma^2\right)$.

Методология решения задачи и основные расчетные зависимости

Анализ экстремальных величин редких событий играет важную роль при изучении эксплуатационных процессов (явлений) и при решении прикладных задач промышленного мониторинга. Классическая теория экстремальных распределений в основном имеет дело со свойствами распределения n независимых и одинаково распределенных случайных величин и базируется на так называемом «постулате устойчивости», согласно которому распределение наибольшей величины должно быть равно исходному распределению с точностью до линейного преобразования.

Асимптотическое поведение наибольшего наблюдения в выборке объема n из распределения $F(x)$ составляет задачу классической теории экстремальных значений. Центральный результат этой теории (теорема о трех типах предельных распределений) впервые был получен Фишером и Типпетом (1928) и позднее был доказан в полной общности Б.В. Гнеденко (1943). Однако здесь необходимо отметить некоторые специфические ограничения асимптотических теорий экстремальных величин. Прежде всего, все предельные распределения экстремальных значений выводятся либо из точного исходного распределения, либо из распределения некоторого типа. Так, например, исходное распределение, из которого выбираются экстремальные значения, должно принадлежать к одному из распределений следующих типов:

$$f(x) = \exp\left(e^{-x}\right) \text{ при } x \in (-\infty, \infty);$$

$$f(x) = \begin{cases} \exp\left(-x^{-a}\right) & \text{при } x > 0, a > 0, \\ 0 \text{ при} & x \le 0; \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} \exp\left(-x^{-a}\right) & \text{при } a > 0, x > 0, \\ 0 \text{ при} & x > 0. \end{cases}$$

В действительности аналитические свойства исходного распределения редко известны, следовательно, условия использования асимптотической теории экстремальных значений и постулата устойчивости не всегда соответствуют наблюдениям и практическим приложениям.

Это приводит к необходимости использовать принцип максимума неопределенности для выявления механизма формирования необходимых экстремальных величин. Неопределенность исхода стохастического эксперимента обусловливает необходимость ее количественного описания и введения меры неопределенности. В качестве наиболее общей меры неопределенности распределения вероятностей случайной величины целесообразно использовать энтропию Шеннона. При выборе модели экстремальных величин предполагают, как правило, использовать неполную (ограниченную) информацию о схеме (механизме) формирования наблюдаемых случайных величин. Незнание законов распределения случайных величин не исключает возможности их выбора из множества допустимых на основе использования меры неопределенности.

Достаточным основанием для такого выбора являются следующие соображения. Приписывая случайной величине некоторые распределения, имеющие ряд свойств, совпадающих со свойствами действительного (неизвестного) распределения, мы совершаем по необходимости некоторый произвол: выбор одного из множества рассматриваемых распределений однозначно определяет и те характеристики, которые по условию неизвестны. Очевидно, что предпочтение надо отдать тому из рассматриваемых распределений, которое добавляет минимум информации к уже имеющейся. Другими словами, в процессе выбора модели должна оставаться максимальная неопределенность при учете заданных ограничений. Эта концепция, известная под названием принципа неопределенности (максимум энтропии, принцип Джейнса и др.), предписывает выбирать из множества характеризующихся заданными свойствами распределений, удовлетворяющих данной системе ограничений, накладываемых на случайную величину, то, которое обладает наибольшей мерой неопределенности (наибольшей энтропией). Учитывая, что многие задачи вероятностного анализа экономической информации могут быть сформулированы в терминах порядковых статистик и связаны с изучением экстремальных значений, целесообразно распределение экстремальных случайных величин формировать на основе решения соответствующего класса вариационных задач.

Процедура построения модели экстремальных величин на основе принципа максимума неопределенности представлена в работе [8].

Дифференциальное уравнение, определяющее функцию $F_n(x)$ распределения наибольшего значения случайной величины из выборки объема n, имеет следующий вид:

$$n\sigma^2\left[F_n(x)\right]\frac{n-1}{n}\bar{F}_n(x)+(x-m)\bar{F}_n(x)=0, \quad (6)$$

где m и σ^2 — соответственно математическое ожидание и дисперсия генеральной совокупности случайных величин.

Нелинейное дифференциальное уравнение (6) удовлетворяет естественным краевым условиям

$$F_n(-\infty)=0, \qquad F_n(\infty)=1.$$

Ему соответствует функция $F(x)$ распределения исходной случайной величины, определяемая в результате решения следующего дифференциального уравнения с теми же краевыми условиями:

$$n\sigma^2\bar{F}(x)\left[F(x)\right]^{n-1}+$$
$$+n\sigma^2(n-1)\left[\bar{F}(x)\right]^2\left[F(x)\right]^{n-2}+$$
$$+\bar{F}(x)(x=m)=0. \quad (7)$$

Эти уравнения неразрешимы в квадратурах при $n\neq 1$. При $n = 1$ уравнениям (6) и (7) удовлетворяет функция нормального распределения с параметрами m и σ^2. При практически больших значениях аргумента ($x > 3\sigma$) функция распределения $F_n(x)$ асимптотически приближается к функции гауссова распределения с параметрами (m, $n\sigma^2$) Это обстоятельство послужило основанием назвать гипернормальным введенный в рассмотрение экстремальный закон распределения наибольшего значения из совокупности n случайных величин.

Дифференциальное уравнение (6), определяющее функцию $F_n(x)$ распределения наибольшего значения, является уравнением Эйлера — Лагранжа для следующей экстремальной задачи:

$$H_\alpha=-\int_{-\infty}^{\infty} f_n(x)\ln f_n(x)dx\to\max; \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_n(x)dx=1; \quad (9)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx=1; \quad (10)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x f(x)dx=m; \quad (11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f(x)dx=\sigma^2; \quad (12)$$

$$F_n(x)=F^n(x). \quad (13)$$

Гипернормальное распределение — это распределение крайней порядковой статистики (ранга n), максимизирующее энтропию при тех же условиях, при которых ее максимизирует нормальный закон распределения. Такая интерпретация рассматриваемых экстремальных (нормального и гипернормального) распределений позволяет четко разграничить условия их применения. В компактной форме эти условия представлены в табл. 1. Можно утверждать, что с ситуациями, представленными в этой таблице, мы в процессе эксплуатации сложных технических систем встречаемся часто. Действительно, при решении ряда задач едва ли можно надеяться на полноту исходной информации, обеспечивающую возможность оценки третьего и более высоких моментов распределения. Кроме того, для многих случайных величин соотношение между средними и среднеквадратическими отклонениями таково, что область возможных значений случайной величины можно считать практически неограниченной. Следует также заметить, что многие задачи оценки и прогноза техногенных и эксплуатационных ситуаций и процессов могут быть связаны с изучением экстремальных значений.

Значения функций гипернормального распределения для некоторых целочисленных параметров n, полученные в результате решения нелинейной краевой задачи (6), приведены в табл. 2.

Вычисление функций $F_n(x)$ произведено для стандартных условий ($m = 0$, $\sigma = 0$).

При больших n (более 10) дифференциальное уравнение (6) можно заменить приближенным и найти аналитическое решение в форме квантильной функции.

Для стандартных условий ($m = 0$, $\sigma = 1$) дифференциальное уравнение (6) при $n\to\infty$ может быть представлено в виде

Таблица 1

Условия применения экстремальных распределений

Нормальный закон распределения	Гипернормальный закон распределения
1. Истинный закон распределения случайной величины неизвестен	1. Истинный закон распределения случайной величины неизвестен
2. Область возможных значений случайной величины практически неограниченна	2. Область возможных значений случайной величины практически неограниченна
3. Заданы среднее значение и дисперсия случайной величины	3. Заданы среднее значение и дисперсия случайной величины
4. Вероятностный эксперимент предполагает использование выборки конечного объема (последовательности независимых одинаково распределенных неупорядоченных случайных величин)	4. Вероятностный эксперимент предполагает использование упорядоченной по величине последовательности независимых одинаково распределенных случайных величин)

Таблица 2

Значения функции гипернормального распределения

x	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$F_3(x)$	$F_4(x)$	$F_5(x)$	$F_6(x)$	$F_7(x)$	$F_8(x)$	$F_9(x)$	$F_{10}(x)$
–2,0	0,0228	0,0005	–	–	–	–	–	–	–	–
–1,8	0,0360	0,0009	–	–	–	–	–	–	–	–
–1,6	0,0543	0,0063	–	–	–	–	–	–	–	–
–1,4	0,0803	0,0181	0,0005	0,0003	0,0002	–	–	–	–	–
–1,2	0,1151	0,0339	0,0017	0,0006	0,0013	0,0001	0,0002	0,0005	0,0003	0,0002
–1,0	0,1587	0,0641	0,0083	0,0018	0,0017	0,0030	0,0025	0,0058	0,0048	0,0046
–0,8	0,2119	0,1090	0,0402	0,0225	0,0197	0,0244	0,0244	0,0311	0,0310	0,0308
–0,6	0,2743	0,1664	0,0923	0,0691	0,0635	0,0672	0,0670	0,0708	0,0708	0,0707
–0,4	0,3446	0,2329	0,1561	0,1285	0,1191	0,1197	0,1169	0,1169	0,1162	0,1160
–0,2	0,4207	0,3053	0,2264	0,1935	0,1800	0,1768	0,1683	0,1660	0,1634	0,1632
0,0	0,5000	0,3804	0,2993	0,2612	0,2431	0,2355	0,2210	0,2162	0,2116	0,2114
0,2	0,5722	0,4555	0,3723	0,3289	0,3062	0,2943	0,2737	0,2665	0,2598	0,2596
0,4	0,6554	0,5285	0,4435	0,3951	0,3681	0,3521	0,3256	0,3161	0,3074	0,3072
0,6	0,7257	0,5967	0,5115	0,4589	0,4278	0,4061	0,3762	0,3644	0,3539	0,3537
0,8	0,7881	0,6615	0,5754	0,5191	0,4847	0,4617	0,4250	0,4113	0,3990	0,3988
1,0	0,8415	0,7195	0,6346	0,5756	0,5385	0,5128	0,4718	0,4563	0,4425	0,4423
1,2	0,8848	0,7710	0,6886	0,6280	0,5889	0,5609	0,5164	0,4994	0,4842	0,4841
1,4	0,9191	0,8160	0,7375	0,6761	0,6357	0,5060	0,5587	0,5404	0,5240	0,5239
1,6	0,9451	0,8545	0,7810	0,7199	0,6789	0,6482	0,5986	0,5792	0,5619	0,5618
1,8	0,9640	0,8869	0,8194	0,7595	0,7185	0,6878	0,6361	0,6159	0,5979	0,5911
2,0	0,9771	0,9137	0,8529	0,7949	0,7546	0,7229	0,6711	0,6504	0,6318	0,6317
2,2	0,9860	0,9354	0,8817	0,8263	0,7972	0,7557	0,7038	0,6827	0,6637	0,6636
2,4	0,9917	0,9527	0,9063	0,8540	0,8165	0,7857	0,7341	0,7128	0,6937	0,6936
2,6	0,9952	0,9662	0,9271	0,8782	0,8427	0,8129	0,7621	0,7409	0,7217	0,7216
2,8	0,9973	0,9766	0,9444	0,8992	0,8660	0,8374	0,7878	0,7669	0,7478	0,7477
3,0	0,9985	0,9844	0,9586	0,9172	0,8865	0,8594	0,8115	0,7909	0,7721	0,7720
3,2	0,9991	0,9902	0,9702	0,9328	0,9044	0,8790	0,8331	0,8131	0,7946	0,7946

$$nF_n(x)\bar{F}_n(x)+x\bar{F}_n(x)=0.$$

Его решение позволяет получить функции квантилей предельного гипернормального распределения

$$x_p=\sqrt{2n}\sqrt{-\mathrm{Ei}(\ln P)},$$

$$x_p=n+\sigma\sqrt{2n}\sqrt{-\mathrm{Ei}(\ln P)}, \qquad (14)$$

где $\mathrm{Ei}(\ln P)$ — интегральная показательная функция.

Таким образом, функция квантилей гипернормального распределения асимптотически приближается к функции (14). Это свойство рассмотренных экстремальных распределений позволяет по ограниченной информации описать и прогнозировать с определенным уровнем доверия P экстремальные характеристики и строить математические модели «сверхредких» событий.

В том случае, когда в результате статистического обследования ситуации выявлена лишь информация о среднем значении показателя, экстремальное распределение максимального значения параметра определяется решением дифференциального уравнения

$$mn\left(G(n)\right)^{\frac{n-1}{n}}\bar{G}_n(x)+\bar{G}_n(x)=0 \qquad (15)$$

при граничных условиях

$$G_n(0)=0, \quad G_n(\infty)=1.$$

Справедливость этого положения вытекает из следующего утверждения.

Пусть X — случайная величина с плотностью $g(x)>0$, $x\in(0,\infty)$; $G_n(x)$ — функция распределения максимального значения из совокупности, определяемой случайной величиной X. Пусть далее известно математическое ожидание случайной величины X

$$m=\int_0^\infty xg(x)dx.$$

Тогда максимум энтропии достигается на распределении, которое удовлетворяет дифференциальному уравнению (15) с функцией квантилей

$$x_p=mpF\left(1,m,n+1,\sqrt[n]{p}\right). \qquad (16)$$

Дифференциальное уравнение (15) является уравнением Эйлера — Лагранжа для следующей вариационной задачи:

$$H_\varepsilon=-\int_0^\infty \bar{G}_n(x)\ln\bar{G}_n\,dx\to\max;$$

$$\int_0^\infty \bar{G}_n(x)dx=1;$$

$$\int_0^\infty xg(x)dx=m;$$

$$G_n(x)=\left[\int_0^x g(x)dx\right]^n.$$

Формальное интегрирование уравнения Эйлера — Лагранжа при $n=1$ дает экспоненциальный закон распределения, а при $n\neq 1$ приводит к зависимости вида

$$x=\int_0^{G_n}\frac{dG_n}{vG_n^{\frac{1}{n}}+\bar{C}_n(0)}. \qquad (18)$$

Используя подстановку $z=G_n^{\frac{1}{n}}$, интеграл (18) можно преобразовать к табличному:

$$\int_0^u x^{\mu-1}(1+\beta x)^{-v}dx=\frac{u}{\mu^2}F(v,\mu,1+\mu,-\beta u),$$

где $F(\alpha,\beta,\gamma,S)$ — гипергеометрическая формула Гаусса.

Подстановка значения множителя Лагранжа в дифференциальное уравнение (18) позволяет убедиться в справедливости дифференциального уравнения (15) и функции квантилей (16).

Таким образом, показано, что многие задачи оценки и прогноза техногенных и эксплуатационных ситуаций и процессов могут быть связаны с изучением экстремальных значений.

Свойство рассмотренных экстремальных распределений позволяет по ограниченной информации описать и прогнозировать с определенным уровнем доверия P экстремальные характеристики и строить математические модели «сверхредких» событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ташевский, А.Г.** Метод оценки надежности сложных изделий энергомашиностроения при ограниченном числе испытаний [Текст] / А.Г. Ташевский // Труды Санкт-Петербургского института машиностроения. Вып. 2.— СПб., 1996.— 96 с.

2. **Ташевский, А.Г.** Подтверждение ТТХ сложных систем по малому числу испытаний [Текст] / А.Г. Ташевский, Л.А. Мартыщенко, В.И. Немчинов.— Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1985.— 48 с.

3. **Ташевский, А.Г.** Моделирование редких событий при прогнозировании эксплуатационных процессов в сложных системах машиностроения [Текст] / А.Г. Ташевский // Инструмент и технологии.— 2011. № 32, вып. 2.— С. 22–23.

4. **Ташевский, А.Г.** Корректировка математических моделей сложных технических систем по результатам комплексных испытаний [Текст] / А.Г. Ташевский, Л.А. Мартыщенко.— Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1990.— 60 с.

5. **Мартыщенко, Л.А.** Теоретико-информационные и статистические методы формирования систем исходных данных в военно-научных исследованиях [Текст] / Л.А. Мартыщенко, А.Г. Ташевский. Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1991.— 48 с.

6. **Мартыщенко, Л.А.** Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем [Текст] / Мартыщенко Л.А. [и др.].— СПб.: Лань, 1997.

7. **Ташевский, А.Г.** Конструирование узлов трения в объектах машиностроения [Текст] / А.Г. Ташевский, В.Н. Смелов.— СПб.: Изд-во Институт машиностроения, 2008.— 132 с.

8. **Ташевский, А.Г.** Эргономические аспекты сложных технологических систем машиностроения [Текст] / А.Г. Ташевский // Инструмент и технологии.— 2010, №29, вып. 3.— С. 118–124.

9. **Мартыщенко, Л.А.** Экстремальные распределения экстремальных случайных величин [Текст] / Л.А. Мартыщенко.— Л.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1989.— 62 с.

УДК 615.47

А.Е. Иванов, А.Д. Юхнев,
К.Ю. Сенчик, Ф.Г. Ушаков

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПЕРЕНОСНОГО МЕХАТРОННОГО КАРДИОКОМПРЕССОРА ДЛЯ ЗАКРЫТОГО МАССАЖА СЕРДЦА

Осуществление процедуры ручной компрессии грудной клетки сегодня является стандартом оказания первой помощи при остановке сердца, происходящей в виде асистолии или фибрилляции желудочков. Эта процедура применяется с конца шестидесятых годов XX-го века в комплексе мероприятий сердечно-легочной реанимации (СЛР) [1, 4].

Тем не менее проведение «закрытого массажа сердца» во внегоспитальных условиях приводит к сохранению жизни только у незначительного процента больных и пострадавших (не более 5 % [2]), что в основном объясняется невозможностью осуществления эффективной компрессии грудной клетки за счет физических усилий реаниматора на протяжении длительного отрезка времени [3].

В настоящее время в мировой практике для оптимизации процесса СЛР разработаны и используются механические (с электрическим или пневматическим приводом) устройства, заменяющие человека при проведении ручных манипуляций — кардиокомпрессоры (КК).

Передовые разработки в этой области на сегодняшний день — это устройства «ZOLL AutoPulse» и «LUCAS». КК «AutoPulse» сжимает грудную клетку пневматическим способом с использованием бандажного пояса, охватывающего грудную клетку, в то время как в системе «LUCAS» используется альтернативный способ, называемый активной компрессией/декомпрессией (ACD-CPR). При применении данного подхода к осуществлению СЛР устройство за счет плотного прилегания к груди гибкой полусферы и разрежения воздуха под ней осуществляет активное расправление грудной клетки, тем самым снижая внутригрудное давление и улучшая венозный приток к сердцу.

Основной недостаток подобных систем — отсутствие средств контроля эффективности компрессии грудной клетки и оценки состояния пациента. Для повышения эффективности процедуры СЛР предлагается использовать мехатронное устройство, способное не только осуществлять компрессию и декомпрессию грудной клетки с заданными параметрами (как существующие КК), но и автоматически управлять параметрами компрессии на основе данных о физиологических показателях кровообращения пациента.

Предлагаемый подход предполагает создание универсального мехатронного наружного кардиокомпрессора (МНК), способного функционировать в нескольких режимах работы, различающихся степенью автоматизации процесса выполнения СЛР.

В первом режиме работы МНК, условно называемом «поддержкой», осуществляется наружный массаж сердца с целью обеспечения перфузии органов пациента-донора при констатированной остановке кровообращения и смерти мозга для последующей их аппаратной реабилитации и трансплантации. В этом случае параметры компрессии, а именно частота выполнения циклов компрессии — декомпрессии и глубина компрессии (длина хода штока исполнительного устройства), фиксированы и не изменяются во время работы.

В период времени (начиная с момента констатации смерти потенциального донора), необходимый трансплантационной команде для прибытия на место и оформление официальных заключений, органы (печень, почки, сердце) получают необратимые повреждения из-за недостатка кислорода и накопления продуктов метаболизма. Существуют объективные предпосылки к тому, что применение МНК в данном случае позволит сохранить жизнеспособность донорских органов. Стоит отметить, что идея применения КК для поддержания жизнедея-

тельности донорских органов — новаторская и ранее в мировой практике не применялась.

В «обычном» режиме работы МНК производит процедуру СЛР с заданными параметрами компрессии. Отличительной особенностью данного режима является то, что, несмотря на сбор информации о состоянии пациента в полном объеме, она носит исключительно информационный характер, в то время как параметры компрессии (глубина и частота компрессии) задаются оператором. Автоматической адаптации параметров не производится. Несмотря на копирование в данном режиме возможностей существующих КК, предполагается, что эффективность выполнения реанимации будет выше благодаря снабжению медицинского персонала информацией о состоянии пациента. Для вывода записанных данных можно использовать информационный жидкокристаллический экран пульта управления кардиокомпрессора либо же персональный компьютер, подключенный к интерфейсному порту МНК.

Предусматривается несколько режимов компрессии: полностью непрерывный; с паузой для осуществления процесса вентиляции легких с помощью мешка Амбу или искусственного дыхания «рот в рот» (с возможностью выбора периодичности остановок — 30 компрессий, затем пауза на 3–4 секунды, либо же 15 компрессий, затем пауза).

Наконец, в «адаптивном» режиме работы МНК автоматически производит изменение и адаптацию параметров компрессии для достижения максимальных значений артериального давления крови пациента по показаниям неинвазивного датчика артериального давления. За счет этого происходит лучшее удаление продуктов распада из тканей организма, прежде всего головного мозга, и более интенсивное снабжение его кислородом, что в результате приводит к повышению эффективности процедуры СЛР. В «адаптивном» режиме оператор не имеет возможности вручную менять параметры компрессии, они устанавливаются только системой управления МНК на основе показаний сенсорной системы.

Вышеупомянутая сенсорная система МНК включает в себя две петли обратной связи, в том числе с организмом пациента. Тензометрический датчик силы, размещенный в оконечном элементе штока, и оптический датчик положения составляют первую петлю обратной связи, контролирующую параметры компрессии — частоту компрессии (в диапазоне 40–120 комп./мин.) и длину хода штока исполнительного устройства (до 100 мм) при развиваемом усилии сжатия грудной клетки до 500 Н.

Вторую петлю обратной связи образуют модуль неинвазивного измерения (то есть без нарушения целостности сосудов) артериального давления (НИАД) пациента и пульсоксиметрический датчик, служащий для измерения насыщения гемоглобина крови кислородом и определения частоты пульса по пику насыщения с помощью сенсора, закрепляемого на пальце или на мочке ушной раковины пациента.

Модуль НИАД управляется командами системы управления МНК и не требует участия человека в процессе измерения, за исключением необходимости закрепить измерительную манжету на предплечье пациента.

Использование подобной комплексной системы очувствления позволяет минимизировать травматичность работы кардиокомпрессора. В частности, анализ показаний тензометрического датчика позволяет снизить вероятность повреждения костной структуры грудной клетки пациента (перелом ребер — достаточно распространенная ситуация при выполнении ручного массажа сердца).

Кроме того, наличие пульсоксиметрического датчика позволяет кардиокомпрессору фиксировать момент возникновения собственного пульса у пациента и извещать медицинский персонал о факте успешного выполнения процедуры сердечно-легочной реанимации.

В противоположном случае по истечении двух часов функционирования МНК медицинский персонал будет информирован (сообщением на информационном дисплее) о необходимости проведения исследования и оценки для подтверждения жизнеспособности головного мозга пациента. Если смерть мозга пациента констатирована, оператор может остановить работу МНК или же отдать команду на продолжение работы в режиме «поддержка» для сохранения внутренних органов потенциального асистолического донора.

Предлагаемый мехатронный кардиокомпрессор включает в себя (рис. 1):

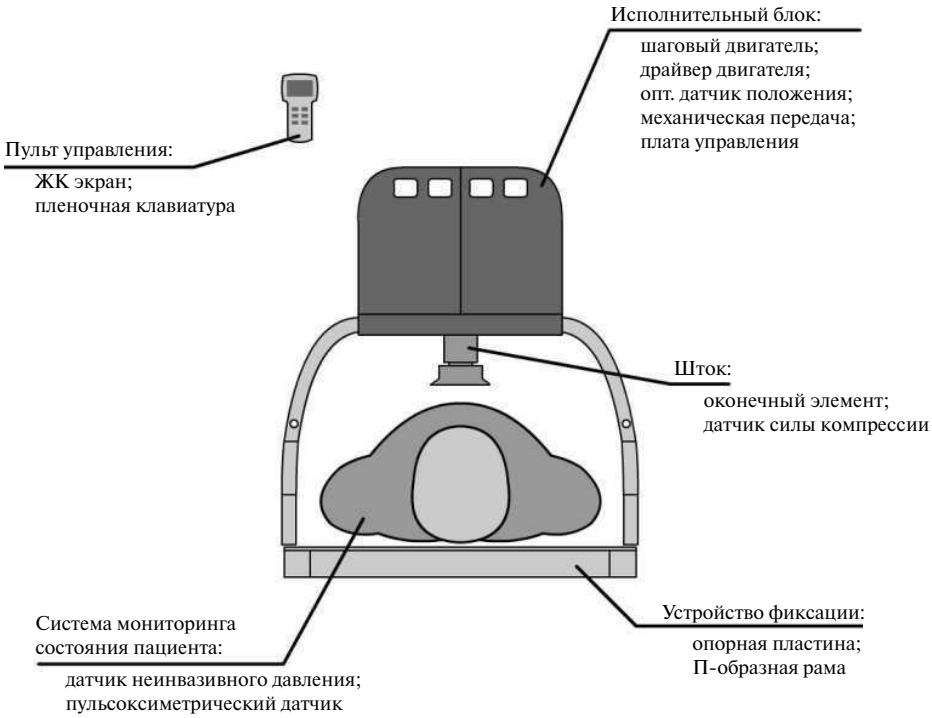


Рис. 1. Состав мехатронного кардиокомпрессора

устройство фиксации пациента внутри МНК, состоящее из опорной пластины и П-образной складной рамы, на которой установлен исполнительный блок устройства;

исполнительный блок МНК, имеющий в своем составе шаговый двигатель, контроллер управления двигателем, механизм преобразования вращательного движения двигателя в поступательное движение штока (шарико-винтовая передача и зубчатый ремень), оптический датчик положения хода штока и плату управления;

оконечный элемент штока, обеспечивающий не вызывающее травм нажатие штока на грудную клетку на стадии компрессии и сохраняющий силовое взаимодействие с грудной клеткой на стадии декомпрессии, с размещенным на нем тензометрическим датчиком силы;

систему мониторинга состояния пациента, включающую в себя датчик неинвазивного измерения давления и пульсоксиметрический датчик;

выносной пульт управления МНК, оснащенный жидкокристаллическим экраном и клавиатурным блоком.

Описанная конструкция мехатронного кардиокомпрессора, состав сенсорных систем и алгоритмическая логика его работы позволяют реализовать высокоэффективное многофункциональное устройство для проведения процедуры СЛР, превосходящее по своим характеристикам имеющиеся образцы КК.

Предложенная концепция кардиокомпрессора воплощена в виде экспериментального образца МНК, который был подвергнут испытаниям на гидродинамическом стенде (рис. 2), имитирующем жесткость ребер грудной клетки, работу левого желудочка сердца и системы кровообращения пациента, с целью определения характеристик, обеспечиваемых конструкцией МНК.

Было установлено: МНК может создать минутный расход крови до 30 % от минутного расхода здорового взрослого человека в состоянии покоя организма, что соответствует рекомендациям по проведению сердечно-легочной реанимации (рис. 3)

Стоит заметить, что высокой перспективностью обладает возможность наделения МНК такими свойствами, как портативность. Использование МНК в полевых условиях (например,

во время техногенных и природных катастроф, террористических актов), при перевозке пациентов в машинах или вертолетах скорой помощи позволит существенно повысить качество оказания первой помощи.

Для реализации этих свойств необходимо снизить массогабаритные показатели устройства (на данный момент вес экспериментального образца МНК — 18 кг) за счет более плотной компоновки элементов и использования материалов, обладающих сравнительно меньшим весом (алюминиевые сплавы, композитные пластики), предусмотреть возможность разборки или складывания элементов рамы устройства фиксации. Дополнительно следует заменить опорную пластину на более компактный разборный вариант и предусмотреть возможность быстрого крепления МНК к каркасу жестких медицинских носилок. Необходимо также добавить возможность питания МНК от аккумуляторных батарей или бортовой сети транспортного средства.

Кроме того, имеется возможность дальнейшего повышения адаптивности МНК к индивидуальным анатомическим особенностям разных пациентов, отличающихся друг от друга не только размерами грудной клетки, но и анатомическими особенностями скелета.

Для этого в конструкцию МНК могут быть внесены следующие изменения: на опорной пластине в зоне, на которую опирается плечелопаточная область спины пациента в положении лежа, размещается дополнительный поддерживающий элемент, а в конструкцию корпуса КК в зонах сопряжения опорной пластины и П-образной рамы вводятся элементы, позволяющие наклонить приводной модуль так, чтобы направление хода штока совпадало с направлением смещения опорной зоны грудины.

При этом дополнительная адаптация устройства к разным пациентам обеспечивается за счет возможности смещения и фиксации поддерживающего элемента на опорной пластине вдоль позвоночника, осуществления регулировки высоты поддерживающего элемента, изменения наклона непосредственно соприкасающейся со спиной пациента контактной площадки. Предусматривается также возможность изменения наклона приводного модуля в вертикальной плоскости для совмещения направления хода штока и смещения грудины в соответствии с анатомическими особенностями деформации грудной клетки пациента под действием силы сжатия при выполнения непрямого массажа сердца.

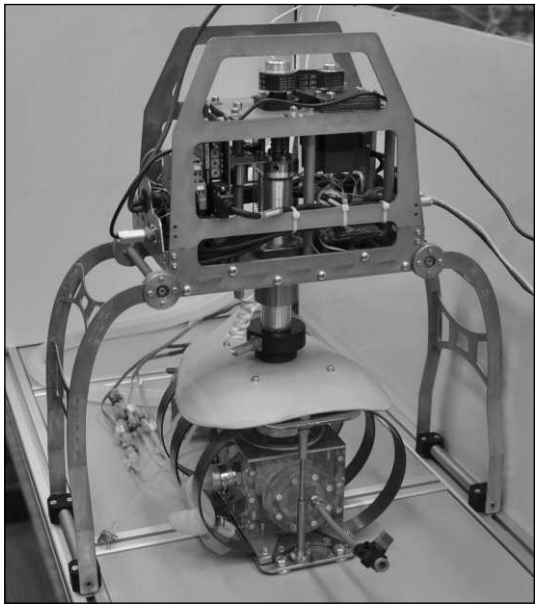


Рис. 2. Экспериментальный образец мехатронного кардиокомпрессора на испытательном стенде

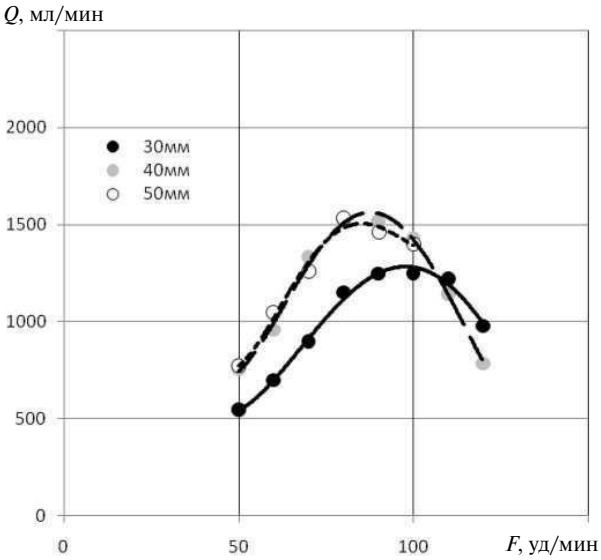


Рис. 3. Зависимость минутного расхода крови от частоты компрессии в случае работе МНК при глубине компрессий 30–50 мм и среднем артериальном давлении 80 мм рт. ст.

Статья подготовлена в ходе работ по государственному контракту от 25 февраля 2011 г. № 16.512.11.2122 с Минобрнауки России на выполнение НИР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kouwenhoven, W.B.** Closed-chest cardiac massage [Текст] / W.B. Kouwenhoven, J.R. Jude, G.G. Knickerbocker // J. Am Med Assoc.— 1960. Vol. 173.— P. 1064–1067.

2. **Plaisance, P.** A comparison of standard cardiopulmonary resuscitation and active compression/decompression resuscitation for out-of-hospital cardiac arrest [Текст] / P. Plaisance, K.G. Lurie, E. Vicaut [et al.] //N. Engl. J. Med.— 1999. Vol. 341.— P. 569–575.

3. **Hightower, D.** Decay in quality of closed-chest compressions over time [Текст] / D. Hightower, S.H. Thomas, C.K. Stone [et al.] //Ann Emerg Med.— 1995. Vol. 26. P. 300–303.

4. **Cooper, J.A.** Cardiopulmonary Resuscitation. History, Current Practice and Future Direction [Текст] / J.A. Cooper, J.D. Cooper, J.M. Cooper // Contemporary Reviews in Cardiovascular Medicine. Circulation.— 2006. Vol. 114.— P. 2839–2849.

УДК 628.161

Ю.А. Феофанов, М.С. Ряховский

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ СОРБЕНТОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАГРУЗКИ ФИЛЬТРА

Сорбционные фильтры служат одним из основных средств обезвреживания и очистки природных вод от растворенных органических примесей техногенного происхождения. Одним из путей повышения эффективности работы сорбционных фильтров может быть использование комплексной загрузки (КЗ) в виде многих слоев из макро- и микропористых активированных углей (АУ) или сорбентов различных марок [1].

Необходимость проведения исследований вызвана отсутствием данных о рабочих параметрах и эффективности применения комплексных загрузок из АУ различных марок. Цель нашей работы — выбор состава КЗ фильтра из АУ различных марок.

Материал и методы исследования

В экспериментах используются АУ следующих марок: БАУ-А (размер гранул – 0,5–1,0 мм; пористость микропор — 0,22 см^3/г, мезопор — 0,10 см^3/г, макропор — 1,22 см^3/г; общая внутренняя поверхность по БЭТ — 790 м^2/г); МАУ-2А (размер гранул — 1,0–2,8 мм; пористость микропор — 0,40 см^3/г, мезопор — 0,08 см^3/г, макропор — 0,30 см^3/г; общая внутренняя поверхность по БЭТ — 800 м^2/г); а также КЗ, сформированная послойно. В виду разницы насыпных плотностей и структуры гранул (частиц) выбранных АУ нижний слой в фильтре сформирован из МАУ-2А, верхний — из БАУ-А.

Основные растворенные органические примеси (РОП) техногенного происхождения в водах поверхностных водоемов — это наиболее распространенные РОП антропогенного происхождения — нефтепродукты и соединения фенольной группы. Учитывая неоднородность пор выбранных АУ, нефтепродукты (усредненный размер молекул — 1,8 нм) должны улавливаться на верхнем слое, а фенолы (0,71 нм) — на нижнем слое; за счет этого адсорбционная емкость загрузки увеличится. При создании модельного раствора применены: легкое моторное масло (ориентировочно M_r = 300–600 а.е.м.), гидрохинон (ориентировочно M_r = 110 а.е.м.). Основа модельного раствора — дистиллированная вода, использование которой позволяет исключить влияние общего железа и других примесей, содержащихся в водопроводной воде, на результаты эксперимента. Оптимальная среда для адсорбции большинства РОП антропогенного происхождения имеет pH = 5–7, модельный раствор — pH = 5,5–6,6 (речная вода до коагуляции — pH = 6,5–8,5).

Анализы проб исходной и очищенной воды выполнены в специализированной лаборатории по стандартным методикам с применением концентратомеров КН-2 и КН-2М и спектрофотометра Юнико-1201.

Для проведения экспериментов разработана установка (рис. 1).

Начальная концентрация нефтепродуктов в модельном растворе составляет 0,2–0,38 мг/дм^3, фенолов — 0,09–0,31 мг/дм^3. Объем загрузки в фильтрах равен 0,66 дм^3, скорость фильтрации — 1,0–2,8 м/час, высота слоя загрузки — 0,48–0,50 м.

Результаты исследования

Результаты выполненных исследований приведены на рис. 2 и 3, показана кинетика изъятия нефтепродуктов и фенолов на загрузках из различных видов АУ в зависимости от времени проведения экспериментов.

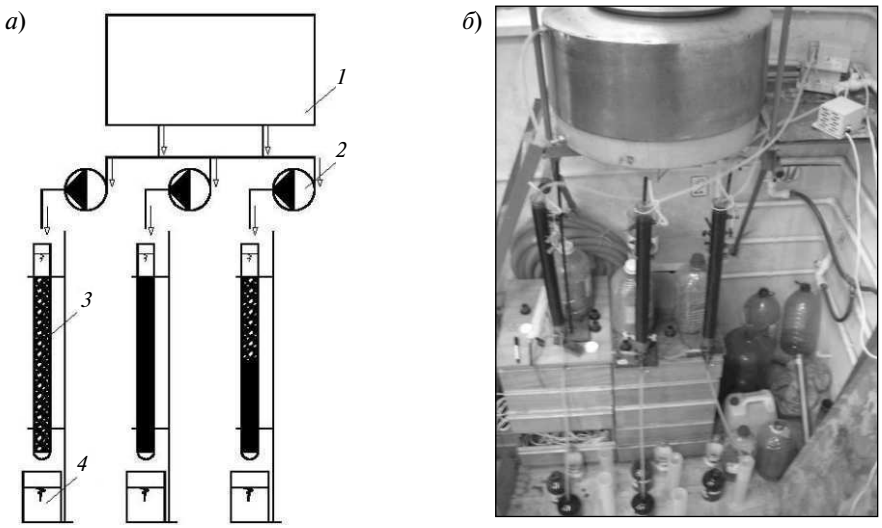


Рис. 1. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) опытной установки:

1 — резервуар исходной воды; *2* — насос АНП-10М; *3* — фильтровальная колонка; *4* –сосуд для проб

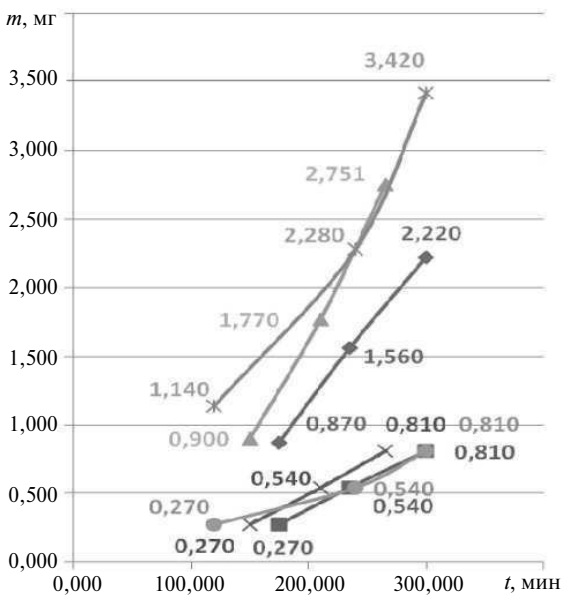


Рис. 2. Кинетика изъятия нефтепродуктов и фенолов на однородных загрузках (БАУ-А; МАУ- 2А) и КЗ (БМ, состоящая на 50 % из макропористых и на 50 % из микропористых АУ)

(— нефтепродукты БАУ-А; — фенолы БАУ-А; — нефтепродукты МАУ-2А; — фенолы МАУ-2А; — нефтепродукты БМ; — фенолы БМ). Исходная концентрация нефтепродуктов в модельном растворе — 0,38 мг/дм^3, исходная концентрация фенолов — 0,09 мг/дм^3, скорость фильтрации — 0,74–2,36 м/ч

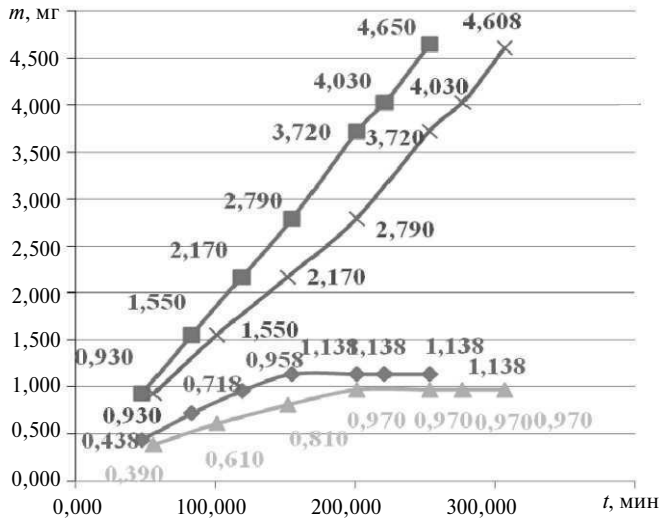


Рис. 3. Кинетика изъятия нефтепродуктов и фенолов на КЗ БМ300/180 при скорости фильтрации 2,16–2,82 м/ч (загрузка — из 60 % макропористых и 40 % микропористых АУ) и на БМ240/240 при скорости фильтрации 1,69–2,50 м/ч (загрузка — из 50 % макропористых и 50 % микропористых АУ). Исходная концентрация: нефтепродуктов — 0,20 мг/дм^3, фенолов — 0,31 мг/дм^3

(—◆— нефтепродукты, БМ3300/180; —■— фенолы, БМ3300/180; —▲— нефтепродукты, БМ240/240; —×— фенолы, БМ240/240)

Результаты исследований показывают (см. рис. 2), что сорбционная емкость однородных загрузок из активированных углей БАУ-А, МАУ-2А существенно ниже сорбционной емкости КЗ по нефтепродуктам.

Согласно данным, приведенным на рис. 3, КЗ БМ300/180, состоящая из 60 % макропористых и 40 % микропористых АУ, обладает большей сорбционной емкостью по нефтепродуктам, чем загрузка БМ240/240, состоящая из 50 % макропористых и 50 % микропористых АУ. Сорбционная емкость по нефтепродуктам у КЗ БМ300/180 на 17 % больше, чем у загрузки БМ240/240. Вместе с тем стоимость КЗ БМ300/180 на 15 % ниже.

В результате проведенных экспериментов установлено:

сорбционная емкость КЗ в сравнении с однородными загрузками выше в 1,5 раза по нефтепродуктам;

более эффективным вариантом КЗ из макро- и микропористых АУ является загрузка с послойным распределением, объем которой на 60 % состоит из макропористых АУ и на 40 % из микропористых.

Применение КЗ из макропористых и микропористых АУ при очистке воды от нефтепродуктов и фенолов увеличивает продолжительность фильтроцикла и в 1,5 раза сокращает затраты на загрузочный материал (по сравнению с однородной загрузкой из тех же АУ).

Более эффективным вариантом комбинированной загрузки является послойное распределение материала, состоящего на 60 % из макропористых АУ и на 40 % из микропористых АУ.

Результаты исследований могут быть использованы в качестве исходных данных при разработке сорбционных фильтров и фильтрующих модулей для глубокой очистки воды поверхностных и подземных источников.

Работа завершена на средства, выделенные Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга (по итогам конкурсного отбора на предоставление субсидий молодым ученым в 2012 году) [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Журба, М.Г.** Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Том 2. Очистка и кондиционирование природных вод [Текст] / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова — М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2004. — С. 234–238, 264–275.

2. **Отчет о НИР** «Теоретические и экспериментальные исследования по выбору и применению комбинированных сорбентов для мобильных установок для кондиционирования воды, подготовки питьевой воды, глубокой очистки стоков, а также очистки воды в условиях ЧС» [Текст] / Ю.А. Феофанов, М.С. Ряховский / СПб., Гос. архит.-строит. ун-т; — СПб., 2012. — С. 9, 30.

УДК 614.84

А.Л. Розов, В.А. Белянин

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЖАРНОГО НАДЗОРА

На территории РФ В 2011 году произошло 168 тысяч пожаров, при которых погибло 12028 человек (0,008 % от общего количества человек на территории России), прямой материальный ущерб составил более 17 млрд рублей.

В 2011 году произошло 26 пожаров с массовой гибелью (5 и более человек), на которых в общей сложности погибло 154 человека и получили травмы 40 человек.

Показатель гибели людей при пожарах в России весьма высок. К примеру, в США за 2010 год при пожарах погибло 3120 человек, что составляет 0,001 % от общего количества людей, находящихся на территории США, в Китае за 2008 год при пожарах погибло 1385 человек, что составляет 0,0001 % от общего количества людей, проживающих на его территории.

Происходящее свидетельствуют о том, что система обеспечения пожарной безопасности в России (далее СОПБ РФ) не осуществляет свои функции в полной мере. Анализ исполнения функций каждой из подсистем СОПБ показывает, что основная нагрузка в обеспечении пожарной безопасности возложена на организации и предприятия. Именно они обязаны осуществлять противопожарные мероприятия, непосредственно влияющие на предотвращение пожаров (загораний) на объектах, создавать условия для своевременного обнаружения и успешного тушения пожаров, а также условия для обеспечения безопасной эвакуации людей при пожарах.

Исследования показывают, что без надлежащего надзора должностные лица объектов исполняют свои обязанности в области пожарной безопасности не в полной мере. Один из основных способов влияния на СОПБ — проведение органами государственного пожарного надзора (органы ГПН) плановых проверок выполнения требований пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы.

К возможным способам повышения результативности плановых проверок и, соответственно, уровня пожарной безопасности объектов следует отнести и своевременность проверок.

Вместе с тем серьезной проблемой является ограниченность ресурсов органов государственного пожарного надзора. В настоящий момент установлена предельная численность сотрудников федерального уровня Государственной противопожарной службы, осуществляющих функции федерального государственного пожарного надзора, — 21110 единиц.

В связи с этим на сотрудников ГПН приходится от 100 до 400 объектов.

В настоящий момент отсутствует конкретная методика организации и планирования проверок. Существующие же периоды плановых проверок не учитывают особенности пожарной опасности объектов и фактические возможности подразделений ГПН.

Таким образом, особую актуальность имеет решение задачи оптимального управления территориальными подразделениями государственного пожарного надзора при организации проверок выполнения требований пожарной безопасности на объектах экономики и социальной сферы.

Федеральное законодательство РФ в области пожарной безопасности регламентирует следующие сроки проведения проверок: 1 раз в год для объектов образования; 1 раз в год для объектов социальной защиты; 1 раз в 2 года для объектов здравоохранения; 1 раз в 3 года для иных объектов защиты, правообладателями которых

являются юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Такие периоды проверок установлены для всех территорий Российской Федерации без учета территориальных особенностей, численности подразделений ГПН, количества объектов и их уровня пожарной опасности.

Территориальные подразделения ГПН планируют проверки, как правило, всех объектов, расположенных на обслуживаемой территории, не учитывая при этом фактические возможности подразделений. Данная ситуация часто приводит либо к неисполнению плана проверок, либо к снижению их качества.

В ходе исследования источников, причин и условий возникновения загораний установлено, что появление источника зажигания (инициирование взрыва) на объектах экономики и социальной сферы является случайной величиной, зависящей от многих факторов, в том числе и от человеческого. Вместе с тем возникновение загорания на объекте экономики и социальной сферы — не основная причина нанесения социального и материального ущерба. При условии, что на объекте экономики и социальной сферы система пожарной безопасности функционирует в требуемом режиме, загорание будет ликвидировано до момента перерастания в пожар и нанесения материального и социального ущерба. Следовательно, важно создать условия, препятствующие перерастанию (переходу) загорания в пожар, ограничить распространение пожара (загорания), его опасных факторов и создать условия для его успешного тушения. При проведении проверок органы ГПН интересуются соблюдением тех противопожарных мероприятий, которые препятствуют распространению пожара (загорания) и его опасных факторов, обеспечивают безопасную эвакуацию людей, а также создают благоприятные условия для его тушения.

Объекты обладают различным уровнем пожарной опасности, и, учитывая, что подразделения ГПН не в состоянии проинспектировать все объекты в минимальные периоды, возникает необходимость в определении приоритетных объектов, подлежащих первоочередным проверкам выполнения требований пожарной безопасности.

Проанализированы нормативные правовые акты в области пожарной безопасности, данные о пожарах, в том числе крупных и с массовой гибелью людей, а также факторы, способствовавшие гибели людей при пожарах.

В ходе анализа крупных пожаров установлено, что массовая гибель и травмирование людей (5 и более человек), как правило, происходит на объектах, для которых характерно следующее:

нахождение маломобильных групп населения (на них — 69 % пожаров с массовой гибелью людей от общего количества пожаров с массовой гибелью людей);

там, где осуществляется ночное пребывание людей (89);

имеющих пониженную степень огнестойкости (IV, V) (77 %);

находящихся на отдаленном расстоянии от пожарных подразделений (см. рис. 1).

Также необходимо уделять внимание следующим факторам:

наличию на объекте зданий, помещений и наружных установок взрывопожароопасных категорий (категории А и Б по взрывопожарной опасности);

повышенной этажности зданий и сооружений;

наличию эксплуатируемых подземных этажей;

массовому пребыванию людей на объекте;

наличию на объектах детей и подростков;

возможности воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте на людей, находящихся в жилой, общественно-деловой или рекреационной зонах вблизи производственного объекта.

В связи с этим данные особенности объектов можно считать факторами, повышающими уровень пожарной опасности объектов.

В результате проведенного анализа и экспертной оценки разработана следующая оценочная система, позволяющая выявлять объекты, подлежащие первоочередным проверкам выполнения требований пожарной безопасности:

Характерстика *Баллы*

Время прибытия пожарных подразделений в случае пожара:

≤ нормы..... 0
> нормы 4

Наличие на объекте зданий, помещений и наружных установок взрывопожароопасных категорий (А и Б):

нет 0
≤ 300 м^2..... 3
> 300 м^2 4

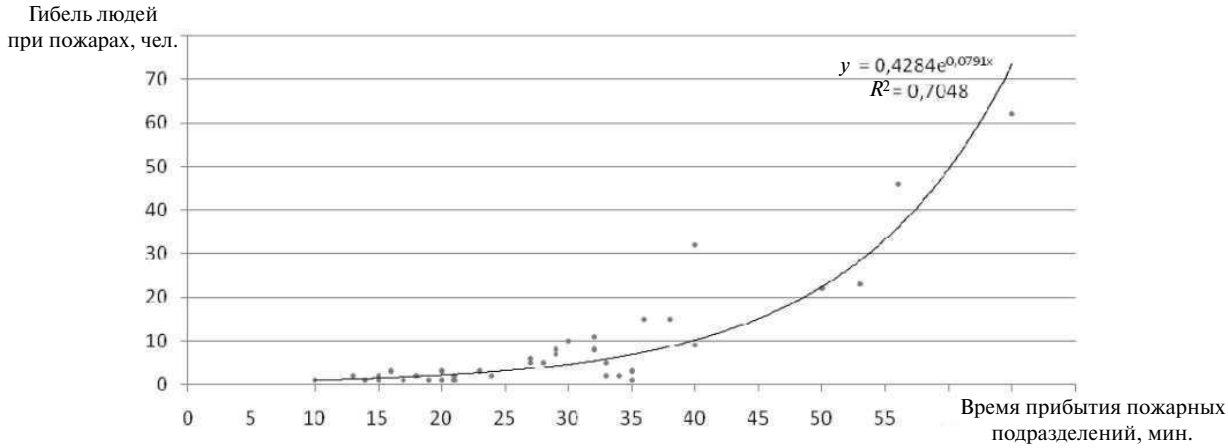


Рис. 1. Зависимость числа погибших людей при пожарах от времени прибытия пожарных подразделений

Этажность объекта (количество этажей):

1 0
1–3 1
3–5 2
5–9 3
> 9..... 4

Количество эксплуатируемых подземных этажей:

0..... 0
1–2 1
> 2..... 2

Максимально возможное количество людей на объекте:

до 50 1
50–200..... 2
2000–1000 3
> 1000 4

Возможность воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте на людей в жилой, общественно-деловой и рекреационной зонах вблизи объекта:

нет 0
есть..... 4

Ночное пребыванием людей:

нет 0
есть..... 4

Наличие маломобильных групп населения:

нет 0
есть..... 4

Наличие на объекте детей и подростков:

нет 0
есть..... 4

Фактическая степень огнестойкости зданий:

I, II, III 0
IV, V..... 4

Общее количество баллов*. (...)

* Уровень опасности объектов увеличивается с количеством баллов.

Критерием оценки уровня пожарной опасности будет количество баллов, набранных объектом исходя из его специфики.

Наибольшее количество баллов позволяет относить объект к приоритетным объектам, подлежащим первоочередным проверкам выполнения требований пожарной безопасности.

В ходе исследования проанализировано влияние уровня пожарной опасности объектов на гибель людей при пожарах, что позволило определить значения баллов для групп объектов различного уровня пожарной опасности:

объекты первого (наиболее опасного) уровня пожарной опасности — 10 баллов и более (при пожарах на которых происходит, как правило, массовая гибель людей — 5 и более человек);

объекты второго уровня пожарной опасности — менее 10 баллов (на них при пожарах массовая гибель людей, как правило, не происходит).

При исследовании факторов, влияющих на организацию проверок, также учитывалось, что сущность планирования заключается, в числе прочего, в распределении задач между исполнителями и ресурсов в соответствии с предполагаемыми задачами. Поэтому трудозатраты на проверку противопожарного состояния объектов и ресурсы органов государственного пожарного надзора отнесены к факторам, влияющим на периодичность проведения плановых проверок.

Значение трудозатрат на проверку противопожарного состояния объектов определяется экспертной оценкой исходя из местных условий. В данном исследовании использовались среднестатистические справочные данные.

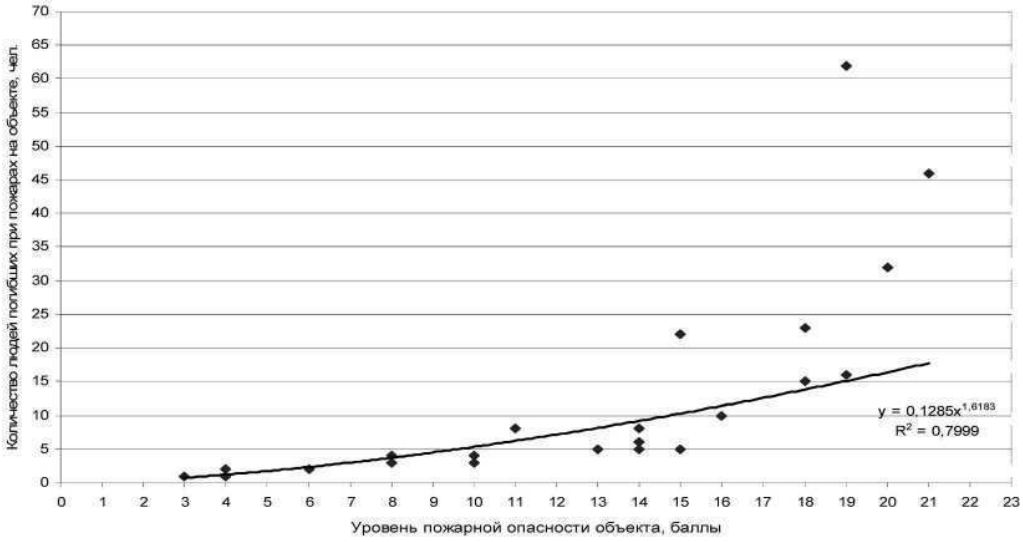


Рис. 2. Зависимость гибели людей при пожарах от уровня пожарной опасности объектов

Основная задача органов ГПН заключается в профилактической работе, связанной со снижением пожарной опасности объектов.

Но при этом органы управления подразделениями ГПН должны организовать работу подразделений эффективно, т. е. добиваться максимального эффекта от работы с учетом ограниченных ресурсов.

Задача при организации и планировании деятельности органов государственного пожарного надзора заключается в выборе оптимального варианта проверок из значительного количества альтернативных вариантов.

Исследования показывают, что по результатам проверок количество нарушений требований пожарной безопасности на поднадзорных объектах сокращается в среднем на 60 %, что соответственно приводит к снижению уровня пожарной опасности проверенных объектов. При этом существует проблема, связанная с таким ограниченным ресурсом, как количество инспекторского состава, которое не позволяет охватывать проверками все объекты в минимальные периоды (период планирования).

Также установлено, что инспекторами государственного пожарного надзора при проведении плановых проверок выявляются только около 70 % фактически имеющихся нарушений требований пожарной безопасности, и это снижает эффективность проверок.

Соответственно, при решении задачи, связанной с эффективным использованием ограниченных ресурсов, для выбора оптимального решения задачи оптимизации можно применить метод линейного программирования.

В качестве критерия оптимизации (целевая функция) при решении данной оптимизационной задачи можно принять снижение общего уровня пожарной опасности (снижение уровня пожарного риска) поднадзорной территории, на которой расположены проверяемые объекты. Ограничение в данном случае будет касаться трудовых ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 24 декабря 1994 года № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» [Текст].

2. **Федеральный закон** от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Текст].

3. **Постановление** Правительства РФ от 12.04.2012 № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре» [Текст].

4. Официальный сайт МЧС Российской Федерации [Электрон. ресурс] http: //www.mchs.gov.ru

5. **Брушлинский, Н.Н.** О понятии пожарного риска и связанных с ним понятиях [Текст] / Н.Н. Брушлинский // Пожарная безопасность.— 1999. № 3.

6. **Брушлинский, Н.Н.** Системный анализ оперативной обстановки с пожарами [Текст] / Н.Н. Брушлинский.— М.: Изд-во ВНИИПО, 1990.

УДК 627.8:621.22

В.И. Гуменюк, Б.С. Доброборский, М.Е. Федосовский

РОТАЦИЯ КОНТРОЛИРУЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА КАК СРЕДСТВО УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Одна из основных проблем влияния человеческого фактора на надежность энергетических объектов связана со свойством организма человека к фенотипической адаптации. В результате фенотипической адаптации происходит физиологический процесс ослабления реакции человека на источники опасности в результате их длительного воздействия. Это свойство обусловлено законами термодинамики биологических систем и принципами функционирования живых организмов.

Принцип функционирования живых организмов заключается в том, что все биохимические и связанные с ними энергетические процессы происходят непрерывными чередующимися циклами. Этот принцип позволяет живым организмам в значительных пределах изменять определенные физиологические свойства, в том числе и реакции на источники опасности, — человек к ним привыкает и его реакция на них в значительной мере снижается.

Именно по этой причине во всех отраслях промышленности, в том числе и на объектах энергетики, происходят массовые нарушения самых разных нормативных документов — технологических процессов, стандартов, инструкций по технике безопасности и т. д. — даже в тех случаях, когда эти нарушения непосредственно угрожают жизни и здоровью, а так же уголовной ответственностью. Отсутствие учета этого свойства организма человека при разработке машин, промышленного оборудования и технологических процессов нередко приводит к авариям и катастрофам.

В качестве примера можно привести аварию на Саяно-Шушенской ГЭС, когда не было принято никаких мер при четырехкратном превышении вибрации аварийного энергоблока.

Целью выполненных нами исследований была количественная оценка фенотипической адаптации оперативного персонала при эксплуатации энергетических объектов и ее влияния на надежность энергетических объектов.

В программу входили теоретические и экспериментальные исследования процессов фенотипической адаптации, в которых производилось ее изучение при различных психологических нагрузках. Исследования проводились на добровольцах с применением специальной компьютерной программы «Loqus 2003.1.En».

Природа и закономерности фенотипической адаптации связаны с закономерностью функций живых организмов. Основной принцип функционирования живых организмов, включая организм человека, заключается в непрерывных чередованиях потребления и выделения энергии в основном при фотосинтезе (у растений) или синтезе из продуктов питания и расщеплении аденозинтрифосфата (АТФ). При этом выделяемая энергия всегда больше расходуемой на синтез.

Этот процесс обеспечивает живым организмам устойчивое неравновесное термодинамическое состояние, за счет которого путем соответствующих биохимических реакций в живых организмах происходят процессы, обеспечивающие их жизнедеятельность. Внешне он проявляется в виде биоритмов.

На рис. 1 показаны типовые графики процессов синтеза и расщепления АТФ, которые в общем случаям подчиняются закону действующих масс. Как видно, в результате последовательных чередований циклов биохимических реакций синтеза и расщепления АТФ соответственно протекают и термодинамические процессы затрат и выделения энергии, причем количество выделяемой энергии больше потребляемой.

Среднее значение разницы между выделяемой и потребляемой энергией больше нуля — $W_{ср} > 0$.

На рис. 1 изображены: *а*) график чередования фаз синтеза и расщепления веществ; *б*) гра-

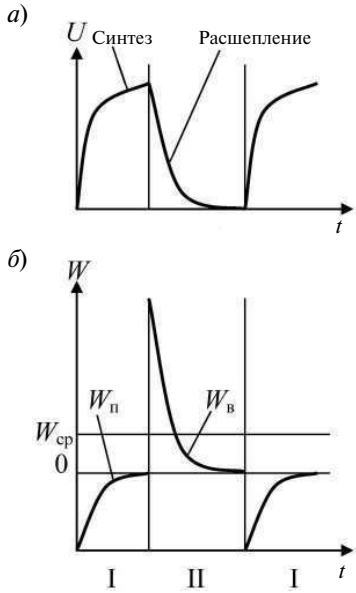


Рис. 1. Типовые графики синтеза и расщепления АТФ и сопровождающие их термодинамические процессы

фик чередования фаз потребления и выделения энергии; I — фаза потребления энергии; II — фаза выделения энергии; $W_п$ — энергия потребления; $W_в$ — энергия выделения; $W_{ср}$ — среднедействующее значение выделяемой энергии.

Величина энергии $W_{ср}$ всегда больше нуля и непосредственно зависит от реакции клетки на воздействия внутренней и внешней среды в виде ферментативной регуляции процессов синтеза и расщепления АТФ. Датчиками, определяющими скорость и характер метаболических процессов в клетках, служат аллостерические модуляторы и гормоны, непрерывно контролирующие их термодинамическое состояние. Устойчивость неравновесного термодинамического состояния клеток обеспечивается следующим образом. При минимальном значении неравновесного термодинамического состояния клетки датчики включают режим расщепления АТФ, в результате чего их энергетика начинает возрастать, достигая некоторого максимального значения. При максимальном значении неравновесного термодинамического состояния клетки датчики включают режим синтеза АТФ, в котором энергетика организма начинает уменьшаться.

Таким образом, устойчивость неравновесного термодинамического состояния клеток заключается в том, что величина этого состояния всегда непрерывно колеблется в пределах, определяемых аллостерическими модуляторами и гормонами.

Поскольку каждая клетка представляет собой полноценный микроорганизм, находящийся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии, образуемые этими клетками органы, системы и целостные организмы также находятся в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии.

Причем, поскольку все биохимические процессы в этих клетках взаимосвязаны, то функционирование органов, систем и целостных организмов обеспечивается путем соответствующих совокупных синхронных интегральных колебаний неравновесного термодинамического состояния клеток.

Это находит свое выражение в периодических колебаниях физиологических параметров (функциональных сдвигов) органов, систем и целостного организма. Наглядным примером здесь может служить последовательность сокращений и расслаблений сердечной мышцы: при сокращении сердечной мышцы у входящих в нее клеток происходят синхронные процессы расщепления АТФ, а при расслаблении — процессы синтеза АТФ.

Здесь необходимо отметить установленное статистически достоверно, что при последовательных циклах сокращения и расслабления сердечной мышцы в этих процессах одновременно, интегрированно и синхронно происходят соответствующие биохимические реакции у огромного количества клеток, каждая из которых в составе сердечной мышцы выполняет свою роль. При этом частота сердечных сокращений определяется термодинамическим состоянием всего организма и может колебаться в зависимости от испытываемой организмом нагрузки в достаточно больших пределах. Аналогично происходят соответствующие колебательные процессы в системе дыхания, центральной нервной системе и других.

Анализируя любые физиологические процессы, нетрудно убедиться, что отнюдь не все клетки, вовлеченные в эти процессы, ведут себя как солдатики, четко выполняя предписанную им роль.

В живых организмах, являющихся открытыми термодинамическими системами, непре-

рывно происходят различные необратимые процессы. Поэтому условия существования и жизнедеятельности каждой клетки непрерывно меняются, и соответственно меняются (перераспределяются) их роли в интегральных процессах, происходящих в органах и системах.

Однако статистически, в результате действия большого количества клеток, они в конечном итоге производят те действия, для которых предназначены, в данном случае — последовательные сокращения и расслабления сердечной мышцы в необходимом ритме.

В организме человека на воздействие любых нагрузок реагируют все органы и системы.

Из них наиболее четко и оперативно реагирует сердечно-сосудистая система, так как остановка ее работы даже на несколько минут может привести к гибели организма.

Несколько свободнее, но в достаточно жестких пределах работает система органов дыхания, периодические процессы которой человек может в незначительной степени сознательно регулировать.

В еще более свободном режиме колебаний работают некоторые центры головного мозга, система пищеварения и другие.

Человек может позволить себе в определенных пределах нарушать ритм сна и бодрствования, ритмы потребления пищи и некоторые другие. Однако допустимая величина всех этих нарушений в значительной степени зависит от общего состояния организма и от условий окружающей среды.

Поскольку органы и системы выполняют самые различные функции, то периоды колебаний параметров этих органов и систем, а также закономерности изменений этих колебаний могут быть самыми разными.

Нагрузка, которую испытывает человек впервые, вызывает повышенную интенсивность соответствующих биохимических реакций. После окончания действия нагрузки, при отдыхе в организме человека происходят с повышенной интенсивностью биохимические реакции, восполняющие израсходованные при нагрузке биохимические ингредиенты. При последующих нагрузках повышенный объем биохимических ингредиентов, участвующих в реакциях, постепенно становится нормальным, так как в результате многократных повторений нагрузок весь организм человека постепенно подстраивается под эти нагрузки. Эти процессы и являются фенотипической адаптацией.

Результаты проведенных нами исследований фенотипической адаптации на добровольцах с использованием компьютерной программы «Loqus2003.En» приведены на рис. 2, где показан график процессов фенотипической адаптации.

В процессе исследований изучались реакции человека на часто и редко повторяющиеся источники психологических нагрузок: смыслового и несмыслового шума.

Как видно из графика на рис. 2, интенсивность *Re* реакции организма человека на раздражители при частом повторении их воздействия в результате процессов фенотипической адаптации значительно уменьшается.

Однако с ростом перерывов между воздействиями раздражителя интенсивность *Re* реакции начинает возрастать с обратной закономерностью — это видно из рис. 3.

Здесь необходимо обратить внимание на тот факт, что процессы фенотипической адаптации на раздражители и реадаптации при отсутствии раздражителей — это естественные свойства живых организмов, следствие соответствующих биохимических процессов, которые принципиально невозможно остановить или прекратить с помощью тренировок, инструкций либо уголовной ответственности.

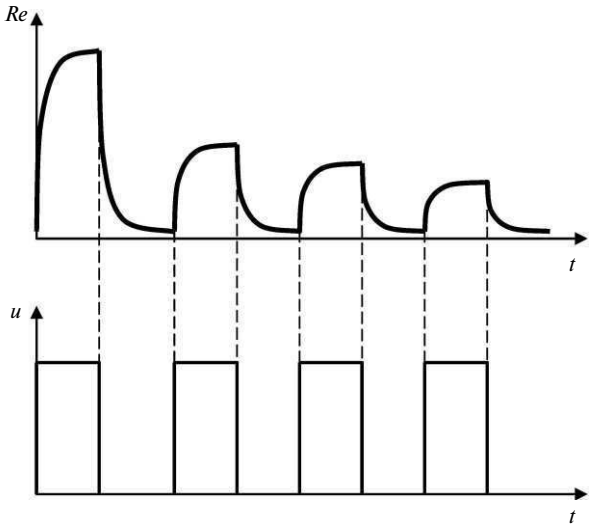


Рис. 2. Зависимость интенсивности *Re* реакции на раздражитель *u* от времени *t* при частом повторении его воздействия

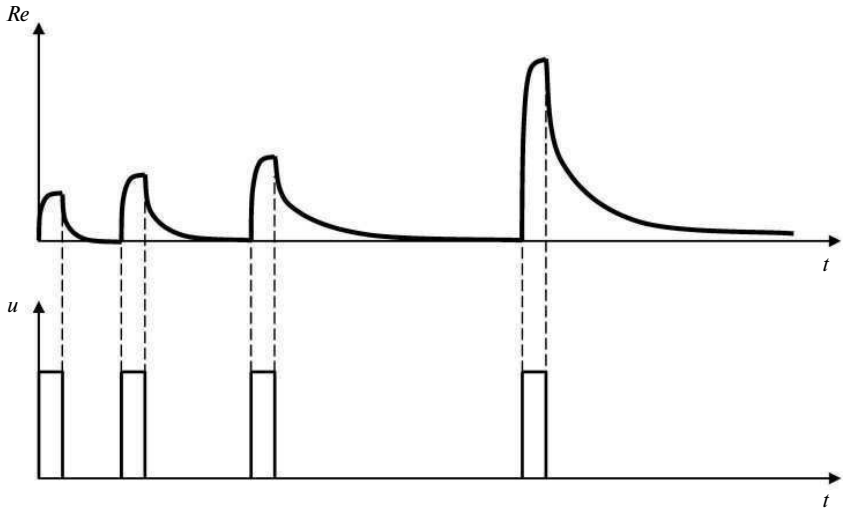


Рис. 3. График изменения интенсивности *Re* реакций на раздражитель *u* при увеличении периодов повторения действия раздражителей

Поэтому при организации работ либо технологических процессов на энергетических объектах для предотвращения чрезвычайных ситуаций их необходимо максимально учитывать путем принятия соответствующих мер.

В частности, такой мерой может служить периодическая ротация служебных обязанностей оперативного персонала.

Однако такой путь решения проблемы практически реализовать сложно в связи с разной квалификацией и специализацией сотрудников энергетических объектов и рядом других причин.

Другими мерами могут служить ротация специалистов, осуществляющих периодический технический контроль, а так же руководителей однотипных энергетических объектов.

Эти меры технически могут быть реализованы в полном объеме.

Как показали предварительные расчеты, для обеспечения безопасной эксплуатации энергетических объектов период взаимных проверок специалистами технического контроля должен составлять 3–4 месяца, а период ротации руководителей — 2–3 года. Именно в течение этих сроков начинают существенно влиять на безопасность энергетических объектов процессы фенотипической адаптации оперативного персонала и его руководителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доброборский, Б.С.** Термодинамика биологических систем: учеб. пособие [Текст] / Б.С. Доброборский / Под ред. проф. Е.С. Мандрыко.— СПб., 2006.— 52 с.

2. **Золина, З.М.** Руководство по физиологии труда [Текст] / З.М. Золина, Н.Ф. Измеров.— М.: Медицина, 1983.— 528 с.

УДК 69.001.5

С.Н. Савин

ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Экспериментальное обоснование мероприятий по совершенствованию проектных решений строительных конструкций, используемых для увеличения надежности и живучести зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, требует не только использования сложной стендовой базы специализированных научно-исследовательских организаций, но и обеспечения необходимого уровня безопасности при проведении такого рода исследований [1–10].

Рассмотрим на примере стендовой базы ОАО «26 ЦНИИ» как особенности проведения самих испытаний, так и безусловные требования по обеспечению охраны труда сотрудников, их проводящих.

Стендовая база специализированной научно-исследовательской организации размещена на двух экспериментальных площадках, расположенных на испытательных полигонах Выборгского района Ленинградской области.

Для испытания новых типов конструкций на сейсмическое воздействие используется сейсмостенд ВСС-300. Сейсмостенд представляет собой металлическую коробчатую конструкцию длиной 30 м и шириной 12 м, на которой на опорно-сферических пневматических амортизаторах расположена подвижная металлическая платформа размерами 18×7 м.

Режимы стендовых испытательных воздействий формируются на подвижной металлической платформе за счет применения в конструкции стенда механической системы, снабженной пневматическими (силовыми) и пневмогидравлическими (формируют требуемый частотный состав воздействия) устройствами. На подвижной платформе стенда, служащем рабочим испытательным столом стенда, размещается исследуемая конструкция (рис. 1–3).

Движение платформы стенда должно имитировать реальное движение грунта при сейсми-

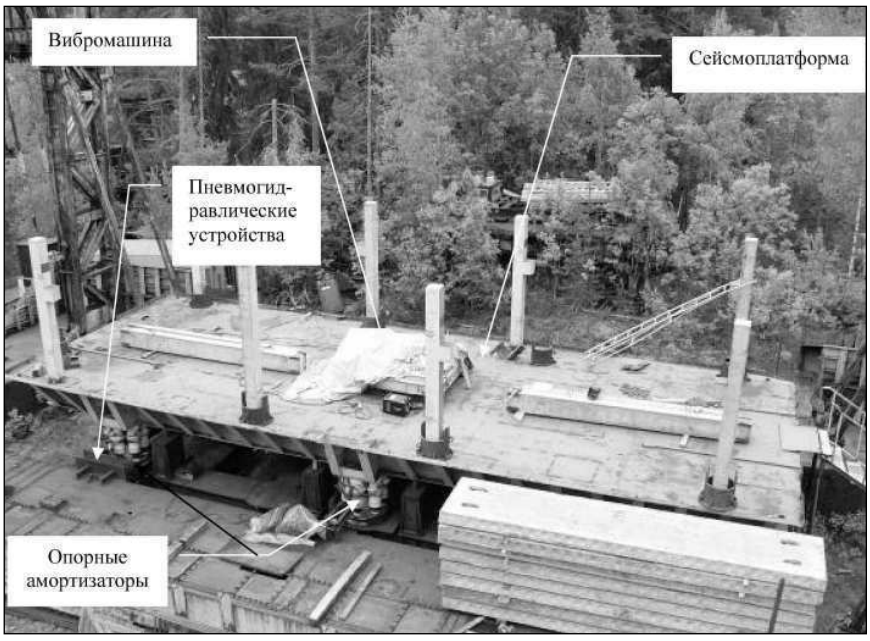


Рис. 1. Сейсмостенд ВСС-300 (общий вид)

Рис. 2. Пневматическое и пневмогидравлическое устройства для формирования требуемого частотного состава сейсмического воздействия

ческом воздействии землетрясения интенсивностью до 9 баллов включительно по шкале MSK-64 (рис. 2). Критерием соответствия является перекрытие испытательным спектром ускорения движения платформы стенда стандартной кривой коэффициента динамичности спектра землетрясений интенсивности 9 баллов по шкале MSK-64 (СП 14.13330.2011. «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП П-7–81*»).

При проведении испытаний «кирпичных фрагментов», усиленных отечественными ма-

Рис. 3. Испытательный стенд (вид снизу)

териалами ОАО «Композит», на сейсмическое воздействие, эквивалентное землетрясению интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64, происходит обрушение неусиленного фрагмента (рис. 4). При этом возникает опасность повреждения как самой сейсмоплатформы, так и окружающего пространства обломками разрушенных конструкций. Очевидно, что в типовых инструкциях по охране труда и технике безопасности не предусматриваются мероприятия по дополнительной защите персонала [11–14]. Например, контрольно-измерительный пункт (КИП) не отводится на безопасную дистанцию, не определяется размер безопасной зоны, не выполняются защитные ограждения и не предусматривается оцепление экспериментальной площадки.

Проведение статических испытаний строительных конструкций на гидросиловом стенде в ряде случаев также не может быть регламентировано типовыми инструкциями по технике безопасности.

Так, при испытаниях опытных моделей железобетонных конструкций с петлевыми стыками, которые предполагается использовать для конструктивной защиты АЭС, модель располагается в камере объемного нагружения, входящей в состав существующего гидросилового стенда. Размеры камеры — 8,0×6,0×3,5 м. Камера снабжена подвижной боковой стенкой и покрытием. Боковая подвижная стенка сформирована из 18 металлических пластин, расположенных в двух уровнях, каждая из которых соединена с гидродомкратом. Домкраты имеют ход до 1,0 м и позволяют создать максимальное суммарное боковое усилие до 2700 тс. Крепления домкратов к пластинам и стенке выгородки стенда оснащены шаровыми опорами с углом поворота до 15°. Максимальное усилие на одном домкрате — 150 тс (рис. 5).

В испытаниях на прочность при значительных деформациях моделей железобетонных конструкций реализуемая нагрузка достигает значений 600–700 кН. При этом нагружение проводится поэтапно, и на каждой ступени нагрузки необходимо фиксировать раскрытие трещин, спускаясь в силовую камеру (рис. 6).

Очевидно, что специфика такого рода испытаний требует доработать существующие требования по технике безопасности в части, касающейся осмотра и фиксации повреждений модели, находящейся под действием значительной нагрузки. Опасность для исследователей заключается в возможности внезапного разрыва конструктивной арматуры и потери железобетонной конструкцией «несущей способности». При этом

Рис. 4. Обрушение опытного фрагмента, не усиленного композитными материалами

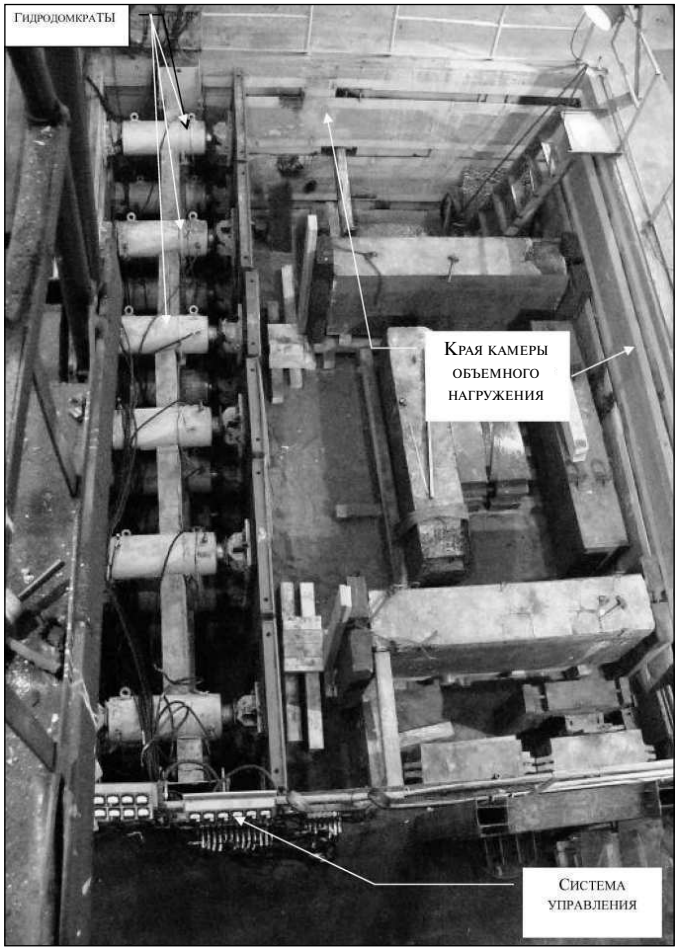


Рис. 5. Гидросиловой стенд с камерой объемного нагружения

Рис. 6. Разрушение модели при действии предельной нагрузки

среди факторов, представляющих опасность для человека, главным будет разлет осколков защитного слоя железобетона, тем более интенсивный, чем выше действующая нагрузка.

Приведенные примеры имеют своей целью показать, что при использовании стендовой базы научно-исследовательских организаций следует особое внимание уделять вопросам разработки программ испытаний, в которых, наряду с типовыми требованиями по технике безопасности, необходимо предусматривать дополнительные разделы, учитывающие специфику конкретных работ и связанные с ними угрозы для персонала. При этом следует безусловно учитывать экономический аспект таких испытаний, ибо избыточные мероприятия по охране труда и технике безопасности могут привести к неоправданному завышению цены самих испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пособие по расчетно-экспериментальной оценке сейсмостойкости общевойсковых зданий и сооружений (к ВСП 22–01–95) [Текст] / МО РФ.— М., 2004.— 108 с.

2. **Савин, С.Н.** Комплексный метод выявления скрытых дефектов и оценка надежности строительных конструкций [Текст] / С.Н. Савин, А.Н. Артемьев, Н.И. Шевченко // Информационно-аналитический журнал «Зодчий».— 2001. № 1.— С. 76–78.

3. **Савин, С.Н.** Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний [Текст] / С.Н. Савин / МО РФ.— 2006.— 141 с.

4. **Савин, С.Н.** Современные методы технической диагностики строительных конструкций зданий и сооружений [Текст] / Савин С.Н. [и др.].— СПб.: Изд-во «РДК-принт», 2000.— 127 с.

5. **Гурьев, В.В.** Мониторинг напряженно-деформированного состояния несущих конструкций высотных зданий [Текст] / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев.— Стройбезопасность-2005.— М.: ЦНСТМО, 2005.— С. 18–21.

6. **Катценбах, Р.** Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франфутрана-Майне. Случаи из практики [Текст] / Р. Катценбах, А. Шмит, Х. Рамм // Реконструкция городов и геотехническое строительство.— 2005. № 9.— С. 80–99.

7. **Николаев, С.В.** Опыт проектирования и эксплуатации схем мониторинга конструкций и оснований высотных зданий [Текст] / С.В. Николаев, В.М. Острецов [и др.] // Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства.— М.: ЦНСТМО, 2006.— С. 18–22.

8. **Шаблинский, Г.Э.** Экспериментальные исследования динамических явлений в строительных конструкциях атомных электростанций [Текст] / Г.Э. Шаблинский, Д.А. Зубков.— М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009.— С. 192.

9. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений [Текст] / МЧС России.— М., 2003.— 46 с.

10. **Савин, С.Н.** Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778–2010 [Текст] / С.Н. Савин, С.В. Демишин, И.В. Ситников // Инженерно-строительный журнал.— 2011. №7.— С. 33–39.

11. **Федеральный закон** от 17 июля 1999 г. №181-ФЗ «Об основах охраны труда в РФ».

12. **Постановление Минтруда РФ** от 6 апреля 2001 г. №30 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке государственных нормативных требований охраны труда».

13. **Постановление Минтруда РФ** от 22 января 2001 г. №10 «Об утверждении межотраслевых нормативов численности работников службы охраны труда в организациях».

14. **Постановление Минтруда РФ** от 14 марта 1997 г. №12 «О проведении аттестации рабочих мест по условиям труда».

УДК 621.039.736

В.И. Гуменюк, В.Н. Ломасов,
А.В. Моторный, А.Р. Коробицын

ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО МЕТАЛЛА С ЦЕЛЬЮ ПЕРЕВОДА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ШЛАК

В современном мире по прежнему одной из актуальных проблем остается утилизация металлических радиоактивных отходов (МРО) с целью перевода основной части радионуклидов в шлак и повторного использования пригодного металла для промышленности

В результате деятельности предприятий атомного комплекса, реализации оборонных программ, использования в народном хозяйстве источников ионизирующего излучения в хранилищах ФААЭ России хранится около 10 млн т радиоактивных ломов, загрязненных металлоконструкций и специальной техники с суммарной активностью не менее 10 млн Ки. Ежегодная наработка радиоактивных ломов на российских АЭС оценивается в размере 1 тыс. т.

Основная технология переплава загрязненного радионуклидами сплава железа в настоящее время — переплав в индукционных и дуговых электрических печах. Переплав цветного металла в дуговых электрических печах в небольших маштабах практикуется фирмами Studsvik (Швеция) и BNFL (Великобритания). Черный металл и нержавеющую сталь в дуговой печи переплавляет фирма INFANTE (Франция). Плавка в дуговой печи имеет преимущества перед плавкой в индукционной печи в силу значительно лучшего прогрева шлака и, как следствие, возможности широкого варьирования его состава. Но плавка сплавов железа в индукционных печах дает меньший выброс газов и пыли из плавильного пространства. К тому же плавильный тигель индукционной печи можно оснастить эффективным укрытием и отсосом газов, что затруднительно для дуговой печи. Кроме того, электрическая дуга вызывает испарение металла и шлака.

Существующие способы переплава загрязненного радионуклидами стального скрапа в электрических индукционных печах малотоннажны, а также имеют недостаток, присущий индукционным печам: для расплавления и нагрева до необходимой температуры шлака требуется разогреть и расплавить металл; от него шлак получает тепло.

Переплав стального скрапа на чугун в шахтной печи типа вагранки позволит уменьшить температуру процесса и обеспечить постоянное и непрерывное (несколько недель, месяцев) его течение с первоначальным расплавлением шлака и поверхностных загрязненных слоев скрапа.

Отходящие газы, образующиеся при сгорании топлива (кокс и уголь), не могут содержать радионуклиды скрапа. В газах может быть пыль, образовавшаяся при трении и ударах кусков скрапа, и возгоны из жидких металла и шлака. Но процесс плавления и температурный режим можно организовать с минимизацией этого.

В этой связи интересно исследовать данный плавильный процесс для перевода радионуклидов в жидкий шлак с образованием чугуна. Производительность современных вагранок позволит на одном заводе сконцентрировать переплав всех стальных МРО, накопленных и образующихся в России и в мире.

Методика эксперимента и оборудование

Лабораторное исследование переплава стали, загрязненной радионуклидами, имеет целью показать эффективность перехода радионуклидов из поверхностных слоев скрапа в жидкий шлак при плавлении с образованием чугуна в соответствии с ГОСТ Р 51713–2001 «Слитки черных и цветных металлов. Допустимые уровни удельной активности гаммаизлучающих радионуклидов», без заметного радиоактивного загрязнения отходящих газов. Для исследования применен процесс плавления в тигле. Характерное для противоточной шахтной печи движение шихты и газов имитировано путем послойного расположения в тигле материалов: шлакообразующих — внизу, нарезки радиоактивной стали — над ними, углеродосодержащий материал — между ними.

Образцы сплавов железа готовили из смеси стали Х18Н10Т, облученной на циклотроне МГЦ-20, и загрязненной стали из хранилища.

Радионуклиды в нержавеющей стали получаются в результате ядерных реакций. Радионуклидный состав облученных образцов зависит от содержания компонентов в сплаве, времени облучения, периода полураспада радионуклидов и сечения (вероятности) захвата протонов. В нашем случае наиболее вероятны следующие реакции:

$^{56}Fe(p,n)^{56}Co$

$^{58}Ni(p,2n)^{57}Co$

$^{52}Cr(p,n)^{52}Mn$

$^{48}Ti(p,n)^{48}V$.

Радионуклидный состав образцов до и после переплавки определялся по наиболее интенсивным гамма-линиям. Сведения о характеристиках гамма-спектров анализированных нуклидов приведены в табл. 1.

Измерения спектров гамма-излучения сплавов до и после переплавки, а также спектров излучения образовавшихся шлаков проводили с использованием полупроводникового детектора, обладающего высоким разрешением, что позволило достаточно точно определять изотопный состав образцов до и после переплавки.

Подготовка образцов и плавка

Для переплавки образцы сплавов железа смешивали с шихтой различного состава. Состав шихты выбирался на основе имеющегося у авторов опыта; он приведен в табл. 2.

Для всех составов масса стали составляла 4 г, графита — 0,5 г.

В работе использовали реактивы следующей квалификации: магнезия MgO — «Ч»; мел $CaCO_3$ — «Ч»; окалина Fe_2O_3 — «ЧДА»; сода безводная — Na_2CO_3 — «Ч»; кварцевый песок SiO_2 — «Ч»; корунд Al_2O_3 — «Ч»; углерод С — БАУ-А ГОСТ 6217; бура — марка Б ГОСТ 8429–77.

В графитовые тигли типа АТ 4/0 помещали шихту в соответствии с табл. 2, добавляли уголь, насыпали металлические отходы, кусочки нержавеющей стали и облученную фольгу. Спектр гамма-излучения измеряли с использованием полупроводникового детектора.

Облучение образцов стали Х18Н9Т проводили на циклотроне протонами с энергией 18 МэВ током 15 мкА в течение 24 часов. Далее облученные образцы разрезали на несколько частей и подбирали кусочки с примерно одинаковой активностью.

Подготовленные к плавке образцы в графитовых тиглях помещали в алундовые тигли КТЦ-

Таблица 1

Ядерные характеристики радионуклидов (выделены аналитические гамма-линии)

Радионуклид	Период полураспада, сут	Энергия гамма-линий, кэВ	Относительная интенсивность гамма-линии (фотон/распад), %
^{56}Co	77,3	**846,8**	**99,96**
		1037,9	**14,1**
		1175,1	2
		1238,3	**66**
		1360	4,3
		1770	**15,5**
		2034	7,76
^{52}Mn	5,6	**744,2**	90,4
		935,5	94,9
		1333,6	5,1
		1434	100
^{48}V	15	**983,5**	**100**
		944,1	7,75
		1312,1	**99,98**

Таблица 2

Составы шихты для переплавки образцов (масса в г)

№ п/п	Содержание (масса), г						
	SiO_2	$CaCO_3$	Na_2CO_3	Бура	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO
1	1	1,66	–	–	–	–	
2	1	1,66	0,1	–	–	–	
3	1	1,66	–	0,1	–	–	
4	1	1,66	–	–	0,05		
5	1	1,66	0,1	–	0,1	–	
6	0,9	1,66	–	–	–	0,1	
7	0,9	1,66	0,1	–	–	0,1	
8	1	1,56	–	–	–	–	0,1
9	1	1,56	0,1	–	–	–	0,1
10	0,9	1,56	0,1	–	0,1	0,1	0,1

30 с целью сохранения образцов в случае возможного разрушения графита в процессе плавки.

Плавку осуществляли в хромит-лантановой электропечи, позволяющей развивать температуру до 1750 °С. Управление нагревом осуществляли с помощью регулятора VARTA-407. Температура переплавки образцов была выбрана равной 1500 °С.

Подготовленные образцы помещали в холодную печь. Программа разогрева печи для всех образцов была одинаковой. По достижении температуры в 1500 °С образец выдерживали при этой температуре в течение часа. После этого печь остывала естественным путем.

Тигель после охлаждения разбивали, а спекшийся образец помещали в металлическую «ступку» и раскалывали. Получившиеся обломки чугуна и шлака разделяли путем магнитной сепарации. Образец чугуна был монолитным, а шлак представлял собой порошок.

Радионуклидный состав разделенных таким образом металла и шлака определялся путем измерения спектров гамма-излучения с использованием полупроводникового детектора.

Полученные результаты приведены в табл. 3. Анализ изменения состава металла после переплава проводился по наиболее отчетливым спектрам изотопов ^{48}V, ^{52}Mn и ^{56}Co.

Таблица 3

Изотопный состав и активность образцов и шлаков после переплавки

Номер образца	Масса металла после переплава, г	Ток датчика радиоактивности, нА			Содержание нуклида в металле после переплава % к общему		
		Металл	Отходы	Доля активности в металле, %	^{52}M	^{56}Co	^{48}V
1	3,492	63,4	15,7	80	76	80	78
2	3,208	51,3	13,1	80	77	82	78
3	3,143	61,5	15,0	80	32	82	59
4	3,173	60,5	17,3	78	43	100	79
5	3,198	51,1	12,3	81	45	100	78
6	3,360	57,2	13,9	80	45	100	75
7	3,088	57,7	12,0	83	39	79	67
8	3,482	57,3	14,1	80	45	80	87
9	3,251	122	31,3	80	41	100	80
10	3,084	71,5	18,7	79	42	99	65

Измерения активности образцов и содержания радионуклидов в металле проводились в два этапа.

На первом этапе активность образцов и получившегося шлака оценивалась по датчику дозкалибратора РИС-1А, который оборудован ионизационной камерой. Прибор измеряет ионизационный ток камеры, а микропроцессор пересчитывает это значение в единицы радиоактивности в соответствии с заложенными в память прибора коэффициентами. На мониторе прибора результаты измерения могут быть представлены в единицах тока (пА или нА) и в единицах радиоактивности (мКи или МБк) для выбранного нами радионуклида.

В нашем случае мы измеряли активность смеси радионуклидов и не могли выделить этим прибором отдельный нуклид. Эти измерения проводились с целью получения оперативных сведений о возможности перевода части радионуклидов в шлак.

Поскольку выполненные таким образом измерения показали, что часть активности переходит в шлак, последующие измерения проводились с применением ППД, что позволило с точностью ±5 % определить радиоизотопный состав металла и шлака.

В последних столбцах табл. 3 приведены данные по содержанию трех изотопов в металле в процентах от общего их количества в соответствующем образце.

Измерение активности отходящих газов (как и сравнение активности образцов до и после переплавки) показало, что отходящие газы не радиоактивны.

Анализ приведенных результатов показывает, что введение буры, соды и корунда позволяет вывести в шлак значительную часть радиоактивного марганца и ванадия, в то время как кобальт в основном остается в металле.

Полученные результаты говорят о том, что при использовании переплавки для удаления радионуклидов из металла необходимо подбирать состав шихты в соответствии с предварительным радиоизотопным анализом.

Загрязненные радионуклидами сплавы железа разнородны по составу радионуклидов, по причинам загрязнения, по расположению загрязнений и по своему химическому составу.

Состав и расположение радионуклидов в сплавах во многом связан с причинами загрязнения. Например, состав и расположение радионуклидов в сплавах при наведенной радиоактивности, в одном случае, в ядерном реакторе и, в другом случае, в бурильных трубах с отложениями природных веществ не имеют ничего общего между собой.

По мере развития атомной энергетики и горнодобывающей отрасли все больше накапливается конструкционных и низколегированных сталей, загрязненных (в основном поверхностно) радионуклидами разнообразного состава. Переплав таких сталей с переводом большей части радионуклидов в шлак должен быть экономически выгодным, чего можно достичь, упростив (не в ущерб безопасности) технологию переплава и конструкции установок, а также увеличив масштаб производства примерно на порядок по сравнению с настоящим временем.

Технология переплава в шахтной противоточной печи типа модернизированной вагранки позволит достичь указанной цели. Причины этого — в применении для плавления металла кокса, угля, антрацита взамен электроэнергии, уменьшение температуры ведения плавки (ввиду получения жидкого чугуна, а не стали), использование дешевых шлакообразующих материалов, более дешевого оборудования, чем у электрических печей, в большем масштабе производства (до десятков и сотен тысяч тонн чугуна в год). К большому экономическому эффекту и повышению безопасности работы может привести уменьшение либо полный отказ от дезактивации металла перед переплавом. Такую возможность необходимо исследовать на опытной установке.

Безопасность процесса может повышаться за счет относительно низких (1400–1500 °С) температур плавления, что уменьшает переход в газовую фазу радионуклидов, а также очистки газа в шахте печи при его прохождении через слой шихты, которая содержит кокс и уголь, являющиеся сорбентами. Вся установка, включая газоочистку, должна быть герметичной и газоплотной. Содержание радионуклидов в газах и пыли, выход газа и пыли целесообразно измерять на опытной установке при переплаве образцов реальной шихты.

Наш эксперимент по плавке металла и его взаимодействию со шлаком в результате дал металл с составом, характерным для чугуна. Полученные результаты позволяют предположить, что опытная промышленная установка должна представлять собой вагранку. Применение вагранки для переплава стальных малорадиоактивных отходов потребует модернизации ее конструкции и оборудования, доработку технологии плавки с учетом требований, предъявляемых при их переплавке. Одно из основных требований — газоплотность вагранки и безопасная эффективная очистка отходящих газов. Это может быть достигнуто приданием конструкции и оборудованию вагранки некоторых элементов, присущих современной доменной печи, включая:

стальной газоплотный сварной корпус;

горн с возможностью накопления в нем расплавленных чугуна и шлака;

высокостойкую футеровку;

водяные охлаждения элементов конструкции;

шлюзовое загрузочное устройство;

эффективную очистку отходящих газов (в том числе и от шлюзового загрузочного устройства) в газоплотной сухой газоочистке;

устройства для механизированного вскрытия и заделки лётки выпуска чугуна и шлака;

укрытие мест выпуска чугуна и шлака и мест их обработки, сухую очистку аспирируемого воздуха.

Шлакообразующие материалы вагранoчной плавки — это зола топлива (кокса, угля, антрацита), флюсы (известняк и доломит) и добавки для придания шлаку нужных свойств (например, плавиковый шпат, окалина и прочие). Необходимые свойства затвердевшего шлака — прочность, отсутствие саморассыпания, нерастворимость в воде и агрессивных средах.

В чугуне (без применения в шихте ферросплавов) будет содержаться примерно 4,5 % углерода и сотые доли процента кремния. Количество марганца, хрома, никеля, титана и других элементов будет зависеть от химического состава металлической шихты. Можно ожидать содержание серы 0,03–0,05 %, фосфора — до 0,1 %. Таким образом, получающийся «синтетический» чугун будет отличаться от доменного в основном по кремнию, марганцу и легирующим элементам, тем не менее он будет ценным товарным продуктом (его цена во многом будет определяться содержанием легирующих элементов).

В шлаке, как указывалось выше, соотношение кремнезема и оксида кальция будет около единицы, что обеспечит его требуемые свойства. Количество остальных окислов и соединений будет зависеть от конкретной шихты.

Переплав загрязненных радионуклидами сплавов железа на чугун в модернизированной вагранке будет проводиться по технологической схеме, включающей следующие операции:

загрузку и подготовку поступающего радиоактивного металла (прием, разгрузка, дезактивация, разделка, разделение по видам и фракциям, сушка, хранение);

прием технологического топлива, флюсов и добавок, их подготовку и хранение;

дозирование шихтовых материалов перед загрузкой в плавильную печь;

загрузку шихтовых материалов в плавильную печь через шлюзовое устройство;

плавку шихты в печи (модернизированная вагранка);

выпуск из печи продуктов плавки (жидкие чугун и шлак);

разделение жидких чугуна и шлака в желобе;

разливку чугуна в чушки «на плацу» либо (при большом объеме производства) на специальной разливочной машине;

складирование чугунных чушек (развес примерно по 12–15 кг) в насыпном штабеле;

разливку шлака в футерованные приямки;

механизированное дробление застывшего шлака;

загрузку дробленого шлака в контейнеры и хранение их на отгрузочном складе;

сухую газоочистку отходящего из вагранки газа и аспирируемого воздуха;

загрузку пыли газоочистки и аспирации, пыли и мелочи от разделки и дезактивации скрапа, а также пыли от дробления шлака в плавильную печь (возможно, с комкованием пыли).

Выполненный в работе эксперимент показал, что в результате переплавки радиоактивного металла можно перераспределить радионуклиды между шлаком и выплавленным металлом.

Этот результат получен на примере радионуклидов ^{48}V, ^{52}Mn и ^{56}Co. Количество и состав

перешедшей в шлак примеси зависит от состава шихты.

Наличие радионуклидов в составе отходящих газов не обнаружено.

Полученные результаты свидетельствуют, что при использовании переплавки для удаления радионуклидов из металла необходимо проводить предварительный анализ радионуклидных загрязнений с применением ядерно-спектрометрической аппаратуры высокого разрешения и подбирать в соответствии с этим состав шихты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Круглов, А.К.** Как создавалась атомная промышленность в СССР [Текст] / А.К. Круглов.— М.: ЦНИИАТОМИНФОМ, 1995.— 380 с.

2. **Андрюшин, И.А.** Укрощение ядра. Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР [Текст] / И.А. Андрюшин, А.К. Чернышев, Ю.А. Юдин.— Саров, Саранск: Типография «Красный Октябрь», 2005.— 481 с.

3. **Ключников, А.А.** Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними [Текст] / А.А. Ключников, Э.М. Пазухин, Ю.М. Шигера, В.Ю. Шигера.— Чернобыль, 2005.— 495 с.

УДК 378.147:159.9 514

И.Б. Афанасьева, А.И. Бежанова, Л.И. Димент

ФОРМИРОВАНИЕ РЕФЛЕКСИВНЫХ УМЕНИЙ СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ

В результате изменения стратегических ориентиров развития российской системы образования происходит изменение учебных и воспитательных целей образования, переход от «знаниевой» парадигмы к «компетентностной», обеспечивающей формирование у студентов таких знаний, умений и навыков, познавательных и личностных качеств, которые обеспечивали бы их готовность к саморазвитию и профессиональному самоопределению в современных условиях.

Саморазвитие невозможно без познания личностью собственных качеств и потенциальных возможностей. Понимание и переосмысление собственного опыта обеспечивает рефлексия, которая служит одним из механизмов самопознания. Современному обществу нужен человек, способный осуществлять саморазвитие личности, опираясь на рефлексию собственных способностей, знаний, умений, деятельности и ее результатов.

Философские основы понимания и развития рефлективных процессов изложены в работах Р. Декарта, Г. Гегеля, Э. Гуссерля, И. Канта, Д. Локка, Д. Юма, М.М. Бахтина, В.А. Лекторского и др. На методологическом уровне проблемы рефлексии исследованы В.В. Краевским, Г.П. Щедровицким.

Основой становления рефлексии являются рефлексивные умения, без которых невозможно конструирование нового знания, понимания, новых способов деятельности. Согласно К.А. Абульхановой-Славской, способность к конструктивной рефлексии, к рефлексивной работе с проблемами наиболее эффективно развивается в студенческом возрасте, и это объясняет необходимость их формирования в период обучения, когда закладываются основы личностных и профессиональных качеств человека.

Педагогические и психологические аспекты формирования рефлексивных умений в обучении

Анализ философской, психологический и педагогической литературы позволил рассмотреть основные теоретические положения, связанные с выявлением содержания и структуры понятий «рефлексия», «умения», «рефлексивные умения». В понимании рефлексии мы выделяем философский, педагогический и психологический аспекты.

В философии проблема рефлексии рассматривалась исследователями на всех этапах становления науки (Аристотель, Г. Гегель, Р. Декарт, И. Кант, Платон, Сократ, Д. Юм, М.М. Бахтин, В.А. Лекторский и др.). В философском понимании рефлексии для нас особенно важны несколько позиций, а именно:

рефлексия есть психический процесс, который объективно связан с процессом познания и может рассматриваться как его средство;

рефлексия есть процесс обращения сознания на себя; она невозможна в переделах индивидуального сознания без взаимодействия с другими субъектами;

результатом рефлексии является изменение существующей системы знаний о себе и, как следствие, развитие индивидуальности.

В трудах Г.В. Акопова, В.П. Зинченко, А.В. Петровского, В.В. Краевского, Г.П. Щедровицкого и др. рефлексия рассматривается в неразрывной связи с сознанием и понимается многосторонне: как сущностная характеристика сознания; как процесс, через который опреде-

ляется сознание (т. е. сознание есть процесс рефлексирования); как основная функция сознания, характеризующая его сущность; как уровень развития сознания. Такое понимание позволяет говорить о формировании рефлексивных умений и рассматривать его с процессуальной точки зрения.

В исследованиях проблем рефлексии В.В. Давыдова, Г.Г. Ермаковой, А.В. Захаровой, Ю.Н. Кулюткина и др. выделены рефлексии следующих видов:

по уровню развития — элементарная, научная и философская рефлексия; в процессе обучения мы ведем речь об элементарной рефлексии, приводящей к анализу знаний и деятельности, а также к размышлению об их границах и значении;

по функциональным возможностям при осуществлении деятельности — личностная (ситуативная, ретроспективная, перспективная) и интеллектуальная (экстенсивная, интенсивная, конструктивная) рефлексии;

по качеству анализа деятельности — формальная и содержательная рефлексии; при полном рефлексивном анализе невозможно ограничиться только формальной рефлексией.

Психологические аспекты рефлексивных процессов в неразрывной связи с сознанием и деятельностью личности отражены в работах Б.Г. Ананьева, Л.С. Выготского, В.В. Давыдова, В.П. Зинченко, А.Н. Леонтьева, А. Маслоу, К. Роджерса, С.Л. Рубинштейна, Н.Ф. Талызиной, Б.М. Теплова, Г.А. Цукерман.

При определении понятия «рефлексивные умения» в качестве исходных положений приняты основные положения теории деятельности и лежащие в ее основе принципы единства внешних и внутренних процессов (Л.С. Выготский, А.Н. Леонтьев, С.Л. Рубинштейн, Г.И. Щукина). Вслед за большинством авторов мы рассматриваем умение как готовность личности к практическим и теоретическим действиям, выполняемым быстро, точно и сознательно на основе усвоенных знаний и личностного опыта.

Исходя из того, что рефлексия есть обращение личности на себя, т. е. способность личности к анализу своих качеств и деятельности, а умения — это система осознанных действий, направленных на достижение какой-либо цели, под рефлексивными умениями мы будем понимать систему осознанных действий и операций, направленных на понимание, осмысление и оценку субъектом собственного Я, своей деятельности и поведения.

Среди множества умений мы выделяем рефлексивные умения в силу их особой значимости для познавательного процесса, поскольку они, будучи универсальными для любой деятельности, обеспечивают успешность протекания процессов обучения, так как формируют объективную самооценку субъектом личностных качеств, поведения, деятельности. Вслед за Г.А. Цукерман мы выделяем три сферы реализации рефлексивных процессов: самосознание; мышление и деятельность; коммуникацию и взаимодействие.

Соответственно с учетом рассмотренных выше видов рефлексии мы выделяем три группы рефлексивных умений — по направленности на самопознание, на анализ и оценку собственной деятельности, на анализ и оценку собственного поведения.

Первая группа рефлексивных умений предполагает познание субъектом собственного Я, собственных личностных качеств, самоопределение внутренних ориентиров и способов разграничения «Я» и «не-Я».

Вторая группа рефлексивных умений направлена на осознание собственной деятельности, сопоставление ее целей и условий, выявление имеющихся в ситуации и опыте личности средств и способов преобразования объекта, определение их для достижения цели, выработку личностных стратегии и тактики, восприятие и обработку обратной информации, свидетельствующих о степени адекватности каждого этапа решения целям задачи.

Третья группа служит механизмом выхода в позиции «над» и «вне», обеспечивает координацию действий и организацию взаимопонимания субъектов учебно-познавательной деятельности, соотнесение самооценки индивидуума с восприятием его другими участниками учебного процесса.

Специфика рефлексивных умений проявляется в следующих функциях:

интегративной (поскольку рефлексивные умения есть результат деятельности, то они являются основой и инструментом, обеспечивающими формирование субъектной позиции личности);

преобразующей, ибо рефлексивные умения обеспечивают не только осознание слабых и сильных сторон в собственной деятельности, но и понимание способов преодоления затруднения, т. е. способствуют совершенствованию и успешности в любой деятельности.

Согласно П.Я. Гальперину, Л.С. Выготскому, М.А. Холодной, важнейшей предпосылкой интеллектуального приращения служит способность индивидуума к процессам *произвольного интеллектуального контроля*. Основными характеристиками сформированности структур, лежащих в основе произвольного интеллектуального контроля, являются следующие способности личности [8]:

ставить цели и планировать собственную деятельность;

предвидеть последствия принимаемых решений;

оценивать качество своей интеллектуальной деятельности;

притормаживать собственную интеллектуальную деятельность;

сознательно (произвольно) самообучаться.

Таким образом, рефлексивные умения — это одни из важнейших интеллектуальных умений личности, влияющие на сформированность структур произвольного интеллектуального контроля и, как следствие, на интеллекутальное развитие в целом.

В последнее время значительно активизировались исследования педагогических аспектов рефлексии, ее значимости для профессиональной деятельности (К.А. Абульханова-Славская, А.А. Вербицкий, В.И. Загвязинский, Ю.Н. Кулюткин, Г.С. Сухобская, Г.И. Щукина).

Создание педагогических условий для формирования рефлексивных умений

Согласно Л.С. Выготскому, А.Н. Леонтьеву и др., формирование рефлексивных умений в учебно-познавательной деятельности должно осуществляться на основании деятельностного подхода.

Познавательная деятельность студентов, опирающаяся на образы и понятия, формируется на основе развернутых взаимоотношений субъектов учебного процесса в результате обмена опытом и коммуникации. При взаимодействии происходит регулирование отношений на основе общих целей, формируются нравственные отношения, коммуникативные свойства личности. В процессе познания, согласно В.В. Давыдову, В.А. Лекторскому, А.Н. Леонтьеву, Б.Ф. Ломову, коммуникативная деятельность позволяет участникам взаимодействовать и при помощи этого оценивать собственные мотивы, устремления, личностные качества, результаты деятельности. Таким образом, коммуникативная деятельность актуализирует процесс самопознания, результатом которого является рефлексия собственной деятельности [3].

Выявлено, что рефлексивные умения как часть механизма самопознания невозможно сформировать вне диалога личности как с самим собой, так и с другими, а коммуникативность — важнейшее свойство учебно-познавательной деятельности. Именно интеграция процессов познания и коммуникации обеспечивает не только освоение студентами объектов науки, культуры и пр., а как результат, — достижение целей обучения, воспитания и развития личности, но и готовность к само- и взаимооценке субъектов учебно-познавательной деятельности.

Исследование педагогического потенциала учебно-познавательной деятельности по формированию рефлексивных умений позволяет нам выявить и использовать ее возможности, а именно: активизировать процесс самопознания студентов путем актуализации коммуникативной составляющей; обеспечить переход внешнего диалога во внутренний (с самим собой); запускать механизмы рефлексии; способствовать осознанию индивидуальных возможностей в познавательной деятельности личности.

Процесс формирования рефлексивных умений студентов в обучении мы рассматриваем с позиций ассоциативно-рефлекторной теории Ю.К. Бабанского, С.Л. Рубинштейна, концепции личностно-ориентированного обучения В.В. Серикова, А.В. Хуторского, И.С. Якиманской; теории поэтапного формирования умственных действий П.Я. Гальперина, Н.Ф. Талызиной; концепции проблемного обучения А.М. Матюшкина, М.И. Махмутова.

Процесс формирования рефлексивных умений в обучении базируется на следующих принципах:

целостности, что предполагает построение процесса формирования рефлексивных умений

как системы взаимосвязанных структурных компонентов, объединенных единой целью;

непрерывности, выражающей органическое единство, взаимосвязь и взаимообусловленность составляющих элементов и состояний процесса формирования рефлексивных умений. В процессе формирования рефлексивных умений происходит как присвоение всеобщих способов действия, так и развитие способностей к самопознанию и изменению личности. Процесс формирования происходит непрерывно через коммуникативно-познавательную деятельность в учебном процессе. Рефлексивные умения служат основой самопознания личности и дальнейшего саморазвития;

рефлексивной субъектности. Субъектность — это способность человека ставить и корректировать цели, осознавать мотивы, самостоятельно выстраивать действия, оценивать их соответствие планам, выстраивать планы деятельности, быть стратегом своей жизни. Этот принцип предполагает проявление данной способности адекватно внешним обстоятельствам и отношениям с другими людьми.

Актуализация интеллектуального потенциала студента предполагает не только усвоение знаний «о том, что» или «о том, как», но и знаний «о том, какой Я». Знание собственных интеллектуальных особенностей — полезный инструмент для развития интеллектуальных сил личности.

Реализацию принципов формирования рефлексивных умений обеспечивает применение методов (проблемные, когнитивные, диалоговые, оценочные, а также методы рефлексивного анализа), различных форм организации учебного процесса (традиционные, инновационные) и систем вариативного дидактического обеспечения, ориентированного на различные когнитивные стили студентов.

В процессе формирования рефлексивных умений исследователи выделяют четыре этапа [3, 6, 10]:

создание мотивационной основы действия;

создание когнитивной и операциональной основ для формирования рефлексивных умений;

развитие и совершенствование операциональной основы рефлексивных умений, подразумевающее включение студентов в специально организованную деятельность;

применение и совершенствование рефлексивных умений в различных видах деятельности.

Эти этапы логически взаимосвязаны, каждый последующий этап реализуется на основе предыдущего, что определяет логику процесса формирования рефлексивных умений. Для формирования мотивационной, когнитивной и операциональной основ рефлексивных умений мы используем потенциал учебной дисциплины.

В качестве средств формирования рефлексивных умений студентов выступают:

содержание цикла геометро-графических дисциплин, включая специальное конструирование учебного материала, обеспечивающее возможность формирования рефлексивных умений в ходе учебного процесса;

различные формы организации учебного процесса (лекции, практические занятия, консультации, проблемные семинары, дискуссии и др.);

различные методы обучения (проблемные, когнитивные, диалоговые, оценочные, рефлексивного анализа);

система вариативного дидактического обеспечения, ориентированного на различные когнитивные стили студентов.

Анализ результатов психолого-педагогических исследований и личный педагогический опыт позволили нам выделить совокупность педагогических условий, обеспечивающих эффективное формирование рефлексивных умений студентов в процессе обучения. Она включает:

1. Формирование ценностного отношения к самопознанию, собственной деятельности на основе развития положительной мотивации. Речь идет об изменении мотивов деятельности от внешних к внутренним. Мотив формируется в любой деятельности, однако актуализация коммуникативной составляющей учебного процесса приводит к обогащению существующих мотивов стремлениями к самопознанию.

2. Создание ситуаций, активизирующих рефлексивные действия студентов и обеспечивающих запуск механизмов рефлексии за счет актуализации коммуникативной составляющей учебного процесса.

3. Обеспечение постепенного усложнения характера учебно-познавательной деятельности (от репродуктивно-алгоритмического до эвристического и творческого уровней).

4. Обеспечение субъект-субъектного взаимодействия участников учебно-познавательной деятельности, поскольку активизация данного процесса обеспечивает соотнесение личностного познания с внешней и внутренней самооценкой во взаимодействии с другими участниками.

Формирование ценностного отношения к самопознанию, собственной деятельности осуществляется на основе развития положительной мотивации к самопознанию. Это требует развития потребности в знаниях о себе, стимуляции интереса к собственным интеллектуальным проявлениям, понимание необходимости овладения рефлексивными умениями. Решению этой задачи способствует внедрение элементов проблемного обучения, которые обеспечивают выход участников в рефлективную позицию, анализ затруднений и поиск решений данной проблемы. Развитие мотивации от необходимости к интересу, изменение мотивов личности от внешних к внутренним предполагает использование диалогических методов (дискуссии, тренинги), применение которых способствует пониманию значимости рефлексивных умений, формированию отношения к себе и знаниям как ценности.

Создание ситуаций, побуждающих студентов к рефлексивным действиям и обеспечивающих запуск механизмов рефлексии за счет актуализации коммуникативной составляющей учебного процесса, требует такой организации занятий, которая дает возможность получить личностный опыт понимания и обеспечивает формирование умений оценивать себя в результате:

наблюдения собственных психических состояний (студенты осмысливают, проговаривают, обсуждают свои идеи, интуицию);

восприятия себя другими (через механизм обратной связи воспринимают информацию от других);

соотнесения с другими участниками (студент рассматривает другого в качестве модели, источника информации, удобных для наблюдения и анализа, т. е. оценивает других с собственной точки зрения);

оценки результатов собственных интеллектуальных проявлений и результатов деятельности.

Для подобной организации учебного процесса необходима активизация коммуникативной составляющей учебно-познавательной деятельности, которая обеспечивает переход от внешнего диалога ко внутреннему. Использование ситуаций само- и взаимооценки обеспечивает развитие формы субъектного контроля от внешнего к внутреннему, т. е. повышению уровня сформированности рефлексивных умений.

Для запуска механизмов рефлексии используем задания, при выполнении которых студентам предлагается проанализировать и оценить позицию других участников вв различных ситуациях. В процессе анализа выдвигаются различные рассуждения и суждения, приводящие к оценке.

Ниже представлены уровни оценки, отражающие логику развития суждения:

Наименование уровня оценки	*Содержание уровня*
Эмоциональный	Суждение (рассуждение) — оценка
Коммуникативно-аналитический (с различных позиций)	Суждение (рассуждение) — самооценка и взаимооценка
Рефлексивный	Рефлексивные суждения (рассуждения)— рефлексивный анализ — рефлексивная оценка

На эмоциональном уровне (в начале обучения) оценка часто была необоснованной, категоричной. В высказываниях отсутствовала аргументация, не приводились выводы. Таким образом, оценка приобретала форму или простого оценочного суждения, или рассуждения, приводящего к оценке.

На коммуникативно-аналитическом уровне студенты анализировали суждения с различных позиций: сравнивали различные точки зрения, соотносили свои суждения с мнением других; выявляли сходство и различие позиций, предпринимали попытки установить их причины; оценивали логическую связь и эффективность предлагаемых способов решений.

На рефлексивном уровне студенты выстраивали рефлексивную оценку; дифференцировали различные позиции (включая собственную), обосновывали аргументацию и систему доказательств. Рефлексивные суждения служат основанием для формирования рефлексивных умений.

В результате специально организованного учебного процесса студенты осознали необходимость самоанализа деятельности, а также получили представление о механизме формирования рефлексивных умений. Все это обеспечило создание базиса для формирования рефлексивных умений и позволило интенсифицировать процесс их формирования за счет применения специально сконструированного дидактического обеспечения.

Усложнение характера учебно-познавательной деятельности обеспечивается переходом методов обучения от репродуктивно-алгоритмических до полуэвристических, эвристических и творческих (согласно Л.Н. Ланде). С этой целью в учебном процессе создаются ситуации затруднения, когда студентам предстоит определиться в рефлексивной позиции по поводу непонимания, причин его возникновения и найти пути его преодоления. У студентов формируется осознание необходимости анализировать свои действия при решении различных задач, причем в условиях множественного выбора, избыточных или недостающих данных, и, как следствие, умение конструировать собственные алгоритмы, определять различные стратегии решений, умение оценивать их с позиций целесообразности. В результате анализа собственных действий формируются рефлексивные умения оценивать этапы деятельности и их соответствие поставленной цели или определенным алгоритмам. Особо акцентируется анализ собственной деятельности при решении геометрических задач различных классов (по классификации Л.М. Фридмана) [4, 8].

Обеспечение субъект-субъектного взаимодействия участников учебно-познавательной деятельности реализуется на основе актуализации процессов познания и коммуникации. Взаимодействие самопознания как подсистемы познавательной деятельности и аутокоммуникации как подсистемы коммуникативной деятельности создает основы для формирования рефлексивных умений.

В результате студенты овладевают такими умениями, как: выдвижение целей и задач деятельности; пооперациональное разбиение своей деятельности на этапы; оценивание результатов действий на каждом этапе; оценивание логики выполняемых действий; оценка зависимости результата деятельности от правильности логики рассуждений; анализ соответствия результата целям деятельности.

Анализ результатов педагогического процесса позволяет сделать вывод, что формирование рефлексивных умений происходит наиболее эффективно при решении мыслительных задач, в ситуациях преодоления затруднений, в ситуациях контроля и оценки. Поэтому при проведении экспериментальной работы в процессе обучения мы применяли систему методического обеспечения, реализующую создание подобных ситуаций. При этом использовались: последовательная система вопросов, структурированных преподавателем; организация совместного продвижения к пониманию и осознанию ошибок и затруднений; диалоговые и проблемные методы, элементы «мозгового штурма», а также когнитивные способы обучения (формулируемые вопросы, противоречия, обобщения) [1, 2].

По нашему мнению, учебно-познавательную деятельность необходимо организовывать с использованием различных форм групповой работы, которые позволяют формировать у студентов учебно-коммуникативные умения, направленные на сотрудничество. Сотрудничество — это такое взаимодействие, при котором люди содействуют удовлетворению интересов друг друга, соблюдая примерный паритет. Следовательно, сотрудничество предполагает оказание участниками деятельности взаимного содействия при решении какой-либо задачи, при движении к цели. Обобщая рекомендации педагогов-методистов И.И. Ильясова, Г.С. Селевко, Ю.Г. Фокина, А.В. Хуторского и психологов И.С. Якиманской, Б.Ф. Ломова, М.А. Холодной, можно выделить следующие необходимые условия для организации сотрудничества при обучении [7, 9, 10]:

1) деятельностный подход в субъект-субъектном взаимодействии;

2) диалогическую форму представления учебного материала;

3) создание условий для коллективного и индивидуального творчества всех субъектов учебной деятельности;

4) веру в интеллектуальные силы, моральную поддержку обучающегося со стороны других участников учебно-познавательной коммуникации;

5) создание студенту в процессе обучения условий для выбора содержания, форм, средств, методов и уровней усвоения;

6) реализацию целей и задач личностно-ориентированного обучения.

Время, отводимое на рефлективную образовательную деятельность, должно быть сопоставимо с деятельностью по учебной дисциплине в «чистом виде», т. к. только в этом случае возможно осознание и формулирование личностных образовательных результатов самим студентом. Иными словами, непременное условие успешности обучения — чередование предметной деятельности и рефлективной [10].

Методика организации рефлексии студентов на занятии предполагает следующие действия:

остановку предметной дорефлективной деятельности после завершения деятельности по учебной дисциплине;

восстановление последовательности выполненных действий (устно или письменно);

анализ последовательности действий с точки зрения эффективности, продуктивности, соответствия поставленным задачам. Параметры для анализа рефлективного материала выбираются из предложенных педагогом или определяются студентом на основе своих целей;

выявление и формулирование результатов рефлексии в виде предметной продукции деятельности (идеи, предположения, ответы на вопросы), способов, которые использовались или изобретались в ходе деятельности, гипотезы по отношению к будущей деятельности;

проверку гипотез на практике и в последующей предметной деятельности.

Результаты опытно-экспериментальной работы

Анализ сущностной характеристики рефлексивных умений, педагогического потенциала учебно-познавательной деятельности и выделенные педагогические условия стали основной для проектирования процесса формирования рефлексивных умений студентов в обучении дисциплинам геометро-графического цикла.

В проведении эксперимента приняли участие студенты энергомашиностроительного факультета СПбГПУ (всего 49 человек, из них 27 человек — экспериментальная группа (ЭГ), 22 — контрольная группа (КГ)).

Установлен исходный уровень подготовленности студентов по дисциплине при помощи входного тестирования. Диагностика сформированности рефлексивных умений у студентов позволила выделить три уровня их сформированности — высокий, средний, низкий. Результаты диагностики подтвердили однородность ЭГ и КГ, что обеспечило им возможность участвовать в эксперименте.

Оценка сформированности рефлексивных умений студентов осуществлялась на основе ценностно-когнитивного и операционально-деятельностного критериев, выделенных в результате анализа содержательной характеристики рефлексивных умений [5].

Анализ результатов опытно-экспериментальной работы выявил, что у студентов ЭГ в целом повысился уровень сформированности рефлексивных умений. Количество студентов с высоким уровнем возросло в ЭГ на 14,3 %, в КГ на 2,1 %; студентов со средним уровнем — в ЭГ на 17,2, в КГ — на 4,8 %. Количество студентов, показавших низкий уровень сформированности, уменьшилось в ЭГ на 38, в КГ на 16,9 %. Таким образом, результаты проведенной опытно-экспериментальной работы подтвердили возможность формирования рефлексивных умений на основе овладения предметными умениями по соответствующей дисциплине.

В качестве заключения хотим отметить, что в результате проведения эксперимента студенты овладели необходимыми знаниями и при этом осознали значимость самопознания и самооценки для дальнейшего саморазвития, а также важность рефлексивных умений как инструмента самооценки и самопознания, ознакомились с основными приемами и методами самопознания, овладели основными умениями оценивать свои деятельность, поведение и личность.

Способность личности к осуществлению деятельности рефлексивного характера — один из важнейших показателей ее компетентности, конкурентоспособности, успешности в профессиональной деятельности. Рефлексивное осмысление своего сознания, деятельности, опыта является конструктивным путем профессионального развития личности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьева, И.Б.** Формирование интеллектуальных умений в обучении [Текст] / И.Б. Афанасьева / СПбГПУ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2010. № 4 (110).— С. 349–356.

2. **Афанасьева, И.Б**. Учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении [Текст] / И.Б. Афанасьева // Известия РГПУ им. А.И. Герцена.— 2009. № 105.— С. 60–65.

3. **Давыдов, В.В.** Теория развивающего обучения [Текст] / В.В. Давыдов.— М.: ИНТОР, 1996.— 544 с.

4. **Ильясов, И.И**. Система эвристических приемов решения задач [Текст] / И.И. Ильясов. [Текст] М., 2001.— 154 с.

5. **Лопарева, М.А**. Коммуникативно-познавательная деятельность как фактор формирования рефлексивных умений студентов [Текст] / М.А. Лопарева // Известия ОГПУ им. А.И. Герцена.— 2008. №29(65).— С. 415–418.

6. **Талызина, Н.Ф**. Педагогическая психология [Текст] / Н.Ф. Талызина.— М.: Академия, 1998.— 288 с.

7. **Фокин, Ю.Г.** Психодидактика высшей школы: психолого-дидактические основы преподавания [Текст] / Ю.Г. Фокин.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.— Серия «Педагогика в техническом университете».

8. **Фридман, Л.Н.** Теоретические основы обучения математике: Пособие для учителей, методистов и пед. вузов [Текст] / Л.Н. Фридман / МПСИ.— М.: Флинта, 1998.— 224 с.

9. **Холодная, М.А.** Когнитивные стили: О природе индивидуального ума [Текст] / М.А. Холодная.— СПб.: Питер, 2004.— 384 с.

10. **Хуторской, А.В.** Современная дидактика [Текст] / А.В. Хуторской.— СПб.: Питер, 2001.— 544 с.

УДК 378.14

И.А. Попок, В.Е. Коберницкий

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ У СТУДЕНТОВ ВОЕННЫХ КАФЕДР НАВЫКОВ И УМЕНИЙ ВОСПИТАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ В ПОДРАЗДЕЛЕНИИ

В государственных решениях последних лет, касающихся проблем совершенствования высшего образования, указывается на необходимость повышения качества подготовки специалистов и укрепления ее связи с производством. Президент РФ В.В. Путин говорил, что молодежь обладает огромным творческим, созидательным потенциалом и ей будут оказывать всю необходимую поддержку. Будут созданы стимулы для участия бизнеса, работодателей в деятельности учреждений профессионального образования. Более тесная интеграция с промышленными предприятиями и другими организациями позволит не только готовить кадры, отвечающие потребностям работодателей, но и даст учащимся гарантии будущего трудоустройства. Необходимо в обязательном порядке создать условия для прохождения практики по специальности учащимся профессиональных учебных заведений, привлекать к преподаванию тех, кто работает на производстве. В новых формах и более широких масштабах может быть восстановлена система заказа для подготовки специалистов [1].

В Постановлении РФ от 6 марта 2008 года №152 «Об обучении граждан РФ по программе военной подготовки в федеральных государственных образовательных учреждениях высшего профессионального образования» говорится, что нужно обеспечить потребности в специалистах, «сочетающих высокую профессиональную подготовку, идейную зрелость, навыки организаторской, воспитательной и управленческой деятельности» [2].

На основе этих требований министр обороны РФ в своем приказе поставил конкретные задачи перед военными учебными заведениями, выполнение которых направлено на улучшение качества теоретической и практической подготовки будущих офицеров [3]. В комплексе этих мер все большее внимание уделяется рациональной организации и проведению методической подготовки как фактору, способствующему формированию у обучаемых педагогических знаний, навыков и умений воспитательной работы с подчиненными подразделения.

Важное место в контексте исполнения обязанностей военной службы офицера-специалиста ротного звена занимает его деятельность, связанная с организацией и проведением воспитательной работы в подразделении [4], которая проводится с целью обучения и воспитания военнослужащих, психологической подготовки, формирования и развития у них высоких морально-психологических, интеллектуальных, физических и боевых качеств, воинского мастерства, необходимых для поддержания высокой боевой готовности и выполнения воинского долга. По мнению многих авторов [5–8], воспитательная и патриотическая работа в подразделении таит в себе огромные резервы для углубления знаний военнослужащих, расширения их кругозора, овладения навыками самостоятельной работы, развития инициативы, общественной активности военно-профессиональной направленности, вооружает навыками воспитательной работы, связанной со сплочением воинского коллектива, укреплением дисциплины, формированием уставных взаимоотношений, организацией здорового досуга.

Воспитательная работа — это непосредственная живая работа с людьми. Наибольший результат она дает, когда ею охватывается весь личный состав подразделения. При этом главные усилия сосредоточиваются на деятельности в роте и равных ей воинских подразделениях, являющихся центром воспитательной и спортивно-массовой работы. Содержание и формы воспитательной работы непрерывно развиваются, обогащаются, и поэтому люди, которые призваны ее непосредственно организовывать и проводить, должны обладать определенными знаниями, навыками и умениями.

Однако, несмотря на требования руководящих документов, в теории и практике методической подготовки войск в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации, раскрывающие содержание, условия и последовательность формирования у студентов военных кафедр гражданских вузов твердых педагогических знаний, навыков и умений воспитательной работы в подразделении.

Специальные исследования, которые раскрывали бы современную систему формирования этих знаний, навыков и умений у названного контингента, не проводились. Данное обстоятельство привело к тому, что большая часть выпускников военных кафедр гражданских вузов не имеют достаточных представлений об объеме и содержания воспитательной работы в подразделении и навыков ее эффективной организации и проведения. Как результат — в отзывах из войск отмечается низкая воинская дисциплина некоторых выпускников, их невысокая общественная активность и недостаточная подготовленность к работе по обучению и воспитанию личного состава подразделения.

Таким образом, налицо принципиальное, социально-значимое противоречие между требующимся высоким уровнем педагогического мастерства выпускников военных кафедр гражданских вузов по организации и проведению воспитательной работы в подразделении и реальным состоянием их подготовки, качество которой проявляется в их последующей профессиональной деятельности в войсках. Данная проблема остается открытой для теоретического осмысления и экспериментального исследования. Разработка и внедрение новых технологий в этой области будет способствовать дальнейшему развитию теории и методики военно-профессионального обучения.

Очевидно, что разрешение этого противоречия связано с необходимостью совершенствования учебно-воспитательного процесса, т. е. комплексом организационно-педагогических мероприятий, направленных на пересмотр традиционных способов передачи знаний и формирования навыков и умений у студентов военных кафедр гражданских вузов. Имеющийся опыт формирования командно-методических знаний, навыков и умений у курсантов высших военно-учебных заведений позволили нам разработать модель методической подготовки (МП) по формированию педагогических знаний, навыков и умений в организации и проведении воспитательной работы в подразделении у студентов военных кафедр гражданских вузов (см. рисунок).

Подготовка военных специалистов на базе гражданских вузов показывает, что такой подход оправдан, так позволяет наиболее полно реализовать требования к формированию специалиста, обладающего знаниями и умениями как по основной гражданской специальности, так и в сфере военно-профессиональной подготовки.

Своеобразие структуры модели методической подготовки (МП) определяет ее способность моделировать познавательные и практические задачи к конкретному виду деятельности, а именно к деятельности офицера-командира ротного звена, связанной с организацией и проведением воспитательной работы с личным составом подразделения, в которой механизм опережающей адаптации играет важную роль. Здесь уместно заметить, что при опережающем формировании речь идет не о восстановлении или перестройке, а о развитии и формировании полезного запланированного результата. В предлагаемой модели представлена система методических заданий, которые должен выполнять студент в течение всего периода обучения, для того чтобы сформировать необходимые знания, навыки и умения воспитательной работы с подчиненными подразделения.

В основу обоснования и конструирования модели положены требования, предъявляемые к уровню методического мастерства особенностям военно-профессиональной деятельности офицера-специалиста ротного звена по организации и проведению воспитательной работы с подчиненными подразделения, и два принципа — системности и деятельности [0, 10]. Требования определили цель и задачи процесса методической подготовки, выступающие как средство их реализации. Принцип системности предполагает рассмотрение МП как компоненты многоуровневой системы учебно-воспитательного процесса, второй принцип — как системы деятельности.

Цели и задачи являются ведущим системообразующим фактором и определяют основные

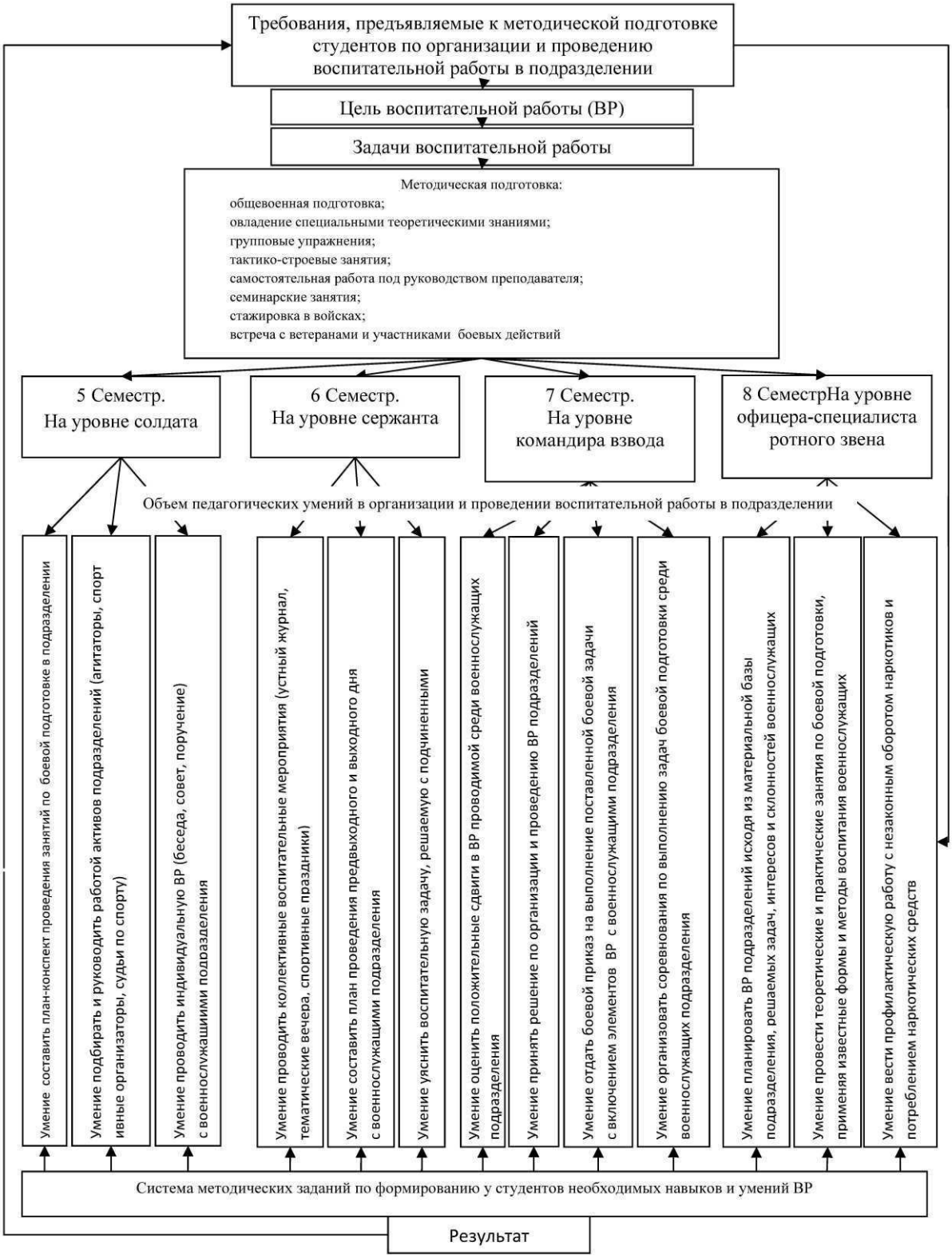


Рис. 1 Модель формирования у студентов военных кафедр гражданских вузов педагогических знаний и умений по организации и проведения ВР в подразделении

направления и пути воспитания военнослужащих, совокупность которых и составляет само содержание системы методической подготовки будущих офицеров. Основные цели и задачи воспитания военнослужащих Российской армии сформулированы в законодательных актах РФ и конкретизированы в документах органов военного управления. Главная цель воспитания в современных условиях состоит в формировании у каждого военнослужащего научного мировоззрения, целостного комплекса социально-ценностных качеств и достижение на этой основе высокого уровня морально-психологического состояния личного состава, сплоченности коллектива и способности подразделения (части) успешно решать практические задачи военной службы. Поэтому приоритетная цель воспитания личного состава подразделения — формирование и развитие у него качеств и отношений гражданина-патриота, военного профессионала и высокоразвитой личности [11].

Воспитательная работа в подразделении как сложное педагогическое явление в полной мере обладает признаками системы. Исходя из этого методическую подготовку студентов военных кафедр гражданских вузов целесообразно рассматривать как совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов, образующих единый целостный непрерывный процесс формирования у обучаемых педагогических знаний, навыков и умений воспитательной работы в подразделении, т. е. как систему [12].

Второй принцип предполагает, что формирование у обучаемых необходимых навыков и умений воспитательной работы будет проходить в процессе их методической практики (деятельности) по организации и проведению мероприятий воспитательного характера. Именно в процессе деятельности возникают новые мысли, формируется так называемое наглядно-образное мышление, присущее каждому человеку [13]. Именно через нее мы будем формировать и закреплять на практике педагогические знания, приобретенные на кафедрах гуманитарных дисциплин. Исходя из этого нам представляется, что обучение, строящееся на практической деятельности, связанной с организацией и проведением воспитательных мероприятий, преодолением противоречий в проблемных ситуациях, — наиболее верный путь эффективного формирования у будущего офицера специалиста ротного звена профессионально-важных качеств, знаний, навыков и умений, необходимых ему для обучения и воспитания коллектива и личности, т. е. формирования, в конечном итоге, у студентов готовности более эффективного социального функционирования в условиях учебно-боевой деятельности в войсках. Поэтому при создании системы методической подготовки студентов военных кафедр гражданских вузов необходима скоординированная исходящая из общих целей обучения и воспитания будущих офицеров запаса работа кафедр гуманитарных дисциплин и физического воспитания. В существующих же учебных программах формирования командно-методических знаний, навыков и умений по организации и проведении боевой подготовки структурно-логические связи воспитательной работы с гуманитарными дисциплинами, несмотря на общность их задач, не учитываются.

Нам представляется, что организация системы МП, построенная на основе теории поэтапного усвоения умственных действий и концепции программированного обучения, позволяет выработать структурно-логические взаимосвязи тех дисциплин вуза, изучение которых способствует комплексному росту у обучаемых навыков и умений воспитательной работы в подразделении [14]. Особенность программированного обучения состоит в том, что оно позволяет надежно управлять формированием знаний, навыков и умений в соответствии с заранее смоделированным оптимальным вариантом этого процесса [15].

Применительно к предмету нашего исследования концепция программированного обучения, на наш взгляд, имеет некоторые специфические аспекты. Прежде всего, это неизменно связано с вопросами отбора и кодированием информации, ее ввода и передачи в соответствии с алгоритмами деятельности, налаживанием обратной связи, с текущей переработкой информации и внесением коррективов в работу.

В качестве общеметодологического обоснования, доказывающего возможность группового воздействия на личность в процессе совместной деятельности, выступает положение об общественной природе человеческой личности. Конкретизированное в рамках социально-психологической теории, это положение находит свое

воплощение в факте решающей роли общения в условиях ближайшего социального окружения (подразделение, спортивная команда, боевой расчет и т. д.) для формирования, а следовательно, и изменения, коррекции социального поведения личности [16].

Пытаясь понять, каким образом требуется использовать законы социального развития в процессе воспитательной работы, осмыслить социальную реальность, обладающую наибольшими возможностям развития коллектива и личности, мы пришли к выводу, что главным таким механизмом является сам коллектив, его жизнедеятельность (принципы, правила и условия работы этого механизма, как известно, всесторонне разработаны А.С. Макаренко) [17]. Именно целеустремленное развитие коллектива и личности в процессе совместной деятельности с соблюдением норм межличностных отношений воспитывает у каждого его члена патриотизм, добросовестное отношение к труду, активность, ответственность, заботливость и т. д.

Концептуальным в этой модели стало то, что формирование у студентов требуемых знаний, навыков и умений по организации и проведению воспитательной работы в подразделении будет проходить в процессе повседневной деятельности: учебно-плановых занятий, служебно-плановых мероприятий, общественно-плановых мероприятий (внеучебная работа). Не случайно А.С. Макаренко определял суть воспитания через организацию всей личной и общественной жизни воспитуемых: «Воспитательная работа есть, прежде всего, работа организатора, — указывал великий педагог. — В воспитательной работе нет пустяков... Хорошая организация в том заключается, что она не выпускает из виду мельчайших подробностей и случаев. Мелочи действуют регулярно, ежедневно, ежемесячно, из них складывается жизнь. Руководить этой жизнью, организовывать ее и будет самой ответственной вашей задачей» [18].

Повседневная деятельность военнослужащих в мирное время — это совокупность занятий, мероприятий и работ, согласованных по цели, задачам, времени, месту и направленных на поддержание боеспособности, боевой и мобилизационной готовности к выполнению боевых и других поставленных задач. Основное содержание повседневной деятельности военнослужащих составляет боевая подготовка. Значительные возможности повседневной деятельности в деле подготовки офицеров-специалистов ротного звена как организаторов воспитательной работы в подразделении, на наш взгляд, определяются следующим:

во-первых, она не всегда ограничена с рамками обязательной программы. Ее содержание зависит от требований, предъявляемых к военному специалисту. Программы и планы ее проведения составляются с учетом конкретных условий и пожеланий занимающихся, что определяет гибкость, подвижность и динамичность данной работы. В этом случае происходит как бы временное «сжатие» процессов взаимоотношений и взаимопознания между военнослужащими, происходит более ускоренная групповая дифференцировка и т. д.;

во-вторых, повседневная деятельность, особенно в служебно-плановых и внеслужебных формах ее проведения, удовлетворяет запросам и интересам каждого военнослужащего в той мере, в какой нельзя сделать это в учебное время. Данное положение говорит о демократичности и коллегиальности в ее руководстве и проведении;

в-третьих, имеются большие воспитательные возможности повседневной деятельности личности военнослужащего и межличностных взаимоотношений, заключающиеся в многообразии ее форм и методов проведения и их относительной пространственно-временной обособленности;

в-четвертых, доверительность как норма взаимоотношений между военнослужащими в процессе повседневной деятельности, реализуя свои специфические функции (обеспечение объективной обратной связи, психологическое облегчение, социальное сближение), стимулирует личностную и групповую спонтанную активность и при переходе этих норм во «внутренний план» обучаемого соответственно обеспечивает достижение конечной цели этого процесса — воспитание коллектива и личности.

Представленная модель впоследствии должна быть интерпретирована в понятиях реального учебного процесса в вузе, методических указаниях к педагогической деятельности, структуре и содержанию учебного материала.

Таким образом, формирование у студентов, обучающихся по программе подготовки офицеров запаса военных кафедр гражданских вузов, педагогических знаний, навыков и умений по организации и проведению воспита-

тельной работы в подразделении будет проводиться не только в рамках специально запланированных учебно-плановых занятий, но и в процессе выполнения служебно-плановых и внеслужебных мероприятий повседневной деятельности путем включения обучаемых в командно-организаторскую деятельность (организация и проведение в подразделении мероприятий воспитательного характера) на основе специально разработанных методических заданий. А это предполагает, наряду со стереотипностью выполнения методического задания, разнообразие действий обучаемых в условиях постоянно меняющейся обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Программа** президента РФ В.В. Путина [Электрон. ресурс] /http://putin2012.ru/program, 12.01.2012 г.

2. **Постановление** Правительства Российской Федерации № 152 от 6 марта 2008 г. Об обучении граждан Российской Федерации по программе военной подготовки в федеральных государственных образовательных учреждениях высшего профессионального образования [Текст].

3. **Совместный приказ** министра обороны Российской Федерации №666 и министерства образования и науки Российской Федерации №249 от 10 июля 2009 г. [Текст] / Минобороны.

4. **Общевоинские уставы** Вооруженных сил Российской Федерации [Текст] / Минобороны РФ.— М.: Воениздат, 2008.— С. 29, 74, 75.

5. **Барабанщиков, А.В.** Методика исследования проблем военной педагогики и психологии / А.В. Барабанщиков [и др.].— М.: Изд-во ВПА, 1987.— с. 212.

6. **Бахтин, В.К.** Формирование у курсантов высших ВПУ навыков и умений организации воспитательной работы в подразделении [Текст]: Автореф. ... канд. пед. наук [Текст] / В.К. Бахтин.— М., 1980.— С. 27.

7. **Кондаков, А.М.** Управление подразделением в мирное время [Текст]: Учебник / А.М. Кондаков.— М.: Голден Би, 2007.— С. 74–149.

8. **Ефремов, О.Ю.** Военная педагогика [Текст] / О.Ю. Ефремов [и др.].— СПб., 2008.— С. 640.

9. **Анохин, П.К.** Узловые вопросы теории функциональной системы [Текст] / П.К. Анохин.— М.: Наука,1980.— С. 22–38.

10. **Талызина, Н.Ф.** Деятельностный подход к построению модели специалиста [Текст] / Н.Ф. Талызина // Вестник высшей школы.— 1985. № 5.— С. 32–36.

11. **Голден, Б.И.** Управление подразделением в мирное время [Текст]: Учебник / Б.И. Голден.— М., 2007.— С. 202.

12. **Вазина, К.Я.** Эффективный метод решения проблем. О системном подходе к построению учебного процесса в вузе [Текст] / К.Я. Вазина, Ф.Н. Тарасенко // Вестник высшей школы.— 1987. №7.— С. 7–12.

13. **Леонтьв, А.Н.** Деятельность. Сознание. Личность [Текст] / А.Н. Леонтьв.— М.: Политиздат,1975.— С. 35–40.

14. **Гальперин, П.Я.** Формирование знаний и умений на основе поэтапного усвоения умственных действий [Текст] / П.Я. Гальперин, Н.Ф. Талызина.— М.: Изд-во МГУ, 1975.

15. **Беспалько, В.П.** Программированное обучение, дидактические основы [Текст] / В.П. Беспалько.— М.: Высшая школа, 1970.

16. **Бодылев, А.А.** Активные методы обучения педагогическому общению и его оптимизации [Текст] / А.А. Бодылев, Г.А. Ковалев // Сб. научных трудов.— М.: Изд-во АПН, 1983.— С. 98.

16. **Макаренко, А.С.** Методика организации воспитательного процесса [Текст] / А.С. Макаренко.— Собр. соч.: в 7-ми томах.— М.: Изд-во АПН РСФСР, 1958.— Т. 5.— С. 9–103.

17. **Макаренко, А.С.** Собрание сочинений в 7-ми томах [Текст] / А.С. Макаренко.— М.: Изд-во АПН РСФСР, 1958.— Т. 4.— С. 349–350.

УДК 658.3

А.Г. Буймов

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗАКОНОВ ОСВОЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ НАВЫКОВ В ПРОГРАММАХ РЕПЕТИЦИОННОГО ТИПА

Первые закономерности, связанные с описанием процессов запоминания и забывания информации, были обнаружены в экспериментах немецкого психолога Германа Эббингауза в 1885 году [1].

В дальнейшем его идеи стали базой для развития методов освоения новой информации и контроля остаточных знаний [2], оценки влияния квалификации персонала на рост производительности труда [3], улучшения планов и повышения эффективности рекламных кампаний [4].

Для выполнения расчетов, связанных с проектированием, оценкой и прогнозированием процессов развития навыков обучающихся людей или исполнителей, экспериментальные данные должны быть сглажены аналитическими зависимостями [5].

В большинстве случаев зависимости не выводятся, а предполагаются. В результате этого информации, которая в них заложена, хватает только на их количественное согласование с экспериментальными данными, но не достаточно для объяснения наблюдаемых эффектов.

При таком подходе несколько кривых с принципиально различными свойствами, но согласованных с экспериментом по методу наименьших квадратов, могут быть признаны годными. Известны примеры, когда две разных кривых выдерживают стандартную проверку на адекватность, при этом одна соответствует предположению, что остаточный след от «записанной» в памяти информация может храниться вечно, а другая отвечает гипотезе о возможности его полного разрушения [6].

Ниже выводятся две вероятностных модели подобных зависимостей. Одна из них позволяет учесть эффект ретроактивной интерференции и лучше понять механизм его влияния на сохранность остаточной информации или навыков. Другая — помогает оценить роль повторений и мотивации к обучению в программах репетиционного типа.

Исходные формулы

Для определенности представим, что речь идет о развитии навыков принятия решений некоторым исполнителем. При этом отметим, что в зависимости от контекста под исполнителем можно подразумевать и некоторую бригаду, и отдельного работника, и учащегося, а под принятием решений — осуществление выбора, например выбора плана действий, репертуара поведения, варианта ответа на поставленный вопрос.

Пусть в этом случае имеется множество N возможных вариантов решений, из которых некоторый учитель (наставник, менеджер, инструктор) выбирает решения r с вероятностями π_s, а необученный исполнитель (ученик) — решения s с вероятностями ϑ_s; $r, s = \overline{1, N}$. В дальнейшем распределение π_r будем рассматривать как вероятностную характеристику рекомендуемого поведения, которому учитель обучает ученика, а ϑ_s — как характеристику его начального, необученного поведения.

При совместном рассмотрении пар будем считать, что в случае успешного обучения исполнителя решения r и s начинают совпадать. Эту ситуацию обозначим H_0. В альтернативном случае, который обозначим H_1, решения r и s будем считать независимыми.

В этих предположениях условные двумерные распределения вероятностей $P(r, s|H_i)$ рассматриваемых пар (r, s) можно с применением символа Кронекера δ_{rs} записать в виде следующих выражений:

$$P(r, s|H_0) = \pi_r \delta_{rs} = \begin{cases} \pi_r, \text{ если } s = r; \\ 0, \text{ если } s \neq r; \end{cases} \quad (1)$$

$$P(r, s|H_1) = \pi_r \vartheta_s. \quad (2)$$

Чтобы отобразить неопределенность возникновения ситуаций H_0, H_1, введем вероятности

$$P(H_0)=\rho;$$

$$P(H_1)=1-\rho. \quad (3)$$

Безусловное двумерное распределение $P(r, s)$, вычисляемое по формуле полной вероятности $P(r,s)=\sum_{i=0}^{1}P(r,s|H_i)P(H_i)$, с учетом введенных обозначений и выражений (1)–(3) может быть представлено формулой

$$P(r,s)=\pi_r\left(\delta_{rs}\rho+\vartheta_s(1-\rho)\right). \quad (4)$$

Суммирование распределения (4) по всем возможным значениям r позволяет получить выражение для одномерного распределения $P(s)$ и представить его в виде

$$P(s)=\pi_s\rho+\vartheta_s(1-\rho). \quad (5)$$

Распределение (5) характеризует новое, «обученное» поведение исполнителя, принимающего решения s с учетом полученных от учителя указаний. При успешном усвоении указаний, т. е. при $\rho=1$, новое поведение $P(s)$ совпадает с рекомендуемым поведением: $P(s) = \pi_s$. В случае плохого усвоения, т. е. при $\rho=0$, поведение исполнителя остается необученным и имеет место равенство $P(s) = \vartheta_s$.

Завершая обсуждение распределения (4), заметим, что вероятность ρ, входящая в это распределение как параметр, численно совпадает с коэффициентом корреляции между случайными величинами r и s. В этом можно легко убедиться, вычисляя соответствующие моменты данного распределения.

Фактор времени и учет последовательных циклов обучения

Если циклы обучения и применения разнесены во времени, то это можно отразить представлением формулы (5) в виде

$$P(s;t_1,t)=\pi_s(t_1)\rho_1(t_1,t)+\vartheta_s(t)\left(1-\rho_1(t_1,t)\right), \quad (6)$$

где вероятность $\rho_1(t_1,t)$ характеризует степень усвоения указаний учителя $\pi_s(t_1)$, полученных в момент времени t_1, и их сохранения до момента применения $t>t_1$, а распределение $P(s;t_1,t)$ является вероятностной характеристикой поведения исполнителя, наблюдаемого в точке t.

Из (6) видно, что в случае успешного усвоения и сохранения приобретенного опыта, т. е. при $\rho_1(t_1,t)=1$, обученное поведение $P(s;t_1,t)$ в точке $t>t_1$ совпадает с рекомендуемым поведением $\pi_s(t_1)$. В случае неусвоения или несохранения опыта, т. е. при $\rho_1(t_1,t)=0$, поведение остается необученным: $P(s;t_1,t)=\vartheta_s(t)$.

Усложним задачу и представим, что циклы обучения повторяются. Тогда по аналогии с (6) результат двух последовательных циклов обучения, совершенных в моменты времени t_1 и t_2, можно записать в виде формулы

$$P(s;t_1,t_2,t)=$$
$$=\pi_s(t_2)\rho_2(t_2,t)+P(s;t_1,t)\left(1-\rho_2(t_2,t)\right), \quad (7)$$

которая от (6) отличается тем, что здесь характеристика необученного поведения $\vartheta_s(t)$ заменена на результат первого цикла обучения $P(s;t_1,t)$, наблюдаемый в точке $t>t_2>t_1$.

С учетом выражения (6) формула (7) может быть переписана в виде

$$P(s;t_1,t_2,t)=$$
$$=\pi_s(t_2)\rho_2(t_2,t)+P(s;t_1,t)\left(1-\rho_2(t_2,t)\right)+$$
$$+\vartheta_s(t)\left(1-\rho_1(t_1,t)\right)\left(1-\rho_2(t_2,t)\right).$$

Для трех циклов по той же логике можно получить

$$P(s;t_1,t_2,t_3,t)=$$
$$=\pi_s(t_3)\rho_3(t_3,t)+\pi_s(t_2)\rho_2(t_2,t)\left(1-\rho_3(t_3,t)\right)+$$
$$=\pi_s(t_1)\rho_1(t_1,t)\left(1-\rho_2(t_2,t)\right)\left(1-\rho_3(t_3,t)\right)+$$
$$+\vartheta_s(t)\left(1-\rho_1(t_1,t)\right)\left(1-\rho_2(t_2,t)\right)\left(1-\rho_3(t_3,t)\right),$$

и далее по индукции для любого числа $k>1$ последовательных циклов обучения при выполнении условий $t>t_k>\ldots t_1$ можно вывести общую формулу

$$P(s;t_1\ldots t_k,t)=$$
$$=\pi_s(t_k)\rho_k(t_k\ t)+\vartheta_s(t)\prod_{l=1}^{k}\left(1-\rho_l(t_l,t)\right),$$
$$k>1. \quad (8)$$

Полученная формула представляет собой итоговый результат освоения исполнителем некоторой образовательной программы

$$\left\{\pi_s\left(t_i\right), i=\overline{1,k}\right\}.$$

Функции забывания. Эффект интерференции

Обратим внимание на то, что каждое слагаемое в формуле (8), содержащее характеристику $\pi_s\left(t_i\right)$ указаний учителя, предъявляемых обучаемому исполнителю в *i*-м цикле обучения ($i = 1, 2, ..., k$), можно рассматривать как вклад этого цикла в формирование обученного поведения исполнителя $P\left(s;t_1,...,t_k,t\right)$, наблюдаемого в момент времени *t*.

Введем функции

$$R_i\left(t_i,t\right)=\begin{cases}\rho_k\left(t_k,t\right) \text{ для } i=k;\\ \rho_k\left(t_k,t\right)\prod\limits_{j=i+1}^{k}\left(1-\rho_j\left(t_j,t\right)\right) \text{ для } i<k\end{cases} \quad (9)$$

и с их помощью преобразуем (8) к виду

$$P\left(s;t_1\ldots t_k,t\right)=$$

$$=\sum_{i=1}^{k}\pi_s\left(t_i\right)R_i\left(t_i,t\right)+\vartheta_s\left(t\right)\prod_{l=1}^{k}\left(1-\rho_l\left(t_l,t\right)\right). \quad (10)$$

Полученное выражение (10) позволяет интерпретировать функции $R\left(t_i,t\right)$ как «функции забывания» результатов соответствующих циклов обучения [6].

Согласно формулам (9) результаты последнего цикла обучения забываются по закону $R_k\left(t_k\ t\right)=\rho_k\left(t_k\ t\right)$, а результаты предшествующих циклов — по закону

$$R_i\left(t_i,t\right)=\rho_i\left(t_i,t\right)\prod_{j=i+1}^{k}\left(1-\rho_j\left(t_j,t\right)\right),\ i<k.$$

Здесь равенство $R_i\left(t_i,t\right)=\rho_i\left(t_i,t\right)$ возможно только при одновременном выполнении условий $\rho_j\left(t_j,t\right)=0$ для всех $j\in\left\{i+1,...,k\right\}$. В остальных случаях будем иметь $R_i\left(t_i,t\right)<\rho_i\left(t_i,t\right)$.

Из полученных соотношений можно сделать вывод, что последующие циклы обучения приводят к снижению вклада предшествующих циклов в итоговый результат. Психологи сказали бы, что формулы (9) отражают эффект ретроактивной интерференции, при которой старая информация смешивается с новыми данными и быстрее стирается из памяти [7].

Рассмотрим с этих позиций формулу (9) более подробно. При интерпретации вероятностей $\rho_i\left(t_i,t\right)$ как функций забывания для удобства условимся называть их, в отличие от общего случая $R_i\left(t_i,t\right)$, «частными функциями забывания». Считается доказанным, что частные функции забывания $\rho_i\left(t_i,t\right)$ с увеличением интервала $t=t_i$ монотонно убывают либо до нуля, либо до некоторой ненулевой постоянной асимптоты $\rho_i\left(t_i,\infty\right)>0$ [5, 6]. Что касается наибольшего значения этой функции, которое она принимает в точке $t=t_i$, то оно не обязательно должно быть равно единице. Естественно считать, что в общем случае $\rho_i\left(t_i,t\right)\le 1$. По смыслу вероятность $\rho_i\left(t_i,t\right)$ может рассматриваться как характеристика степени начального усвоения исполнителем информации $\pi_s\left(t_i\right)$, предъявленной ему в момент времени t_i. Снижение этой вероятности может быть обусловлено целым рядом мешающих факторов: состоянием рабочей обстановки, недостаточным уровнем мотивации, влиянием старых привычек и ранее накопленной информации. С учетом этих соображений функция $\left(1-\rho_i\left(t_i,t\right)\right)$ с увеличением разности $t=t_i$ должна монотонно возрастать от некоторого наименьшего значения $\left(1-\rho_i\left(t_i,t\right)\right)\ge 0$ до значения $\left(1-\rho_i\left(t_i,\infty\right)\right)\le 1$.

Согласно формуле (9) забывание информации $\pi_s\left(t_i\right)$ на промежутке времени $\left(t_i,t_{i+1}\right)$ происходит по закону $\rho_i\left(t_i,t\right)$, а с момента поступления новой информации $\pi_s\left(t_{i+1}\right)$ — по закону $\rho_i\left(t_i,t\right)\left(1-\rho_{i+1}\left(t_{i+1},t\right)\right)$. Это означает, что в момент времени t_{i+1} в монотонно убывающей функции $R_i\left(t_i,t\right)$ появится «провал» с тенденцией последующего постепенного возвращения к $\rho_i\left(t_i,t\right)$.

В нашей интерпретации эта особенность реакции функции $R_i\left(t_i,t\right)$ на воздействие $\pi_s\left(t_{i+1}\right)$

и есть проявление эффекта ретроактивной интерференции. Если информация $\pi_s(t_i)$ является важной, а $\pi_s(t_{i+1})$ воспринимается как помеха, то для нейтрализации обсуждаемого эффекта наложения может потребоваться повторное изучение информации $\pi_s(t_i)$.

Функции забывания. Эффект повторений

Далее рассмотрим ситуацию с применением программы репетиционного типа. Имеется в виду такая программа обучения, в которой на каждом занятии отрабатываются одни и те же навыки или закрепляется одна и та же информация. Отметим эту ситуацию условием $\pi_s(t_i)=\pi_s(t_1)$ для всех $i=\overline{1,k}$. Формула (10) при этом принимает вид

$$P(s;t_1\ldots t_k,t)=$$
$$=\pi_s(t_1)\sum_{i=1}^{k}R_i(t_i,t)+\vartheta_s(t)\prod_{l=1}^{k}\left(1-\rho_l(t_l,t)\right),$$

где сумма $\sum_{i=1}^{k}R_i(t_i,t)$ определяет вероятность сохранения информации $\pi_s(t_1)$ до момента времени t после завершения репетиционной программы. Введем для указанной вероятности обозначение $\bar{R}_k(t_1,\ldots,t_k,t)=\sum_{i=1}^{k}R_i(t_i,t)$ и, подставляя в сумму $\sum_{i=1}^{k}R_i(t_i,t)$ соответствующие выражения (9) для слагаемых $R_i(t_i,t)$, получим

$$\bar{R}_k(t_1,\ldots,t_k,t)=1-\prod_{i=1}^{k}\left(1-\rho_i(t_i,t)\right). \qquad (11)$$

Отсюда следует, что общая характеристика обученного поведения исполнителя в случае применения программы репетиционного типа может быть представлена формулой

$$P(s;t_1,\ldots,t_k,t)=\pi_s(t_1)\left(1-\prod_{i=1}^{k}\left(1-\rho_i(t_i,t)\right)\right)+$$
$$+\vartheta_s(t)\left(\prod_{i=1}^{k}\left(1-\rho_i(t_i,t)\right)\right). \qquad (12)$$

Из формул (11) и (12) видно, что повторение циклов обучения в репетиционной программе приводит к следующим результатам:

при *ненулевых* вероятностях $\rho_i(t_i,t)$, т. е. при $\rho_i(t_i,t)>0$, произведение $\prod_{i=1}^{k}\left(1-\rho_i(t_i,t)\right)$ с увеличением k монотонно убывает, и характеристики обученного поведения $P(s;t_1,\ldots,t_k,t)$ сходятся к характеристикам рекомендуемого поведения. Математически это отражается формулой

$$\lim_{k\to\infty}P(s;t_1,\ldots,t_k,t)=\pi_s(t_1);$$

при *нулевых* вероятностях $\rho_i(t_i,t)$ во всех циклах обучения, т. е. при $\rho_i(t_i,t)=0,\ \ i=\overline{1,k}$, для любых k получаем

$$P(s;t_1,\ldots,t_k,t)=\vartheta_s(t).$$

Это означает, что если полученная в процессе обучения информация не усваивается или не сохраняется, то при любом числе повторений поведение исполнителя к моменту времени t остается необученным.

После завершения репетиционной программы процесс забывания рекомендуемого поведения $\pi_s(t_1)$ соответствует формуле (11). Анализируя эту формулу вместе с формулой (8), можно сделать вывод, что для успешного прохождения образовательной программы $\left\{\pi_s(t_i),i=\overline{1,k}\right\}$ важно обеспечивать высокие вероятности $\rho_i(t_i,t)$ начального освоения ее элементов $\pi_s(t_1)$ и включение в нее репетиционных циклов с необходимым числом повторений изученного материала. Кроме того, как уже отмечалось при анализе формул (9), важно позаботиться об устранении помех, приводящих к проявлению эффекта ретроактивной интерференции.

Для выполнения количественных расчетов надо знать характеристики сложности заданий $\pi_s(t_1)$ и индивидуальные реакции исполнителей $\rho_i(t_i,t)$ на эти задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Contributions to memory [Электрон. ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia.— Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Ebbinghaus (дата обращения 12.02.2012).

2. **Чмыхова, Е.В.** О методологических проблемах использования результатов тестирования знаний студентов как показателя качества образования [Текст], [Электрон. ресурс] / Е.В. Чмыхова, А.Т. Терехин // Труды СГА.— 2007.— Режим доступа: http://ecology.genebee.msu.ru/3_SOTR/CV_Terekhin_publ/2007_Test_TrudySGA.doc (дата обращения 14.02.2012).

3. Experience curve effects [Электрон. ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia.— Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Experience_curve_effects (дата обращения 14.02.2012).

4. **Мозер, К.** Повторение рекламы и ее эффективность [Электрон. ресурс] / К. Мозер / Энциклопедия маркетинга /2008/05/04/.— Режим доступа: http://www.marketing.spb.ru/lib-around/socio/adv_repetition.htm (дата обращения 15.02.2012).

5. **Robertson, G.S.** A Brief History of the Mathematical Definition of Forgetting Curves [Электрон. ресурс] /G.S. Robertson / Grant Sheridan Robertson's personal blog.— Friday, June 26, 2009.— Режим доступа: http://www.ideationizing.com/2009/06/brief-history-of-mathematical.html (дата обращения 16.02.2012).

6. **Wixted, J.T.** On Common Ground: Jost's (1897) Law of Forgetting and Ribot's (1881) Law of Retrograde Amnesia [Текст], [Электрон. ресурс] / J.T. Wixted // Psychological Review.— 2004.— Vol. 111.— No. 4.— P. 864–879.— Режим доступа: http://wixtedlab.ucsd.edu/publications/wixted/Jost_Law.pdf (дата обращения 16.02.2012).

7. Большая психологическая энциклопедия [Электрон. ресурс] // Словари и энциклопедии на Академике.— Режим доступа: http://psychology.academic.ru/ (дата обращения 16.02.2012).

УДК 331.104–109

В.С. Кобчиков, В.К. Ступак

ПРОФСОЮЗНЫЙ КОМИТЕТ СОТРУДНИКОВ СПБГПУ

Профессиональные союзы представляют собой добровольные общественные объединения людей, связанных общими интересами по роду их деятельности на производстве, в сфере обслуживания, культуры и т. д.

Исторически сложилось так, что это были сначала союзы рабочих, возникшие в XIX веке.

В России до конца XIX века образования рабочих союзов не допускалось — действовало только небольшое количество касс взаимопомощи с незначительным числом членов.

В открывшемся в 1902 году Санкт-Петербургском политехническом институте существовала касса взаимопомощи, созданная для студентов. В ее функции входило воспомоществование нуждающимся студентам. Средства для этих целей собирались за счет проведения различных благотворительных акций: концертов, спектаклей, издания конспектов лекций и др.

То есть профсоюзов служащих Политехнического ннститута, видимо, в ту пору не существовало.

В 1918 году был завершен период становления, выбран путь развития профсоюзных организаций и создан Всесоюзный центральный совет профессиональных союзов (ВЦСПС). После образования СССР профсоюзы России вошли в общесоюзную структуру профсоюзов и находились там до 1990 года.

В 1919 году в Москве состоялся учредительный съезд Всероссийского союза работников просвещения и социалистической культуры, и 29 июля 1919 года на нем произошло организационное оформление этого союза. Эту дату можно считать началом истории профсоюзного движения работников образования России.

В марте 1958 года он был преобразован в профсоюз работников просвещения, высшей школы и научных учреждений.

После распада СССР всесоюзный орган ВЦСПС — был распущен и его преемником стала ФНПР, насчитывающая в настоящее время 121 членскую организацию. Членами ФНПР в настоящее время являются 37, 7 млн человек.

К сожалению, изучая архивные и музейные материалы, довольно сложно проследить историю профсоюзов в СПбГПУ.

В альбоме «День в Ленинградском политехническом институте им. М.И. Калинина» есть информация о местном комитете ЛПИ — фотографии президиума и актива местного комитета.

Профсоюзный комитет — профком — в наши дни избирается на профсоюзной отчетно-выборной конференции делегатами от профсоюзных групп кафедр и других подразделений университета сроком на пять лет.

В трудные послеперестроечные годы нашей администрации совместно с профсоюзной организацией все-таки удалось сохранить все созданное за многие годы нашего существования, что позволяет и сейчас обеспечить нормальную жизнь и работу всего коллектива СПбГПУ.

В наши дни профсоюзная организация сотрудников работает в соответствии с коллективным договором между администрацией университета и профсоюзом, действующим до 2014 года.

В 2011 году профкому удалось выполнять решение о выплате страховой компенсации членам профсоюза из профсоюзного бюджета. При этом сумма возмещения расходов при несчастных случаях составила 75500 р (14 человек). Кроме того, за счет профсоюзных взносов в 2011 году было приобретено 16 путевок на санаторно-курортное лечение для членов профсоюза на общую сумму 313616 р. Члены профсоюза оплачивают от 30 до 50 % от стоимости путевки. Было утверждено пересмотренное положение об оказании материальной помощи членам профсою-

за. В профбюджете предусмотрено выделение 38 % от профбюджета на крупные подразделения и 6 % в фонд председателя (деньги идут в основном на погребение). Это позволило оказать сотрудникам университета материальную помощь из взносов профсоюза на сумму свыше 2 млн 600 тыс. руб. и из средств университета через социальный отдел на сумму свыше 633500 руб.

В 2011 году продолжилась работа фонда социальной поддержки сотрудников университета за счет средств, получаемых от предпринимательской деятельности, приносящей доход. Отчисления в этот фонд от университета составляли 30 тыс. руб. в месяц.

В связи с превышением стоимости путевок над стоимостью питания на 5000 руб. на базе отдыха «Политехник» в пос. Новомихайловский всем членам профсоюза, которые отдыхали там в 2011 году, была оказана помощь в этих же размерах.

Профсоюзным комитетом совместно с администрацией проведена большая подготовительная работа по организации работы детского оздоровительного лагеря (отдохнуло 48 детей), базы отдыха «Политехник» в п. Горы (отдохнул 91студент, 25 сотрудников и членов их семей), базы отдыха «Политехник» в поселке Новомихайловский на берегу Черного моря (171студент, 5 аспирантов, 284 сотрудника и членов их семей), базы отдыха в Ушково (отдохнули 74 сотрудника и члены их семей, а также 30 студентов).

Спортивная комиссия профкома совместно со спортивной кафедрой университета проводит спортивно-оздоровительную работу на факультетах и подразделениях университета. Сотрудники занимаются в секциях баскетбола, волейбола, бадминтона, большого тенниса, футбола и др.

Спортивная комиссия организовала участие команды сотрудников, аспирантов и студентов в международном легкоатлетическом пробеге «Женская десятка» — 40 участников, во Всероссийском дне бега «Кросс наций» — 56 человек, Всероссийских соревнованиях «Лыжня России» — 54 участника.

1 сентября в 28-й раз был организован на стадионе СПбГПУ традиционный турнир по мини-футболу «Листопадник-2011» — участвовали 16 команд (130 участников и 140 болельщиков) — студенты, сотрудники, аспиранты и выпускники университета.

В феврале 2011 года в 17-й раз проводился «Кубок Ректора» по мини-футболу (участвовало 112 человек — студенты, аспиранты и сотрудники).

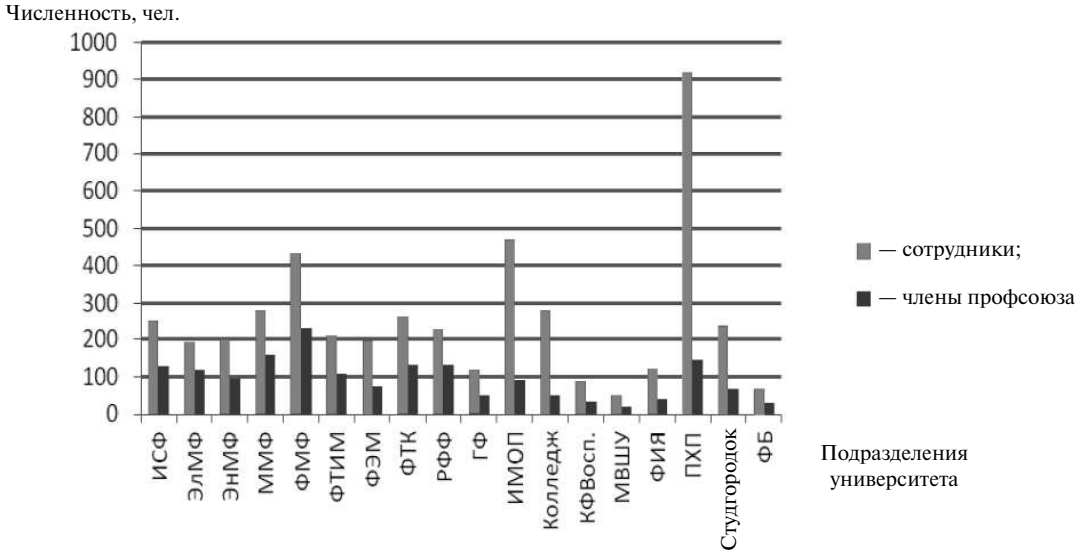
В марте 2011 года на спортивной базе в пос. Кавголово прошел чемпионат СПбГПУ по лыжным гонкам (участвовало 112 человек — студенты, сотрудники, аспиранты и около 50 болельщиков)

В июне 2011 года объединенная команда сотрудников, аспирантов и студентов участвовала в международном марафоне «Белые ночи-2011» (37 человек на 3 дистанциях).

В традиционной городской межвузовской спартакиаде «Здоровье» среди преподавателей и сотрудников команда нашего университета в комплексном зачете заняла второе общекомандное место

Сотрудники и преподаватели университета в течение года принимали участие в различных соревнованиях: первенстве по теннису, открытом кубке ИМОП по настольному теннису, кубке ректора по шахматам, региональном кубке по волейболу, в спортивно-праздничных турнирах, посвященных Дню Победы, в городском первенстве по баскетболу среди ветеранов. Летом проводились спортивно-массовые мероприятия в Северном и Южном лагерях. Сотрудники университета имеют возможность отдыхать на спортивной базе в Кавголово.

Большое внимание профком уделял культурно-массовой работе. В течение года более 1000 сотрудников и членов их семей посещали спектакли театров Санкт-Петербурга по льготной цене (Мариинский театр, Концертный зал Мариинского театра, Театр музкомедии, Учебный театр, театр «Санкт-Петербург—Опера», Большой драматический театр, антрепризные спектакли на сцене Выборгского дворца культуры и Дворца культуры имени Горького.) Большой популярностью пользуются концерты во Дворце Белосельских-Белозерских, экскурсии в Юсуповский дворец. Практически каждые две недели проводились автобусные экскурсии по Санкт-Петербургу и его окрестностям (Петродворец, Гатчина). Интересны посещения уникальных старинных особняков и дворцов Санкт-Петербурга.



Численный состав работников и членов профсоюза по наиболее значимым подразделениям

В зимние каникулы для детей сотрудников предлагаются билеты на елки в различные театры и концертные площадки города. Были организованы посещения общедоступных мероприятий, посвященных дню снятия блокады и Дню Победы.

Стало уже традиционным в предновогоднюю ночь организовывать праздничное посещение театров. Интересны для сотрудников как поездки по нашей стране (Москва и Подмосковье, Белоруссия, Новгород, Казань, Псков, Пушгоры), так и зарубежные поездки в Финляндию, Швецию, Швейцарию Эстонию (Таллинн, Раквере).

Производственная комиссия профкома активно занимается коллективным договором и контролем его выполнения. Особенно сейчас предстоит большая работа по разработке нового коллективного договора в связи с созданием в университете институтов и присоединением колледжа и ПИМаш.

Активно работает в профкоме пенсионная комиссия, которая поддерживает связь (поздравляет с праздниками, оказывает материальную помощь и т. д.) с бывшими сотрудниками университета.

Общая картина членства в профсоюзе представлена на рисунке.

В связи с изменением структуры СПбГПУ предстоят серьезные изменения и в структуре профсоюзного комитета. Предстоят также и выборы нового состава профкома. Решением этих задач придется заняться в ближайшее время.

УЧЕНЫЕ-ПОЛИТЕХНИКИ, ПРОСЛАВИВШИЕ НАШУ СТРАНУ

Георгий Николаевич Флёров (1913–1990) — выдающийся физик-экспериментатор в области ядерной физики и техники, ученик и соратник академика И.В. Курчатова, участник Великой Отечественной войны (1941–1942), Атомного проекта СССР (1943–1951), действительный член АН СССР (с 1968 года), Герой Социалистического Труда (1949), лауреат Ленинской (1967), Сталинских (1946, 1949) И Государственной (1975) премии. Кавалер орденов Ленина (1949, 1983), Октябрьской Революции (1973), Трудового Красного Знамени (1948, 1963, 1975), Отечественной войны 1-й степени (1985), Красной Звезды (1945), золотых медалей АН СССР имени Д.И. Менделеева (1987) и имени И.В. Курчатова (1989).

Окончил инженерно-физический (физико-механический) факультет Ленинградского индустриального (политехнического) института в 1938 году, работал в Физико-техническом институте в 1938–1941 годах в Ленинграде и в 1942–1943 годах в Казани, с 1943 по 1957 год — в Лаборатории № 2 (с 1949 года — это Лаборатория измерительных приборов — ЛИПАН, а с 1956-го Институт атомной энергии) АН СССР, с 1957 по 1990 год — в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

УДК 001:929

М.Ф. Кесаманлы, Ф.П. Кесаманлы

АКАДЕМИК ГЕОРГИЙ НИКОЛАЕВИЧ ФЛЁРОВ (к столетию со дня рождения)

Георгий Николаевич представляется мне необыкновенно смелым человеком. Его личная смелость, интеллектуальная смелость были самой привлекательной из всех черт его характера. Поиск нового есть драгоценное свойство личности, и у Георгия Николаевича оно проявлялось с необычной силой ... Он мог быть очень страстным, но мог быть и беспристрастным. ... И, наконец, Георгий Николаевич был оптимистом в науке, в жизни, в своих контактах с людьми. Таким мне он и запомнился, и я хочу, чтобы все помнили его таким.

Профессор С.П. Капица [7]

Фамилия Флёров происходит не от французского fleure (цветок), как считают некоторые, а от имени одного из святых мучеников — Флора. По преданию, каменщики братья Флор и Лавр крестили около трехсот строителей языческого храма и разрушили стоявших в нем идолов. За это братья приняли мученическую смерть. В их честь названы многие православные церкви в России. Священники, служившие в этих храмах, часто брали себе фамилии Флёров (Флоров) или Лавров. По-видимому, так поступил и дед Георгия Николаевича, бывший священником в городе Глухове.

Отец Георгия Николаевича — Николай Михайлович Флёров — в 1897 году за «вольнодумство» и участие в студенческих беспорядках был отчислен с медицинского факультета Киевского университета и сослан на Печору. Там он познакомился со своей будущей женой, Елизаветой Павловной Брайловской. Вскоре у них родился первый сын — Николай. После окончания ссылки молодая чета переехала в родной город Елизаветы Павловны — Ростов-на-Дону. Здесь 17 февраля (2 марта) 1913 года родился Георгий Николаевич (Юра) Флёров.

После окончания школы в 1929 году Юра работал чернорабочим на стройках, электриком, смазчиком в паровозном депо. В 1931 году вступил в комсомол и переехал в Ленинград, где работал на заводе «Красный путиловец». В 1933 году он был направлен на учебу в Ленинградский физико-механический (политехнический) институт на физико-механический факультет. Об этом периоде жизни сам Георгий Николаевич писал: «С выбором учебного заведения мне повезло. В тридцатые годы Политех-

нический институт переживал пору расцвета. Я.И. Френкель, А.Ф. Иоффе и ряд других выдающихся ученых и педагогов отдавали много сил подготовке и отбору способной молодежи для научной работы.

Неподалеку от главного корпуса учебного института находился первый в стране исследовательский физический институт — Физтех. Студенты физико-механического факультета, на котором я учился, совмещали учебу с работой в Физтехе. Студентом четвертого курса и я вошел в творческий коллектив этого института.

Вскоре я познакомился со своим будущим руководителем, Игорем Васильевичем Курчатовым — человеком, оказавшим громадное влияние на весь мой жизненный путь. И не только в выборе направлений научных исследований» [2].

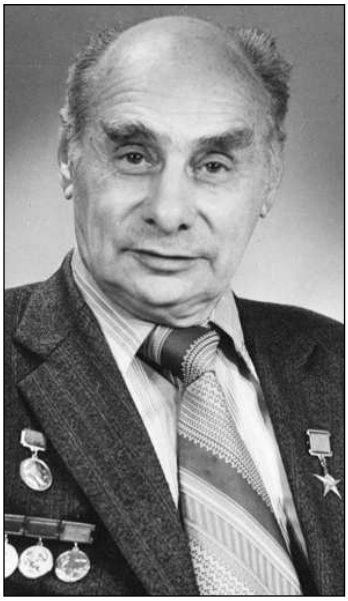
С начала 1939 года Г.Н. Флёров начал под руководством И.В. Курчатова заниматься изучением деления ядер урана. Уже в первых работах, выполненных им совместно с Л.И. Русиновым, был измерен коэффициент размножения нейтронов и установлено, что тепловыми нейтронами делится легкий изотоп урана с массовым числом 235. Полученные результаты показывали, что на природном уране, обогащенном легким изотопом, возможна цепная реакция деления.

Следующая работа Флёрова, выполненная им совместно с К.А. Петржаком, привела к открытию нового явления — спонтанного деления ядер. Вот как об этом вспоминает К.А. Петржак: «Начиная свои опыты, мы не ставили целью открытие спонтанного деления, а искали энергетический «порог» деления урана. То есть хотели выяснить, как зависит процесс деления от энергии нейтронов. В нашем распоряжении была обычная ионизационная камера и обычная по тем временам регистрирующая радиоаппаратура, смонтированная собственноручно <...>.

В каждом приличном опыте положено прежде всего смотреть нулевой эффект. То есть узнать, что дают измерения при отсутствии возбудителя процесса, в нашем случае — источника нейтронов.

И всякий раз, когда измеряли нулевой эффект, он не был равен нулю: камера нет-нет да и щелкнет!».

Чтобы избежать возможных источников помех опыты вначале перенесли из Радиевого института в Физтех, а затем (по специальному разрешению наркома путей сообщения) на станцию метро «Динамо» в Москве. «Глубина станции — около 60 метров <...>. В таких условиях космический фон уменьшался на 95 %. Работали в основном ночью: тихо, никто не мешает, да и мы никому. Поезда не искрят <...>. На «Динамо» повторили все, что делали на уровне моря. Эффект был! За сороковой год все закончили, и Иоффе телеграфом послал наше сообщение в «Physical Review». В 1946 году за открытие явления самопроизвольного распада урана К.А. Петржаку и Г.Н. Флёрову была присуждена Сталинская премия второй степени.



Г.Н. Флёров

Статья Флёрова и Петржака стала одной из последних опубликованных работ по делению ядер. Вскоре все работы по атомной тематике были засекречены — начиналась война.

С началом Великой Отечественной войны работы курчатовской школы были остановлены. Курчатов и Александров ушли на флот. К.А. Петржак стал зенитчиком. Флёров записался в народное ополчение. Однако вместо ополчения его послали на курсы инженеров по спецобслуживанию бомбардировщиков Пе-2 и в декабре 1941 года присвоили звание техника-лейтенанта.

Несмотря на военное время, Г.Н. Флёров продолжал интересоваться урановой проблемой. Обнаружив отсутствие в американских научных журналах публикаций на эту тему, Флёров забил

Курсант Г.Н. Флёров. 1941 год

тревогу. В декабре 1941 года он пишет Курчатову о необходимости возобновления работ по делению. Направляет письмо в Академию наук, а в апреле 1942 года — И.В. Сталину. В письме к Сталину, в частности, уже содержалась идея взрывного устройства с одной подвижной урановой полусферой, которая в дальнейшем была реализована в устройстве РДС-2.

Трудно сказать, что больше повлияло на решение правительства — письмо Флёрова или данные внешней разведки, но работы по созданию ядерного оружия начались. В конце 1942 года И.В. Курчатов возглавил атомный проект СССР. К этому времени Г.Н. Флёров был отозван из армии и работал младшим научным сотрудником в Физико-техническом институте в Казани.10 марта 1943 года И.В. Курчатов официально был назначен руководителем работ по использованию атомной энергии. Через месяц, 12 апреля, было издано распоряжение АН СССР о создании Лаборатории № 2 АН СССР, 14 августа был издан приказ по казанской группе ЛФТИ, определяющий состав Лаборатории № 2 во главе с И.В. Курчатовым.

В 1943 году Г.Н. Флёрову была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации, и он бы переведен в Лабораторию № 2 старшим научным сотрудником, а в 1945 году назначен начальником сектора.

Первоначально работы по атомной проблеме велись в Москве. По поручению Курчатова Г.Н. Флёров (совместно с В.А. Давиденко) приступил к изучению резонансного захвата нейтронов в процессе их замедления. Эксперименты велись в здании Института общей и неорганической химии на Большой Калужской улице. Вслед за этим Флёров и Давиденко экспериментально доказали эффективность блочного распределения вещества в замедлителе. Эти и некоторые другие работы, выполненные Флёровым в военное время, наряду с работами других ученых, позволили определить основные черты и параметры ядерных реакторов.

В начале 1948 года Г.Н. Флёров возглавил лабораторию № 9 [9] в КБ-11 (в Арзамасе-16), в задачу которой входило определение критической массы урана и плутония. Летом 1949 года Флёров выехал в г. Кыштым Челябинской области, где к тому времени заработал промышленный реактор, давший необходимое (пока только по расчетам) количество плутония. Вдвоем со своим сотрудником Флёров провел свой первый и самый рискованный эксперимент по определению критической массы плутония. В этом опыте ученые рисковали не только своими жизнями, что в то время было «нормальным» явлением, но и всем запасом оружейного плутония! В последующие годы Г.Н. Флёров неоднократно повторял эти исследования.

Вот как описывает один из таких экспериментов его ученик С.М. Поликанов: «Наши опыты выглядели очень просто. Кажется, даже чересчур просто. Для начала мы делали что-то вроде слоеного пирога. Пластина из плутония — пластина из полиэтилена, пластина из плутония — пластина из полиэтилена ... Все это закреплялось на устройстве вроде домкрата, которым пользуются автомобилисты при замене колеса. Как у каждого домкрата, у нашего была ручка, которую надо было крутить. Флёров не доверял эту операцию ни мне, ни Кутикову. Ручка медленно поворачивается, наш «пирог» медленно вползает в урановый цилиндр, а мы прислушиваемся. Динамик в углу комнаты молчит. Значит, надо добавить еще плутониевую пластину и, конечно, полиэтиленовую. Динамик попрежнему молчит. Добавим плутония еще. Главное — терпение. Наконец динамик начинает слегка постукивать. Внимание! Мы приближаемся к критической массе. Теперь нужна предельная осторожность. Важно, чтобы не нача-

лась неуправляемая цепная реакция. Если это случится, беда — и скорее всего непоправимая. Шаг за шагом мы приближаемся к критической массе. Занимаясь этим, мы не только слушаем динамик, мы рисуем в лабораторном журнале крестики. Из них складывается линия. Мысленно продолжая ее, мы догадываемся, когда должна начаться цепная реакция. Тогда динамик словно взбесится и с каждой секундой начнет учащать свой стук. С этого момента наша «игрушка» перестанет нам подчиняться. С секундомером в руках мы, убежав за бетонную стенку, следим за убыстрением барабанной дроби динамика. Через минуту он начнет выть, но мы этого не допустим. Для этого надо будет дернуть за тоненький тросик. Произойдет чудо — в урановом цилиндре откроется дверка и наступит тишина».

29 августа 1949 года на Семипалатинском полигоне был осуществлен взрыв первого советского плутониевого заряда («РДС-1»). В этот день Г.Н. Флёров отвечал за измерение нейтронного фона. Для этой цели им были сконструированы дистанционные счетчики, позволившие получать информацию непосредственно в командном бункере. «Рядом, — вспоминает И.Н. Головин, — Курчатов и другие участники работы. Игорь Васильевич и Георгий Николаевич наблюдают сколько импульсов от нейтронов регистрируется за минуту. Пока все благополучно. Неожиданно за две минуты до взрыва фон нейтронов удвоился и возросла вероятность хлопка вместо взрыва. Флёров с Курчатовым тревожно переглянулись, но оставили все как есть. Пошел счет секунд: 2, 1, пуск! Курчатов резко повернулся к открытой двери. Небо уже померкло на фоне освещенных холмов и степи. Курчатов бросился вон из каземата, Флёров за ним». Как известно, испытания прошли удачно, ядерная монополия США была нарушена.

После удачного испытания первого советского ядерного устройства 29 октября 1949 года появились секретное Постановление Совета Министров СССР № 5070–1944 сс/оп «О награждении и премировании за выдающиеся научные открытия и технические достижения по использованию атомной энергии», а также Указ Президиума Верховного Совета СССР «О присвоении звания Героя Социалистического Труда научным, инженерно-техническим и руководящим работникам научно-исследовательских, конструкторских и промышленных предприятий» с грифом «Не подлежит опубликованию». Полный текст Постановления и Указа приводится [1] в книге «Атомный проект СССР». Здесь мы приводим только содержание пункта 62 Постановления, касающегося Г.Н. Флёрова:

«Флёрова Георгия Николаевича, кандидата физико-математических наук, руководящего работами по определению критических масс заряда атомной бомбы:

- Представить к присвоению звания Героя Социалистического Труда.
- Премировать суммой 150 000 рублей.
- 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 него, его жены и до совершеннолетия для его детей) на бесплатный проезд железнодорожным, водным и воздушным транспортом в пределах СССР.»

Г.Н. Флёров единственный из начальников лабораторий КБ-11 получил «полный комплект наград» наряду с Ю.Б. Харитоном, К.Н. Щёлкиным, Л.Н. Духовым и Я.Б. Зельдовичем.

В послевоенные годы Г.Н. Флёров продолжает изучение деления ядер, проводит цикл экспериментов по изучению делящей компоненты космических лучей. Много внимания он уделяет практическому использованию достижений ядерной физики. С 1951 года в течение ряда лет в Московском нефтяном институте под его руководством создается аппаратура для нейтронного и гамма-каротажа нефтяных пластов, разрабатывается оригинальный метод импульсного нейтронного каротажа. В этом же году в ЛИПАН-е (Институт атомной энергии АН СССР) Г. Н. Флёров защитил докторскую диссертацию. В 1953 году он был избран членом-корреспондентом, а через 15 лет, в 1968 году — действительным членом АН СССР.

Однако, как только представилась возможность, Г.Н. Флёров возвращается к фундаментальным исследованиям по физике ядра. В 1956–

1957 годах Флёров — начальник сектора Института атомной энергии. В этом же секторе работает и его старший брат Николай. Теперь его интересует синтез и изучение новых трансурановых элементов. Момент для начала работ был выбран чрезвычайно удачно — старые методы синтеза трансуранов, долгое время успешно применявшиеся американцами, исчерпали себя. Для продвижения в трансфермиевую область нужны были новые методы синтеза — использование пучков тяжелых ионов.

Для проверки своей идеи Флёров на ускорителе Института атомной энергии ставит свой первый опыт на ионных пучках. «На металлический стержень, — вспоминает С.М. Поликанов, — мы закрепили кусочек платины и вдвинули его внутрь циклотрона. После этого техники приступили к хорошо им знакомой процедуре настройки циклотрона, но на сей раз вместо баллона с водородом подсоединили баллон с кислородом <...> Стрелка прибора, показывающего высокое напряжение, поползла вправо, <...> наконец, пришло время вынимать платину. По ее виду ничего не скажешь. Кладем платину на прибор, регистрирующий радиоактивность, и ждем. Ура! Та самая радиоактивность, которая нам нужна, есть! Из платины мы сделали другой химический элемент — астат. Опыт прошел успешно, теперь можно заняться алхимией». Успех участники эксперимента отметили шампанским, купленным в ближайшем к институту магазине.

И.В. Курчатов и Г.Н. Флеров.
Конец 50-х годов

По поручению И.В. Курчатова Флёров формулирует условия, при которых работы по синтезу могли бы развиваться быстрее, чем в США. Вспоминает Г.Н. Флёров: «Требовалось многое. Новый циклотрон, способный давать мощные пучки ускоренных до десятой доли скорости света ядер углерода, азота, неона. Надежный плазменный источник многозарядных ионов с рекордной интенсивностью, в десятки раз превосходящей достигнутой в США. По нашим расчетам получалось: у такого циклотрона трехметровые полюса, а вес магнита более двух тысяч тонн!

И еще. Были необходимы тяжелые трансурановые мишени: изотопы плутония с атомным весом 242, 244. Тяжелые изотопы америция, кюрия, берклия, калифорния.

Нельзя было обойтись без новых конструкций мишеней, способных выдерживать громадные тепловые и радиационные нагрузки, без разделенных тяжелых изотопов неона, кислорода, бора».

Громадный научный и технический потенциал, накопленный нашей страной с 1939 года, и, что не менее важно, активная поддержка И.В. Курчатова позволили решить все эти задачи. Летом 1960 года в Дубне, в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР), которую с 1957 года возглавлял Г.Н. Флёров, вошел в строй большой циклотрон многозарядных ионов У-300. Интенсивность создаваемых с его помощью ионных пучков в несколько десятков раз превосходила интенсивность лучших ускорителей мира. Сегодня принято считать, что с пуском У-300 возникло новое направление ядерной физики — физика тяжелых ионов.

Седьмого февраля 1960 года скончался И.В. Курчатов. Потеряв уважаемого и любимого учителя и руководителя, Г.Н. Флёров теперь сам становится во главе созданной им в ЛЯР международной школы физиков и химиков-ядерщиков. Исследования, выполненные Г.Н. Флёровым и его сотрудниками, привели к синтезу новых химических элементов с атомными номерами 102–109. Кроме этого, в процессе синтеза далеких трансурановых элементов под руководством Г.Н. Флёрова в ЛЯР был сделан ряд ярких открытий: явление запаздывающего деления (1966–1967), спонтанное деление ядер из возбужденного состояния (1962) и ряд других эффектов.

Однако в процессе работы ученые ЛЯР столкнулись со многими принципиально новыми трудностями. Из-за короткого времени жизни и чрезвычайно малого выхода реакций синтеза новых ядер, а также из-за возникновения «побочных» радионуклидов идентификация новых элементов оказалась очень трудным делом. Как следствие, при синтезе каждого нового элемента появлялись сомнения в достоверности открытия. Кроме того, открытия часто происходили практически одновременно в нескольких лабораториях. Поэтому практически по каждому открытию возникали долгие приоритетные споры, отравлявшие жизнь Флёрову и его ученикам. Только в 1991 году международная комиссия под руководством Д. Вилкинсона, созданная по решению ИЮПАП (международный союз чистой и прикладной физики) и ИЮПАК (аналогичный союз химиков), после консультаций с основными участниками работ признала за Г.Н. Флёровым и его коллегами приоритет в открытии элементов 102, 103–105 (совместно с исследователями из Беркли) и 108 (совместно с Дармштадтом).

19 ноября 1990 года Георгий Николаевич Флёров, до последних дней жизни занимавшейся научной деятельностью, скоропостижно скончался в Дубне . Похоронен Г.Н. Флёров на Новодевичьем кладбище в Москве. Именем Флёрова названа Лаборатория ядерных реакций и улица в Дубне, на которой он жил. В 2006 году имя академика Флёрова было присвоено лицею № 6 г. Дубны. В 2008 году, в 95-ю годовщину со дня его рождения, в начале улицы, названной его именем, был установлен памятник Георгию Флёрову.

После смерти Г.Н. Флёрова ЛЯР возглавил его ученик Ю.Ц. Оганесян. Под его руководством в лаборатории были синтезированы изотопы элементов с порядковыми номерами 110, 112, 114–116 и 118. А совсем недавно и 117. Некоторые из этих элементов имеют время жизни порядка минуты, что подтвердило гипотезу о существовании острова стабильности в области сверхтяжелых элементов. Таким образом, цель, к которой стремился все последние годы жизни Г.Н. Флёров, была осуществлена в созданной им лаборатории его учениками.

В 2011 году Международный союз теоретической и прикладной химии предложил назвать один из открытых в Дубне элементов (№ 114) в честь Г.Н. Флёрова Флёровием (Fl). Окончательное решение должно быть принято в 2012 году.

БАЙКИ О Г.Н. ФЛЁРОВЕ

Г. Н., да вы бандит!

Рассказывают, что эта фраза принадлежит академику Векслеру. Трудно сказать, что послужило поводом к этому, но известно, что Флёров очень гордился такой характеристикой. С этой историей тесно связана следующая байка. Однажды ученый секретарь ОИЯИ вычеркнул одну из научных тем Флёрова из тематического плана института. Узнав об этом, Георгий Николаевич ворвался в кабинет ученого секретаря и на его глазах разорвал «отредактированный» план на мелкие клочки. Самое забавное в этой истории то, что сам рассказчик выражает сомнение в ее достоверности, поскольку ***ни один ученый секретарь*** никогда бы не посмел вычеркнуть ни одну тему ***Флёрова***!

Трансураны надо делать чистыми руками!

Рассказывают, что однажды во время отпуска один молодой сотрудник ЛЯР завел курортный роман. После его возвращения в Дубну дама его сердца последовала за ним. Настойчивость этой дамы настолько испугала молодого физика, что он вынужден был оставаться ночевать в лаборатории. Об этом стало известно Флёрову. Георгий Николаевич вызвал физика к себе и довольно долго «учил его жизни». Наконец, по-видимому, устав, Флёров произнес фразу, которая затем очень часто повторялась в Дубне: «Да дайте же ей денег!»

Ложь во благо

По роду своей деятельности Георгию Николаевичу часто приходилось общаться с крупными чиновниками. Рассказывая об этом, он любил повторять: «Чиновнику о физике нужно рассказывать не так, как правильно, а так как им удобно. Это ложь во благо!»

Г. Н., работайте спокойно

В одном из разговоров с Н. С. Хрущевым Флёров пообещал к очередному съезду КПСС получить новый (104) элемент. На что Хрущев не без юмора ответил: «Работайте, Георгий Николаевич спокойно. Откроете — созовем внеочередной съезд!»

Физику нужно чувствовать животом!

Рассказывают, что однажды в комнату, где Флёров с сотрудниками проводил измерения критической массы плутония, зашел один из руководителей проекта — Б.Л. Ванников. Когда Ванников вплотную приблизился к испытательному стенду, динамик, со-

единенный со счетчиком нейтронов, резко затрещал. Оказалось, что толстый живот Ванникова с точки зрения физики представлял водородсодержащую среду, эффективно отражавшую нейтроны. С тех пор Георгий Николаевич любил повторять: «Физику нужно чувствовать даже животом!».

Молодой человек, бегаете вы хорошо! А что умеете еще?

Рассказывают, что И.В. Курчатов впервые обратил внимание на молодого Георгия Флёрова, недавно появившегося в Физтехе, когда тот раз за разом пробегал мимо его кабинета с облученными образцами. Этого требовали условия опытов. Несколько устав от надоевшей ему беготни, Курчатов спросил Флёрова: «Молодой человек, бегаете вы хорошо! А что вы умеете еще?». Вскоре выяснилось, что молодой сотрудник способен на многое.

Эти, как их там, опыты

Георгий Николаевич очень любил театр. Одно время он очень любил театр на Таганке. В трудное для театра время оказывал весомую помощь. Однако со временем все чаще и чаще начал давать советы главному режиссеру Любимову. Наконец тот не выдержал и заявил Флёрову: «Господи! Почему вы учите меня ставить спектакли? Я же не учу вас, как ставить эти ваши, как их там, опыты!». После этого конфликта Георгий Николаевич предпочитал ходить в «Театр у Никитских ворот».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атомный проект СССР. Документы и материалы: в 3-х т. Т. 2. Атомная бомба 1945— 1954, кн. 1 [Текст].— Москва— Саров: Наука— Физматлит, 1999.— 791 с.

2. Воспоминания об Игоре Васильевиче Курчатове [Текст] / Сост. Р.В. Кузнецова, П.М. Чулков.— М.: Наука, 1988.— 486 с.

3. Георгий Николаевич Флёров [Текст]: Биобиблиографический сборник / Дубна, 1973.— 66 с.

4. Георгий Николаевич Флёров (К шестидесятилетию со дня рождения) [Текст] / А.П. Александров и др. // УФН.— 1973.— Т. 109. № 3.— С. 617–619.

5. Георгий Николаевич Флёров (К семидесятилетию со дня рождения) [Текст] / Я.Б. Зельдович и др. // УФН.— 1983.— Т. 139, № 3.— С. 553, 554.

6. К памяти Георгия Николаевича Флёрова [Текст] / А.П. Александров и др. // УФН.— 1991.— Т. 161, № 3.— С. 173— 175.

7. К 80-алетию со дня рождения академика Г.Н. Флёрова [Текст] // Вестник РАН.— 1993.— Т. 63, № 3.— С. 207— 222.

8. **Смелов, В.А.** Политехники— кавалеры Золотой Звезды [Текст] / В.А. Смелов.— СПб. : Изд-во СПбГПУ. 139 с.

9. **Щелкин, Ф.К.** Апостолы атомного века. Воспоминания, размышления [Текст] / Ф.К. Щелкин.— М.: ДеЛи принт, 2003.— 162 с.

УДК 929:669:378.1

А.И. Демидов

МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПАВЛОВ В ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ (к 150-летию со дня рождения)

В мае 1904 года профессор Екатеринославского высшего горного училища Михаил Александрович Павлов (1863–1958) получил письмо от декана Металлургического отделения Санкт-Петербургского политехнического института Николая Александровича Меншуткина (1842–1907) следующего содержания: «Многоуважаемый Михаил Александрович! Позвольте сообщить Вам, что доклад у г. Министра о присуждении Вам звания почетного адъюнкта металлургии уже состоялся, и вчера ⟨8 мая — *А.Д.*⟩ Вы единогласно избраны в ординарные профессора по металлургии. Сообщая Вам об этом, прошу меня уведомить, утверждаете ли Вы все сделанные шаги, так как на последние мои письма Вы не удостоили меня ответом» [1].

В первых числах сентября 1904 года М.А. Павлов появился в Политехническом институте, где встретился с деканом Металлургического отделения профессором Н.А. Меншуткиным [2], который показал предназначенную для Павлова квартиру № 43 [3], расположенную в химическом павильоне.

В Петербург М.А. Павлов приехал перед самым началом занятий, поэтому должен был начать чтение лекций прежде, чем познакомился с персоналом института, заведенными в нем порядками, и даже раньше, чем окончательно устроился в своей квартире. Курс «Металлургия чугуна» по учебному плану начинался на третьем курсе и продолжался целый год [2].

Из воспоминаний инженера В.И. Котова [4]: «Читал курс Михаил Александрович быстро (более 120 слов в минуту), излагал материал предельно сжато, к тому же нередко писал формулы и реакции на доске, не прерывая чтения. Трое моих товарищей и я, желая взять все из лекций М.А. Павлова, условились, что один из нас будет ловить и записывать мысль каждой фразы, другой — списывать с доски, третий — пытаться, сократив слова, записать все, что говорилось, а четвертый — тщательно срисовывать чертежи и эскизы с доски, а также из вывешиваемых пособий (чертежи, снимки, кальки).

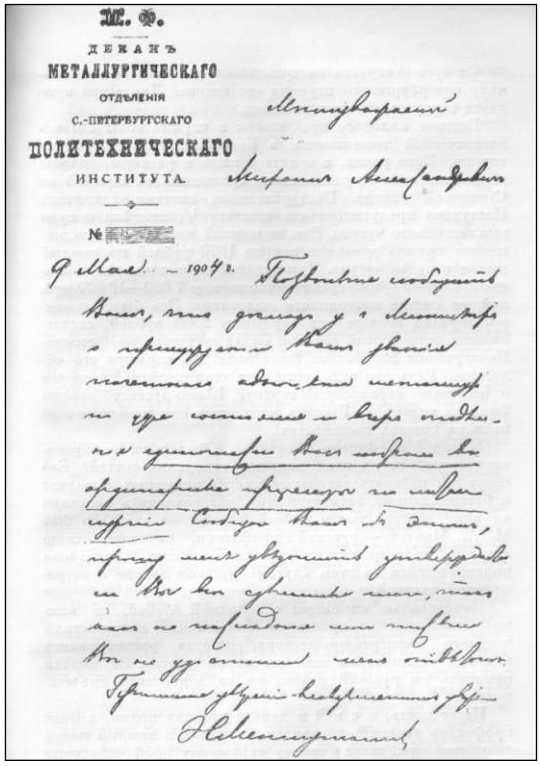
После обработки двух первых лекций нам пришлось отказаться от этого метода, так как материалы каждой лекции приходилось обрабатывать по четыре часа, а для этого у нас не было времени; кроме того, мы не были уверены, что справимся с этой работой, да и сомневались, насколько она полезна. Пришлось слушать и записывать лекции каждому для себя».

Однако среди студентов нашлись лица, которые сумели составить записи лекций. Профессор М.А. Павлов взял на себя труд просматривать и исправлять эти записи [2], которые были изданы кассой взаимопомощи студентов Политехнического института [5].

Студенты знали, что у профессора Павлова можно сдать экзамен только в случае, если он заговорит в то время, когда студент отвечает, если же экзаменатор не заговорит, то экзамен кончается словами: «Всего этого недостаточно, курса не знаете, придется еще недели три почитать» [4].

В следующем учебном году М.А. Павлов читал два курса — «Металлургия чугуна» для студентов третьего курса и «Металлургия стали» для студентов четвертого курса, проводил практические занятия, раздавал студентами дипломные задания и ездил с ними на экскурсии по заводам. Экскурсии продолжались около месяца, и для этой цели железные дороги предоставляли отдельный вагон третьего класса, который подавался обычно прямо в завод [1].

В дипломное проектирование как по металлургии чугуна, так и по металлургии стали входила общая часть: расчет всех печей и прокатных станов, затем — задание по специальности: доменщикам — проработать расчет доменного цеха завода; будущим специалистам по стали — расчет мартеновских печей и бессемеровских кон-


ДЕКАНЪ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАГО
ОТДѢЛЕНІЯ
С.-ПЕТЕРБУРГСКАГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКАГО
ИНСТИТУТА.

Факсимиле письма Н.А. Меншуткина М.А. Павлову

верторов. При этом М.А. Павлов давал задание спроектировать не какой-то воображаемый завод, а работающий в реальных условиях [2].

Занятия по курсу «Металлургия стали» М.А. Павлов проводил до 1908–1909 учебного года, когда при его содействии профессором кафедры металлургии Политехнического института был избран выдающийся русский инженер Владимир Ефимович Грум-Гржимайло (1864–1928) (член-корреспондент АН СССР с 1927 года), который и стал проводить занятия по вышеуказанному курсу [6].

В 1906 году деканом металлургического отделения был избран профессор Франц Юльевич Левинсон-Лессинг (1861–1939) — выдающийся российский геолог и петрограф (академик АН СССР с 1925 года) [7]. М.А. Павлов писал о Ф.Ю. Левинсоне-Лессинге [2]: «Ф.Ю. Левинсон-Лессинг был спокойным, тихим человеком, поведение которого хорошо определялось словом «корректный». Он был одинаково корректен и с высшим педагогическим персоналом, и с низшим, и со студентами, и со служащими института. За много лет совместной работы на одном отделении я никогда не видел его говорящим с кем-нибудь раздраженно или резко.

Ф.Ю. Левинсон-Лессинг был весьма авторитетным представителем своей науки (геологии) и опытным в академических делах профессором. Он навел порядок в делах металлургического отделения и с успехом представлял его в правлении и Совете института.

Однако, не зная ни металлургического производства, ни заводов, ни их персонала, он затруднялся вести с ними сношения, а это необходимо для декана металлургического факультета.

Выход из положения был найден: выбирая его деканом, одновременно избрали секретарем меня».

В декабре 1907 года на заседании Совета института М.А. Павлов был избран профессором-заведующим студентами [8].

Как отмечал М.А. Павлов в «Воспоминаниях...» [2]: Профессор-заведующий студентами — титул, специально изобретенный для Политехнического института. Это, собственно говоря, не что иное как инспектор. Но так как слово «инспектор» стало наименованием одиозным, то в «Положении» о Санкт-Петербургском политехническом институте его заменили другим. Было даже намерение совсем уничтожить эту должность, но этому препятствовало то, что при институте были общежития для студентов, и поэтому кто-то должен был заниматься различными студенческими делами, связанными с пребыванием в общежитиях. Эта обязанность и ложилась на профессора-заведующего студентами, который являлся своего рода посредником между студентами, жившими при институте, и правлением, состоявшим из директора и деканов. Должность профессора-заведующего студентами была предусмотрена штатами».

Время было тревожное. Утром 24 марта 1908 года профессор-заведующий студентами М.А. Павлов показал директору института профессору И.В. Мещерскому объявление о том, что вечером состоится обсуждение реферата «История развития социалистических партий в России». Днем они вывесили объявление об отмене собрания по распоряжению директора, но к семи часам стала собираться публика. Она собиралась в одной из аудиторий. На приказание М.А. Павлова разойтись никто не отреагировал.

Пришел сам директор и дал 10 минут, чтобы покинуть аудиторию. Пришлось вызвать полицию. Она явилась и переписала всех 66 участников собрания, из которых 31 были посторонними для института. Троих отвели в участок и оттуда отпустили [8].

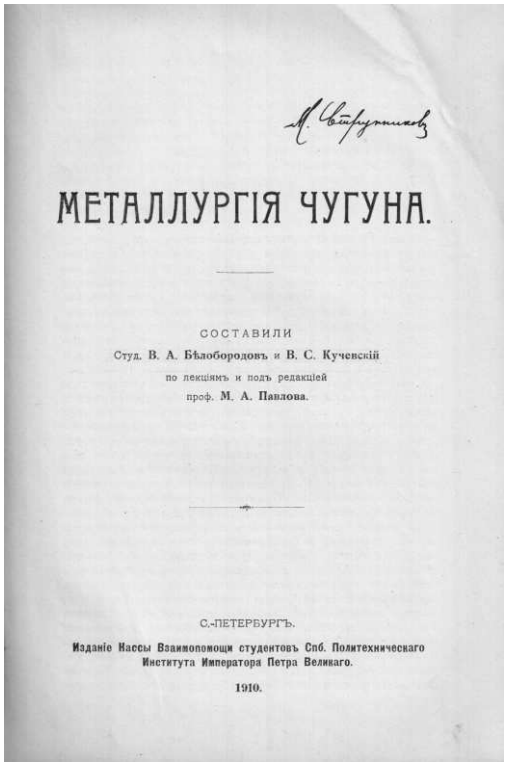
21 сентября 1908 года Совет Политехнического института принял обращение к студентам:

«Тревожное настроение, овладевшее учащимися высших учебных заведений, отозвалось в стенах С.-Петербургского Политехнического Института и грозит выразиться в форме прекращения учебных занятий. Признавая автономный строй высших школ необходимым условием их процветания, а заботу об его охране и укреплении — одной из важных своих задач, Совет считает своим долгом заявить, что по его глубокому убеждению прекращение учебных занятий принесет несомненный вред интересам высшей школы. Поэтому Совет убедительно просит г.г. студентов приложить все усилия к сохранению того спокойного течения академической жизни, которое установилось за последние годы».

24 сентября Совет был информирован, что его обращение к студентам не возымело силы, забастовка началась [8]. 29 сентября не состоялась ни одна лекция. В коридорах полно студентов, но в аудиториях, лабораториях и чертежных их нет. Профессор-заведующий студентами М.А. Павлов заявил, что большинство студентов, особенно с инженерных отделений, где учиться очень трудно, — за прекращение забастовки. Продолжали работать над дипломными работами только студенты-дипломники. Уезжали из столицы лишь первокурсники и студенты-евреи, ожидавшие выселения. Профессор Павлов полагал, что через два-три дня занятия возобновятся.

10 октября состоялась разрешенная И.В. Мещерским общестуденческая сходка. Собрались около 1100 человек. В числе ораторов был представитель только что образовавшегося академического союза, которого встретили свистом. За продолжение забастовки проголосовали 106 человек, за ее прекращение — 932, 33 студента воздержались. Все время за сходкой с балкона наблюдал профессор-заведующий студентами М.А. Павлов.

В распоряжение профессора-заведующего студентами правление Политехнического института обычно предоставляло ежемесячно небольшую сумму для выдачи студентам на случай различных экстраординарных происшествий: похорон, болезней, увечий, потерь и пр.[1]. В этих случаях профессор-заведующий студентами имел право дать просителю в долг или безвозвратно некоторую, конечно, очень небольшую, сумму, далеко не соответствующую студенческим нуждам.



М. Свѣрушковъ

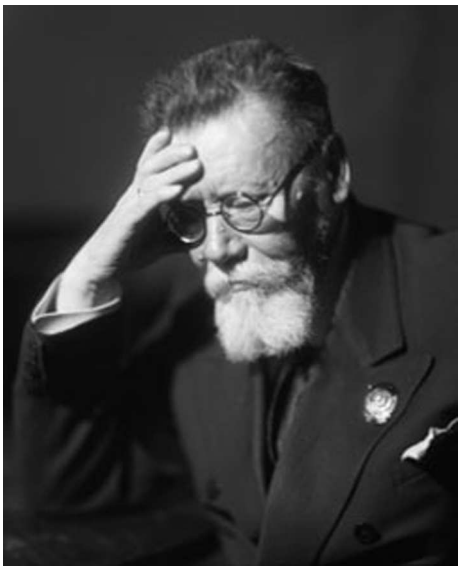
МЕТАЛЛУРГІЯ ЧУГУНА.

СОСТАВИЛИ
Студ. В. А. Бѣлобородовъ и В. С. Кучевскій
по лекціямъ и подъ редакціей
проф. М. А. Павлова.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Изданіе Кассы Взаимопомощи студентовъ Спб. Политехническаго Института Императора Петра Великаго.
1910.

Факсимиле титульного листа книги М.А. Павлова Металлургия чугуна»

30 сентября 1909 года комиссия Совета в составе А.С. Посникова, директора института, профессоров М.А. Павлова, В.В. Скобельцына и А.Г. Гусакова предложила изменить систему распределения пособий недостаточным студентам [8]. Пока 28 тысяч рублей разделялись на мелкие, от 10 до 2 рублей пособия, которые не приносили, по мнению профессоров, никакой пользы. Лучше образовать примерно 80 стипендий по 300 рублей в год, причем стипендии эти должны быть возвращаемы по окончании курса. И еще примерно 2000 рублей надо оставлять на выдачу пособий в исключительных случаях (например, тяжелая болезнь). Самый сложный во-



М.А. Павлов — профессор Петербургского политехнического института

прос — в гарантии возврата денег. Ведь векселя от несовершеннолетних брать нельзя. Решили делать надписи о долге в дипломе. А если студент покидал институт без диплома? Возвращенные деньги должны были пополнять стипендиальный фонд.

3 марта 1910 года член Государственной думы В.М. Пуришкевич выступил на заседании Думы с наглыми и клеветническими нападками на деятельность академического профессорского союза, совета старост Университета. Разгорелся настолько крупный скандал, что заседание Думы было прервано.

10 марта студенты просили разрешить им сходку по обсуждению работы кассы взаимопомощи [8]. Собрание было разрешено на 10 марта в 6 часов вечера. Однако в 12 часов дня около 270 студентов (в их числе были представители других институтов) собрались в чертежной. Профессор-заведующий студентами М.А. Павлов в 11 утра вывесил объявление о том, что именно это собрание не разрешено и в случае его начала будет вызвана полиция. Собрание началось, профессор стал уговаривать студентов разойтись. Его освистали. Явилась полиция, пристав сразу пошел в чертежную. Его тоже не слушали. Тогда был вызван резерв. Двери чертежной закрыли и стали переписывать всех участников. Пристав пообещал разорвать списки, если студенты разойдутся. Так он и сделал.

Вечером, в шесть часов, состоялась разрешенная сходка. Сначала придерживались заявленной повестки дня, а потом перешли на другие темы. Президиум сходки сложил с себя полномочия, тогда избрали другой. Вынесли неодобрительную резолюцию по поводу действий директора, обсудили скандал в Думе и деятельность академистов в институте. Профессор М.А. Павлов явился на сходку и несколько раз призывал студентов разойтись.

17 марта Совет института заслушал доклад директора об обоих собраниях и признал принятые меры совершенно правильными.

Секретарем металлургического отделения и профессором-заведующим студентами М.А. Павлов был до апреля 1910 года, когда он был избран деканом отделения [8]. Деканом металлургического отделения, позднее металлургического факультета, Михаил Александрович пробыл долго — около 18 лет (1910–1912, 1915–1930).

Давая краткую характеристику преподавания на металлургическом отделении, М.А. Павлов писал [9]: «Обращаясь к общей характеристике учебного плана отделения, нужно сказать, что в преподавании основных наук — математики, теоретической механики, физики, общей химии — почти не замечается разницы между металлургическим и другими отделениями Института (кроме кораблестроительного); что же касается технических предметов, играющих роль вспомогательных, то они преподаются по той приблизительно программе, какая признается у нас в России необходимой для всякого инженера вообще, но, как и на других технических отделениях Политехнического института, особенностью преподавания этих, как и теоретических, предметов является всеобщее применение практических упражнений, как графических, так и чисто-расчетного или, наконец, лабораторного характера.

К специальным целям отделения приноровлено преподавание тех предметов, которые не входят в учебные планы других технических отделений Института.

К ним, прежде всего, нужно отнести: минералогию, геологию и петрографию, изложение которых необходимо, конечно, для понимания

специального курса — учения о рудных месторождениях, но далеко не играет служебной роли, т. к. охватывает обширный круг сведений и сопровождается лабораторными занятиями по минералогии и петрографии, обязательными для всех студентов отделения.

Вполне естественно ожидать, что на металлургическом отделении широко поставлено преподавание химии, но для характеристики учебного плана нужно отметить, что физическая химия, усвоение которой необходимо для понимания сущности заводских процессов, представлена в Политехническом институте самостоятельной кафедрой с хорошо оборудованной лабораторией, в которой ведутся обязательные для студентов обоих подотделов (металлургического и электрохимического) работы и выполняются дипломные исследования.

Преподавание аналитической химии на металлургическом отделении Политехнического института представляет по сравнению с другими специальными заведениями ту особенность, что оно преследует самостоятельные задачи и непосредственно не связано с выполнением работ по техническому анализу, техническим анализом студенты занимаются в 3-х других лабораториях, именно: горнозаводского анализа, минеральной технологии и органической технологии. Впрочем, в последней занятия обязательны лишь для студентов электрохимического подотдела, которые слушают курс органической химии, сопровождающейся практическими работами в лаборатории, чего не делают студенты-металлурги, для которых органическая химия является необязательным предметом.

Через лабораторию горнозаводского анализа проходят лишь студенты металлургического подотдела, а занятия в лаборатории минеральной технологии являются обязательными только для студентов-электрохимиков. Характер работ, выполняемых в этих лабораториях, обрисован в описании отдельных лабораторий.

Преподаванию металлургии отведено учебным планом металлургического отделения весьма много времени, едва ли не больше, чем в каком-либо другом из технических заведений. Теоретические курсы читаются тремя профессорами металлургии и одним преподавателем; практические занятия ведутся в 3-х отделениях металлургической лаборатории (металлографии, общей металлургии, горнозаводского анализа) и в лаборатории прокатного дела, а упражнения расчетного характера — по курсам производства чугуна, железа и стали.

Курсы металлургии в полном объеме, со всеми практическими упражнениями и лабораторными занятиями, обязательны лишь для студентов металлургического подотдела; студенты-электрохимики, усваивая полностью курсы металлографии, общей металлургии, металлургии других, кроме железа, металлов и проходя через два отделения металлургической лаборатории (общей металлургии и металлографии), слушают сокращенный курс металлургии железа (излагаемый одним профессором, а не двумя), но тоже исполняют практические упражнения вычислительного характера по металлургии железа (расчет шихт, определение размеров металлургических печей).

Взамен сокращенной части металлургии студенты электрохимического подотдела слушают более подробные курсы физической химии, теоретической электрохимии, минеральной технологии и технической электрохимии, имея и большее число часов лабораторных занятий по этим предметам. Только для них является обязательным курс органической технологии, прохождение которого тоже сопряжено с выполнением лабораторных работ.

Нужно также упомянуть, что студенты металлургического подотдела слушают специальные курсы заводских и газовых машин, необязательные для студентов-электрохимиков, т. к. эти последние проходят прикладную механику по сокращенной программе («машиноведение»).

Наконец, в заключение этой краткой характеристики плана преподавания следует указать, что правилами отделения требуется от каждого студента практическое знакомство с металлургическими производствами, приобретаемое путем изучения их в течение 3-х летних каникул на заводах. Несмотря, однако, на содействие администрации многих частных и казенных горных заводов, в последнее время не удается разместить на летние практические работы всех студентов отделения, имеющих достаточную теоретическую подготовку. Поэтому самостоятельные и длительные занятия на заводах заменяются для части надлежаще подготовленных студентов ежегодными экскурсиями на заводы разных металлургических районов, организуе-

мыми под непосредственным руководством профессоров и преподавателей отделения».

В период первой мировой войны (1914–1918 годы) институт постепенно замирал, так как многие студенты были призваны на военную службу и их оставалось все меньше и меньше. Как вспоминает М.А. Павлов [2]: «Очень много учеников отняла первая же мобилизация, а всего за время войны я лишился больше половины дипломников. Они приходили прощаться и оставляли в моем кабинете начатые дипломные проекты, потому что где же еще было их оставить?

Когда война кончится, мы придем и окончим проекты, — так они говорили, но после империалистической войны началась гражданская. Вернуться и кончить пришлось немногим. Некоторые из моих учеников писали мне письма с фронта, пока были целы, некоторые навещали, когда им давали отпуск, о судьбе других я узнавал позже по их письмам или другим путем».

Февральская революция совершенно прекратила всякие учебные занятия в Политехническом институте. Занятия возобновились с 15 марта, но шли крайне вяло, работали лишь дипломанты. 16 августа (по новому стилю) 1918 года Совет института постановил: «Ввиду чрезвычайно тяжелых условий жизни в Петрограде предоставить Правлению право выдать длительные отпуска студентам всех семестров» [10].

В августе 1919 года были открыты два новых факультета: химический и физико-механический. Деканом химического факультета был избран академик Н.С. Курнаков, секретарем — В.А. Кинд, а физико-механического — деканом профессор А.Ф. Иоффе, секретарем — М.В. Кирпичев. Вместе с тем электрохимический подотдел металлургического факультета был упразднен, а студенты его образовали первое ядро химического факультета.

В 1919–1920 годах профессор М.А. Павлов был проректором института по учебным делам и одновременно деканом металлургического факультета.

Как вспоминает профессор Б.Н. Меншуткин [10]: «Январь 1920 года был, пожалуй, самым тяжелым месяцем всей этой тяжелой эпохи. Большие морозы, почти полное отсутствие топлива, замершие во многих местах водопроводы, голод — делали тогда жизнь очень трудной. Об учебных занятиях в этом месяце не было речи; мы все ослабели, и большинство было больно цингой».

В соответствии с декретом Совнаркома от 24 марта 1920 года «О срочном выпуске инженеров-специалистов» в Политехническом институте был образован «Особый комитет», целью которого было организовать обучение студентов по сокращенной программе, чтобы как можно скорее выпустить их инженерами.

Зимой 1920–1921 года занятия в главном здании и химическом павильоне проводить было невозможно из-за отсутствия отопления, для занятий со студентами металлургического факультета было предложено использовать квартиры профессоров С.И. Дружинина и М.А. Павлова. В первой шли занятия по теоретическим предметам, а по техническим — во второй [2]. В самой большой комнате квартиры профессора Павлова были установлены столы и стулья для слушателей, а для лекторов — доска. Здесь проходили и заседания Совета факультета. Отапливали аудиторию студенты, приносившие дрова (впоследствии это стали делать служители). В соседней, тоже большой комнате помещалась канцелярия металлургического факультета. Неотапливаемый кабинет профессора был рядом и, конечно, выиграл от соседства с отапливаемой комнатой. Семья профессора Павлова попрежнему фактически жила в кухне, которая так или иначе согревалась. В это время профессор М.А. Павлов читал лекции и проводил занятия со студентами по трем дисциплинам: «Металлургия чугуна», «Металлургия стали» и «Металлургические печи». Как он писал в «Воспоминаниях...» [2]: «И мне и другим преподавателям, работавшим по заданию «Особого комитета», ускоренные занятия дались нелегко. Конечно, все мы получали добавочную плату за увеличенное число часов, кроме того, в начале занятий нам были выданы шинели из так называемого «солдатского» сукна и мы регулярно получали хлебный паек; вместе с академическим пайком этого было достаточно». С 1 января 1922 года «Особый комитет» по срочному выпуску инженеров-специалистов был ликвидирован.

В 1922 году металлургический факультет готовил инженеров по трем специализациям [10]:

производству железа и его тепловой обработке;

производству железа и его механической обработке;

производству железа и иных, кроме железа, металлов.

В речи на торжественном праздновании 25-летнего юбилея металлургического факультета Ленинградского политехнического института профессор М.А. Павлов сказал [11]: «Указав кратко на прошлое металлургического отделения и факультета, позволю себе коснуться и будущего. В будущем, по моему мнению, участие металлургического факультета Политехнического института в подготовке необходимых нашим металлургическим заводам специалистов должно бы не умалиться, а возрасти, так как нужда в инженерах-металлургах растет, что вызывается, во-первых, необходимостью пополнения свежими силами отходящих от заводской и научной деятельности ветеранов старой школы, ряды которых редеют быстрее нормального вследствие пережитых испытаний, и, во-вторых, быстрым развитием советского строительства в области металлургии как черных, так и цветных металлов.

Что же нужно для того, чтобы и в будущем металлургический факультет развивал свою деятельность в указанных направлениях — научном и практическом — столь же успешно, как бывшее металлургическое отделение?

Нужны, во-первых, материальные средства. Политехнический институт в первые годы своей деятельности поражал всех, привыкших к убогой обстановке и тесноте наших специальных школ, простором и количеством учебных помещений, а также роскошью их оборудования. Большие расходы на первоначальное оборудование и сделанный при открытии лабораторий запас приборов, реактивов и материалов всякого рода позволили металлургическому отделению и факультету долгое время развивать интенсивную ученую и учебную деятельность. Но наступил, наконец, момент, когда запасы истощились, лабораторное оборудование износилось, приборы специального назначения или пришли в полную негодность, или требуют капитального ремонта.

По мере того как открывались новые факультеты в институте, увеличивалось число новых лабораторий делением старых на части, былой простор все более и более сокращался, и в настоящее время от него осталось одно воспоминание. Таким образом, металлургический факультет уже не может по размеру предоставленных ему для своих лабораторий помещений и по состоянию их оборудования пропускать то количество студентов, в частности дипломников, какое занималось в них прежде. Нужны, следовательно, затраты на пополнение и обновление прежнего оборудования. Но наука и техника двигаются вперед, появляются новые методы исследования, требующие и нового оборудования (например, исследование свойств металлов и контроль качества готовых продуктов с помощью рентгеновских лучей); это обстоятельство затрудняет металлургическому факультету задачу поддержания уровня преподавания хотя бы только на прежней высоте, не говоря уже о приобретении оборудования лучших школ других стран. В материальных средствах металлургическому факультету не отказывают совсем, но на его долю приходится так мало, что дооборудование оттягивается на слишком долгий срок.

Во-вторых, нужно, чтобы преподавательский персонал стоял на должной высоте. В этом отношении металлургический факультет, к счастью, и теперь находится в счастливом положении, сохранив свой персонал, несмотря на пережитые невзгоды, почти в полном составе, так как понес сравнительно незначительные потери, возмещенные к тому же притоком молодых сил.

Наконец, в-третьих, нужны хорошо подготовленные слушатели, желающие сделаться инженерами-металлургами. В них, казалось бы, не может быть недостатка, но вот уже 3 года как устанавливается прием на металлургический факультет в 60 человек, что обещает выпуск (через 5 лет) 15 инженеров. И это в то время, когда проектируются 3 новых металлургических завода-гиганта, обновляются и перестраиваются на большую производительность старые заводы, на которых и теперь уже не хватает сменных инженеров при печах, с одной стороны, и конструкторов-металлургов, с другой. Единственное объяснение, какое до сих пор было дано такому контингенту приема, — это разверстка, справедливая разверстка между факультетами одинаковой специализации.

Не могу не сознаться, что мне кажется самый принцип разверстки ошибочным и дальнейшее

его применение к Политехническому институту гибельным для дела: оборудование и преподавательский персонал металлургического факультета должны быть использованы в полной мере; без всякого почти повышения расходов на преподавание это может быть достигнуто приемом на I курс 90 человек. О таком приеме уже 3 года просит металлургический факультет, и, надо думать, в конце концов, его просьба будет услышана».

В феврале 1927 года Михаил Александрович Павлов был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В то время это звание ни к чему не обязывало и ничего не давало — избрание в члены-корреспонденты Академии было просто знаком внимания к ученому и намеком на то, что он может быть при открывшейся вакансии избранным в ее действительные члены [2].

6 марта 1930 года профессор М.А. Павлов по личной просьбе был освобожден от должности заведующего металлургическим факультетом [10].

Тридцатые годы для Ленинградского политехнического института — это, можно сказать, годы небытия, если иметь в виду только его название. Целых десять лет института под таким названием в Ленинграде не было. В июне 1930 года Политехнический институт был расчленен на множество отраслевых институтов. В июне 1934 года часть этих институтов, оставшихся на территории бывшего Политехнического, была объединена под названием «Индустриальный институт», и только в ноябре 1940 года он снова стал Ленинградским политехническим институтом [12].

В 1932 году, наряду с двумя другими металлургами — А.А. Байковым и И.П. Бардиным, М.А. Павлов избирается действительным членом Академии [2]. Работы академика М.А. Павлова в области металлургии чугуна подробно рассмотрены в статье А.Н. Рамма [13].

В июне 1934 года М.А. Павлов становится заведующим кафедрой металлургии чугуна Ленинградского индустриального института [12]. В 1937 году М.А. Павлов дал оценку деятельности кафедры [14]: «За время существования советской власти кафедра металлургии чугуна ЛИИ достигла больших успехов. Ее история в послереволюционное время тесно связана с развитием всей страны, победоносно осуществившей социалистическое строительство.

Из 20 лет советской власти кафедра металлургии чугуна имела для своего развития не более 14 лет, так как в годы интервенции, гражданской войны и голода не могло быть и речи о развитии преподавания в бывшем Политехническом институте, в котором работа совсем прекратилась на некоторое время. Требовались героические усилия для того, чтобы сохранить сам Институт, т. е. его строения и оборудование: за отсутствием отопления и материалов для ремонта им угрожало разрушение.

После возобновления занятий одно время преподавание металлургии чугуна, как и некоторых других предметов, велось на квартире профессора металлургии чугуна, где помещалась и канцелярия металлургического факультета, (профессор металлургии был и деканом факультета). В это время учебные помещения Института вместе со всем своим содержимым (приборами и реагентами) были в замерзшем состоянии. Когда летом и осенью был произведен ремонт отопительной системы и крыш зданий, кафедра металлургии чугуна смогла занять свое скромное помещение в химическом павильоне, в котором сосредоточивалась прежде, как и теперь, учебная жизнь металлургического факультета.

Современное состояние кафедры металлургии чугуна в ЛИИ не идет ни в какое сравнение не только с описанным выше положением ее в первое время по возобновлении занятий в химическом павильоне, но и с положением в довоенное время, когда бывший Политехнический институт, по общему мнению, был наиболее оборудованным втузом России.

В самом деле, весь персонал кафедры в бывшем Политехническом состоял из одного человека, профессора металлургии чугуна, читавшего курс, ведшего практические упражнения со студентами и руководившего дипломным проектированием. Он заведовал также «кабинетом металлургии» — маленькой единственной комнаткой, в которой он вел занятия и где был сосредоточен весь инвентарь кафедры.

Теперь численный персонал кафедры возрос во много раз. Преподавание курса металлургии чугуна, кроме заведующего кафедрой, ведут 3 доцента и преподаватели, специализировавшиеся по разным отделам курса и связанным с ними упражнениям. Дипломное проектирование («реальное проектирование») ведется под руковод-

ством нескольких (смотря по числу проектирующих) руководителей из числа членов кафедры и консультантов — преподавателей других кафедр.

Сохранился, правда, старый «кабинет металлургии», дошедший до такого состояния, что в нем не хватает места для размещения учебных пособий — чертежей, книг и журналов, но вдобавок к нему кафедра получила другой, более обширный кабинет и лабораторию металлургии чугуна, необходимость которой раньше не признавалась.

В этой лаборатории уже ведутся дипломные работы студентами, диссертационные работы аспирантами, научные исследования членов кафедры в области металлургии чугуна и будут вестись со студентами учебные занятия, которые намечены кафедрой давно, но до сих пор не начинались из-за отсутствия оборудования.

Однако, несмотря на незаконченность оборудования лаборатории, в ней выполнен целый ряд работ, из которых 5 уже опубликованы (авторы: Лейбович, Любан, Остроухов), одна (выполненная Лейбовичем и Любаном на средства Академии наук) сдана в печать, одна (Лейбовича) подготовляется к печати; две диссертационные работы заканчиваются выполнением (аспирантами Красавцевым и Остроуховым); кроме того, студентами-дипломантами проведены пока две работы.

Все эти работы посвящены разработке актуальных вопросов теории доменной плавки.

Все члены кафедры развили широкую литературную деятельность. Ими опубликован ряд учебников для втузов (проф. Иг.М. Павлов, доцент Новоспасский) и техникумов (Новоспасский), руководств для мастеров (Красавцев, Остроухов) и статей в специальных журналах (проф. Иг.М. Павлов, доцент Новоспасский, преподаватели Рамм и Лейбович, аспиранты Красавцев и Остроухов).

В 1936 году вследствие преобразования ЦИМ (Центрального института металлов) его доменная группа перешла на металлургический факультет ЛИИ и влилась в состав кафедры металлургии чугуна. Вдвое увеличилась численность персонала кафедры. Исследовательская работа кафедры расширилась и перенесена на заводы.

Новые члены кафедры вместе со старыми вот уже 2 года ведут исследование работы наиболее мощных печей Союза — Магнитогорского, Кузнецкого и Макеевского заводов. Богатый материал, добытый этими исследованиями в 1936 году, уже опубликован в ряде статей, напечатанных в журнале «Советская Металлургия» (Козлович — Якубцинер — Горелик, Гольмшток — Лейбович, Басов, Ефремов, Красавцев — Любан), а результаты, полученные исследованиями 1937 года, обрабатываются для опубликования.

К XX годовщине советской власти и XXXV годовщине существования Института — бывшего Политехнического, ныне Индустриального — кафедра металлургии чугуна приходит при наилучших, по сравнению с прошлым, условиях работы, надеясь еще шире развернуть свою педагогическую, литературную и исследовательскую деятельность».

Михаил Александрович Павлов в 1947 году был освобожден от заведования кафедрой металлургии чугуна Ленинградского политехнического института и переведен на научную работу, в марте 1952 года уволен в связи с сокращением объема работ лаборатории [15].

Закончу очерк о М.А. Павлове словами академика А.А. Байкова [16]: «Все те, кто имели отношение к металлургическому факультету, не представляют себе, как факультет мог существовать без Михаила Александровича и как Михаил Александрович мог бы существовать без металлургического факультета. Металлургический факультет Ленинградского политехнического института и Михаил Александрович Павлов неотделимы друг от друга, связаны теснейшими, органическими узами. Всем хорошо известно, что у нас в Союзе Михаил Александрович является создателем советской школы доменщиков».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Григорьев, Г.Р.** Академик М.А. Павлов. К пятидесятилетию инженерной деятельности [Текст] / Г.Р. Григорьев / Под ред. М.Е. Пильника.— М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главная ред. лит-ры по черной металлургии, 1935.— 229 с.

2. **Павлов, М.А.** Вспоминание металлурга [Текст] / М.А. Павлов / Отв. ред. Б.Н. Жеребин.— М.: Наука, 1984.— 424 с.

3. **Остроухов, М.Я.** Учитель. Отрывки воспоминаний [Текст] / М.Я. Остроухов // Доменный процесс

по новейшим исследованиям. К 100-летию со дня рождения акад. М.А. Павлова.— М.: Металлургиздат, 1963.— С. 33–36.

4. **Котов, В.И.** Из воспоминания об академике Михаиле Александровиче Павлове [Текст] / В.И. Котов // Доменный процесс по новейшим исследованиям. К 100-летию со дня рождения акад. М.А. Павлова.— М.: Металлургиздат, 1963.— С. 41–43.

5. **Павлов, М.А.** Металлургия чугуна [Текст] / М.А. Павлов / Сост. студ. В.А. Белобородов и В.С. Кучевский по лекциям и под ред. проф. М. А. Павлова.— СПб.: Тип. «Печатный труд», 1910.— 148 с.

6. **Морачевский, А.Г.** Профессор Владимир Ефимович Грум-Гржимайло. Жизнь и деятельность. 1864—1928 [Текст] / А.Г. Морачевский.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— 88 с.

7. **Биографический словарь деятелей естествознания и техники. Т. 1. А— Л.** [Текст] / Ред. коллегия: А.А. Зворыкин (отв. ред.) [и др.].— М.: Гос. научн. изд-во «БСЭ», 1958.— 548 с.

8. **Смелов, В.А.** Санкт-Петербургский политехнический дореволюционный [Текст] / В.А. Смелов.— СПб.: ООО «Береста», 2012.— 620 с.

9. Металлургическое отделение. Обзор преподавания. Состав учащихся. Состав преподавателей. Учебно-вспомагательные учреждения [Текст] / Под общ. ред. М.А. Павлова.— СПб.: Тип. Шредера, 1914.— 244 с.

10. **Меншуткин, Б.Н.** История Санкт-Петербургского политехнического института (1899–1930) / Редактор-составитель биографических справок и примечаний Н.П. Шаплыгин.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 508 с.

11. **Павлов, М.А.** Речь на торжественном праздновании 25-летнего юбилея Металлургического факультета Ленинградского политехнического института [Текст] / М.А. Павлов // В кн.: Павлов М.А. Вспоминание металлурга / Отв. ред. Б. Н. Жеребин.— М. Наука, 1984. С. 380–386.

12. **Смелов,В.А.** Политехнический институт. Тридцатые годы [Текст] / В.А. Смелов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 356 с.

13. **Рамм, А.Н.** Работы академика Михаила Александровича Павлова в области металлургии чугуна [Текст] / А.Н. Рамм // Металлургия чугуна. Труды ЛПИ № 179.— М. : Металлургиздат, 1955.— С. 5–17.

14. **Павлов, М.А.** Кафедра металлургии чугуна [Текст] / М.А. Павлов // Научно-информ. бюллетень ЛИИ.— 1937. № 10–11.— С. 21–22.

15. **Моторина, Л.А.** Павлов Михаил Александрович(1863–1958) [Текст] / Л.А. Моторина // Научно-технич. ведомости СПбГТУ.— 2001. № 1.—С. 161–163.

15. **Байков, А.А.** О Михаиле Александровиче Павлове [Текст] / А.А. Байков // В кн.: Павлов М.А. Вспоминание металлурга / Отв. ред. Б.Н. Жеребин.— М. Наука, 1984.— С. 413–421.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АЛЕКСЕЕВ Георгий Александрович — *доктор технических наук профессор кафедры метрологии и управления качеством Санкт-Петербургского минерально-сырьевого университета «Горный».*

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2

(812) 7106507 доб. 51-42

alexGA06@yandex.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — *доктор технических наук заведующий кафедрой технологии металлов и металловедения Санкт-Петербургского института машиностроения.*

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14

(812) 540-01-59

АНДРЕЕВ Иван Александрович — *аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

andreev.ia@gmail.com

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич — *кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-65-66

visantiya@freemail.ru

АРСЕНЬЕВ Дмитрий Германович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой физики и математического моделирования в механике, проректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28, СПбГПУ

(812) 534-10-01

АФАНАСЬЕВА Ирина Борисовна — *старший преподаватель кафедры инженерной графики и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ

(812) 552-75-14

kpgd@mail.ru, afanaseva.mmf@mail.ru

БАШКАРЁВ Альберт Яковлевич — *доктор технических наук профессор кафедры транспортных и технологических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28, СПбГПУ

(812)552-84-01

БЕЖАНОВА Алла Ильинична — *старший преподаватель кафедры инженерной графики и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ

(812) 552-75-14

kpgd@mail.ru

БЕЗБОРОДОВ Андрей Андреевич — *ассистент кафедры электрической изоляции, кабелей и конденсаторов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)552-87-26

БЕЛЯЕВ Александр Анатольевич — *специалист по технологии и оборудованию ЛПЦ-3 ОАО "Северсталь".*

196651, Санкт-Петербург, Колпино, пр. Ленина, д.1,

(812) 334-74-17

belyaev@severstal.com

БЕЛЯНИН Василий Алексеевич — *аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)294-22-62

БОГУСЛАВСКИЙ Илья Зеликович — *доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Senior Member of IEEE.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-85-30

b-iz@yandex.ru

БОКЛАГ Наталья Юрьевна — *ассистент кафедры металлургических машин и оборудования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ

(343) 375-41-60

БОРИСЕВИЧ Алексей Валерьевич — *кандидат технических наук доцент кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-96-86

alex.borysevych@gmail.com

БОРОВКОВ Алексей Иванович — *кандадат технических наук профессор, проректор по перспективным проектам Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-77-78

БОЧАРОВ Юрий Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-61-41

БРУНМАН Владимир Евгеньевич — *кандидат экономических наук доцент кафедры электрических машин и аппаратов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 555-42-93

БУЙМОВ Аркадий Георгиевич — *заведующий кафедрой экономики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.*

634050, г. Томск, просп. Ленина, д. 40

(3822) 41-33-29

agb@mail.tomsknet.ru

ВАСИЛЬЕВ Анатолий Петрович — *кандидат технических наук профессор кафедры электротехники и электроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

vasil@mrsksevzap.ru

ВАСИЛЬЕВА Екатерина Сергеевна — *кандидат технических наук докторант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-89-69

katrinfr@inbox.ru

ВОЛКОВ Андрей Николаевич — *доктор технических наук заведующий кафедрой автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-96-86

automats@inbox.ru

ВОСТРОВ Владимир Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-95-30

ВЫСОГОРЕЦ Светлана Петровна — *аспирантка кафедры электроэнергетики, техника высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

visogorecsp@komienergo.ru

ГАРМИДЕР Дмитрий Николаевич — *магистр кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-89-45

Garmider.DN@gmail.com

ГИЧЕВ Юрий Васильевич — *аспирант кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)552-96-86

automats@inbox.ru

ГЛУХОВ Павел Александрович — *аспирант кафедры материаловедения, пластической и термической обработки материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер НИЛ пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 294-42-22

ГРИГОРЬЕВ Алексей Владимирович — *Генеральный конструктор ОАО «Климов».*

194100, Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 11

alex@klimov.ru

ГРУНИН Владислав Викторович — *аспирант кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-77-78
vladg999@mail.ru

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — *кандидат физико-математических наук начальник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.
(812)-294-47-36
gna@rtc.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях факультета комплексной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

ДАНИЛЕВИЧ Януш Брониславович — *академик Российской академии наук, профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Заслуженный деятель науки и техники РФ, Senior Member of IEEE.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

ДЕМИДОВ Александр Иванович — *профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ
(812)552-61-71
ph-chem@ftim.spbstu.ru

ДИМЕНТ Лев Иосифович — *кандидат технических наук доцент кафедры инженерной графики и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-75-14
kpgd@mail.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — *кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ
(812)5341431; 5344905
kgm-spb@list.ru

ДОБРОБОРСКИЙ Борис Самуилович — *кандидат технических наук доцент кафедры транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.*

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, СПбГАСУ
(812) 575-01-95

ДЬЯЧЕНКО Владимир Алексеевич — *доктор технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-86-96
automats@inbox.ru

ЕГОРОВ Владимир Владимирович — *менеджер по инновациям ООО «Интера-Мед инновационные технологии в медицине».*

115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 11, стр. 2, этаж 3, оф. 3
(903)5159643
ramedusan@mail.ru

ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович — *советник президента Ракетно-космической корпорации «Энергия».*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
(812) 516-27-46
zheleznyakov@rtc.ru

ЖУК Владислав Викторович — *аспирант кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-61-41
beetlevladislav@gmail.com

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — *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
n.zabelin.turbo@mail.ru

ЗАХАРОВ Александр Владимирович — *аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812)552-65-66
vobla777@mail.ru

ЗАХАРОВ Вадим Михайлович — *кандидат технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Ивановского государственного энергетического университета.*
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
(4932) 269-724
colia@rambler.ru

ЗАНДЕР Михаил Сергеевич — *аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
chern@pef.spbstu.ru

ЗЕМЛЯКОВ Евгений Вячеславович — *ассистент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 552-98-43
e.zemlyakov@ltc.ru

ЗОЛОТОВ Александр Максимович — *доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812)552-89-52
prf_zam@mail.ru

ЗУБОВ Всеволод Иванович — *аспирант кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.*
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 35. ф-т ПМ-ПУ
(812) 274-80-11
ddemidova@mail.ru

ЗУБОВА Александра Федоровна — *доктор технических наук профессор кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.*
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 35. ф-т ПМ-ПУ
(812) 274-80-11
ddemidova@mail.ru

ИВАНОВ Андрей Евгеньевич — *конструктор 63-го отдела ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.
(812)-552-41-36
a.ivanov@rtc.ru

ИВАНОВА Ольга Александровна — *кандидат физико-математических наук доцент кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.*
198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 35, ф-т ПМ-ПУ
(812) 274-80-11
ddemidova@mail.ru

КЕСАМАНЛЫ Микаил Фагам-оглы — *инженер электронной техники, выпускник кафедры специальных материалов электронной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 15
(812)297-20-28

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — *доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812)552-75-31

КОБЕРНИЦКИЙ Валерий Евгеньевич — *кандидат педагогических наук доцент кафедры связи Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 294-88-10
kaf.svjazi@gmail.com

КОБЧИКОВ Валентин Семенович — *доцент механико-машиностроительного факультета, председатель профкома (в 2001–2013 годах) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)297-21-43

КОЛЬЦОВА Татьяна Сергеевна — *аспирант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-89-69
annelet@yandex.ru

КОМАРОВА Екатерина Андреевна — *студент 4-го курса кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ

(812) 552-98-43

КОНДРАТЬЕВ Владимир Федорович — *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

ya.ya-kondr194021@yandex.u

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

petroprom2013@yandex.ru

КОНОНОВ Павел Васильевич — *аспирант кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-95-30

КОНЯШИН Александр Викторович — *аспирант кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-96-86

КОРОБИЦЫН Александр Ростиславович — *аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)294-22-62

hisstzin@yandex.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-75-72

nikolay.korovkin@gmail.com

КОРТИКОВ Николай Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-73

n-kortikov@yandex.ru

КОЧКАРЕВ Дмитрий Алексеевич — *электроник 61-го отдела ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.

(812)-552-45-21

kochdim83@mail.ru

КРЫЛОВ Николай Александрович — *доцент кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения.*

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14

(812) 552-64-29

КУЗНЕЦОВ Николай Борисович — *ведущий конструктор по расчетам ОАО «Климов».*

194100, Санкт-Петербург, Кантемировская улица, д. 11

klimov@klimov.ru

ЛАПАТЕЕВ Денис Александрович — *инженер кафедры промышленной теплоэнергетики Ивановского государственного энергетического университета.*

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

(4932) 269-789

ЛАПШИН Кирилл Леонидович — *доктор технических наук профессор кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)552-65-66

kirill.lapschin@gmail.com

ЛОМАСОВ Владимир Николаевич — *кандидат физико-математических наук директор НИИ ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-98-96

lomasoff@yandex.ru

ЛУНЕВ Владимир Алексеевич — *кандидат технических наук ведущий инженер НИЛ пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 294-42-22

МАКСАРОВ Вячеслав Викторович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой машиностроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2

(812)370-77-87

maks78.54@mail.ru

МАЛЮГИН Виктор Иванович — *кандидат физико-математических наук доцент, заместитель директора департамента международного сотрудничества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28, СПбГПУ

(812) 534-1002

МАРКЕЛОВ Илья Александрович — *аспирант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ

(812)552-61-71

МИРОНОВА Екатерина Викторовна — *аспирантка кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)540-58-37

МОТОРНЫЙ Александр Васильевич — *кандидат химических наук заведующий лабораторией НИИ ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-98-96

mostmo@rbcmail.ru

МУСИЯКО Дмитрий Валентинович — *магистр по специальности «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)552-84-01

НАСИБУЛИН Альберт Галийевич — *доктор технических наук доцент кафедры прикладной физики Университета Аалто (Финляндия).*

Aalto University P.O. Box 5100, Puumiehenkuja 2, FIN-02150 Espoo, FINLAND

+358 50 33 975 38

albert.nasibulin@hut.fi

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич — *доктор технических наук заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 335-58-52

ПАРШИКОВ Руслан Александрович — *кандидат технических наук доцент кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-89-52

ПАРШИН Сергей Владимирович — *доктор технических наук профессор кафедры металлургических машин и оборудования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ

(343) 375-41-60

ПЕТКОВА Ани Петрова — *доктор технических наук профессор кафедры теории конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-75-37

apetkova@inbox.ru

ПЕТРИЧЕНКО Михаил Романович — *доктор технических наук профессор кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-94-60

fonpetrich@mail.ru

ПЕТРОВ Сергей Николаевич — *кандидат химических наук доцент кафедры функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, начальник сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 335-58-45

ПЕШКОВ Вадим Сергеевич — *магистр по специальности «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-84-01

ПОЗДЕЕВА Екатерина Юрьевна — *ведущий инженер кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ

(812) 552-98-43

e.pozdeeva@ltc.ru

ПОПОВ Виктор Васильевич — *доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-85-30

ПОПОК Игорь Адамович — *начальник военной кафедры связи Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ

(812) 535-52-47

kaf.svjazi@gmail.com

РАКОВ Геннадий Леонидович — *кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-65-66

g.rakov.turbo@mail.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-65-66

РОГАЧЕВСКИЙ Владимир Самуилович — *кандидат технических наук сотрудник ООО «Петербургская электротехническая компания».*

196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 2.

(812) 369-26-61

РОЗОВ Андрей Леонидович — *доктор технических наук профессор старший научный сотрудник кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812)294-22-62

РУДСКОЙ Андрей Иванович — *доктор технических наук профессор ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-67-57

rector@spbstu.ru

РУСИНОВ Ростислав Викторович — *доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 534-14-31; 534-49-05

kgm-spb@list.ru

РУТМАН Юрий Лазаревич — *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-77-78

РЯХОВСКИЙ Михаил Сергеевич — *аспирант кафедры водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета*

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, СПбГАСУ

(812) 316-48-49

mr1982@list.ru

САВИН Сергей Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.*

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 5, СПбГАСУ

savinsn@gmail.com

СЕБЕЛЕВ Александр Александрович — *студент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-65-66

a.sebelev.turbo@mail.ru

СЕМАКИНА Елена Юрьевна — *кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ

(812) 552-65-66

chern@pef.spbstu.ru

СЕНЧИК Константин Юрьевич — *доктор медицинских наук главный научный сотрудник 63-го отдела ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.
(812)-552-33-51
senkoy@inbox.ru

СКОТНИКОВА Маргарита Александровна — *доктор технических наук профессор заведующая кафедрой машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-64-29

СМИРНОВ Максим Викторович — *студент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
m.smirnov.turbo@mail.ru

СМИРНОВ Николай Николаевич — *старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики Ивановского государственного энергетического университета.*

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
(4932) 269-789
nsmirnov@pte.ispu.ru

СМОРОДОВ Андрей Владимирович — *кандидат технических наук доцент кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812)552-96-86

СОКОЛОВ Александр Валерьевич — *аспирант кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812)540-58-37

СОМОНОВ Владислав Валерьевич — *аспирант кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-98-43
ballak@inbox.ru

СОСНОВ Евгений Николаевич — *старший научный сотрудник 61-го отдела ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.
(812)-556-33-51
e.sosnov@rtc.ru

СТРЕКОПЫТОВА Мария Владимировна — *кандидат физико-математических наук доцент кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.*

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 35, ф-т ПМ-ПУ
(812) 274-80-11
ddemidova@mail.ru

СТУПАК Виктор Борисович — *доцент, член профкома сотрудников (в 2003—2013 гг.) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 297-21-43

СЫЧЕВ Юрий Анатольевич — *ассистент кафедры электротехники, электромеханики, электроэнергетики Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70
sychev_yura@mail.ru

ТАШЕВСКИЙ Арнольд Германович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой теории и конструирования механических систем машиностроения Санкт-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.*

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14
taarnold@yandex.ru

ТРУТНЕВ Евгений Вячеславович — *ассистент кафедры деталей машин Уральского федеральный университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.*

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ
(343) 375-46-94

ТУОМИНЕН Яре — *исследователь факультета материаловедения Технического университета г. Тампере (Финляндия).*

FI-33101, Тампере
+(358)40 849 0196
jari.tuominen@tut.fi

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — *доктор технических наук декан факультета технологии и исследования материалов, профессор кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 552-98-43
gleb@ltc.ru

УСТИНОВ Денис Анатольевич — *доцент кафедры электротехники, электромеханики, электроэнергетики Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70
bescheiden@rambler.ru

УШАКОВ Федор Геннадьевич — *инженер 61-го-отдела ФГАНУ «Центральный научно-исследова-тельский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».*
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.
(812)-552-33-51
f.ushakov@rtc.ru

ФАМ Хоаи Ан — *аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
sdd85@mail.ru

ФЕДОСОВСКИЙ Михаил Евгеньевич — *кандидат технических наук генеральный директор ЗАО «Диаконт».*
195274, Санкт-Петербург, ул. Учительская, д. 2, ЗАО «Диаконт»
(812) 334-00-81
diakont@diakont.ru

ФЕОФАНОВ Юрий Александрович — *доктор технических наук профессор кафедры водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.*
190005, Санкт-Петербург,ул. 2-я Красноармейская, 4, СПбГАСУ
(812) 316-48-49
ufeofanov@rambler.ru

ФОМИН Виктор Александрович — *кандидат технических наук доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-89-45
Viktor2009@yandex.ru

ФУКС Михаил Дмитриевич — *аспирант, инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*
191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49
(812) 274-16-19

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@pef.spbstu.ru

ШИШИГИН Сергей Леонидович — *доктор технических наук заведующий кафедрой электротехники Вологодского государственного технического университета.*
160000, г. Вологда, ул. Галкинская, д. 1
(8172) 72-14-11
ctod28@vologda.ru

ШИШОВ Иван Александрович — *аспирант кафедры материаловедения, пластической и термической обработки материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер НИЛ пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул, 29, СПбГПУ
(812) 294-42-22
shishov_i@list.ru

ШКЛЯРСКИЙ Андрей Ярославович — *аспирант кафедры электротехники, электромеханики, электроэнергетики Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70
nd-46@mail.ru

ШОНИН Олег Борисович — *доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Санкт Петербургского минерально-сырьевого университета «Горный».*
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-86-67
ninosh_eltech@mail.ru

ШПЕНЗЕР Геннадий Григорьевич — *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
shpenzer.g@gmail.com

ЮХНЕВ Андрей Данилович — *научный сотрудник кафедры гидроаэродинамики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-66-21,

a.yukhnev@mail.ru

ЯБЛОКОВА Наталья Александровна — *кандидат технических наук докторант кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-95-30

ЯКУНИН Александр Иванович — *ведущий конструктор ОАО «Климов».*

194100, Санкт-Петербург, Кантемировская улица, д. 11

Iak1961@rambler.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Железняков А. Б. КОСМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СТРАН МИРА В 2012 ГОДУ.

В статье рассмотрены различные аспекты космической деятельности стран мира в 2012 году: пилотируемые полеты, изучение планет Солнечной системы, прикладные проекты. Помимо большого фактологического материала и статистических данных, проведен анализ космической деятельности в 2012 году в сравнении с 2011 годом. Изложен прогноз автора в сфере космической деятельности на 2013 год.

КОСМОС. КОСМОНАВТИКА. МКС. НАВИГАЦИЯ. МАРС.

Арсеньев Д. Г., Малюгин В. И. САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ГОТОВИТ КАДРЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА.

Расширяется область сотрудничества с Социалистической Республикой Вьетнам. Реализуется проект создания Вьетнамо-Российского технологического университета в г. Ханой, подписано межправительственное соглашение о российском участии в строительстве первой вьетнамской АЭС, идет долгосрочное сотрудничество с ведущими университетами СРВ. В статье рассмотрены вопросы подготовки специалистов для Социалистической Республики Вьетнам в области атомной энергетики и других в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. РОССИЙСКО-ВЬЕТНАМСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО. ВЬЕТНАМО-РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ. ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКА.

Фам Х. А., Рассохин В. А., Андреев К. Д. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА.

Рассмотрено современное состояние энергетики Вьетнама и охарактеризованы проекты по развитию электроэнергетики.

СОСТОЯНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ. РАЗВИТИЕ. ЭНЕРГЕТИКА. ПРОЕКТ. КОМБИНИРОВАННЫЕ ГАЗОПАРОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ.

Гармидер Д. Н., Фомин В. А. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ.

В статье рассмотрены характеристики оборудования ПГУ-450Т при импульсной разгрузке турбоагрегатов. Исследования проведены на основе построенной математической модели динамики энергоблока.

ПГУ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИМПУЛЬСНАЯ РАЗГРУЗКА. УСТОЙЧИВОСТЬ. МАНЁВРЕННОСТЬ.

Захаров А. В., Шпензер Г. Г. КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ЛОПАТКАМИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ.

В статье рассмотрена проблема возникновения отрывов парового потока в последних ступенях цилиндров низкого давления на переменных режимах и связанное с этим снижение эффективности ступеней.

УСТОЙЧИВОСТЬ. КРИТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ. ВЛАЖНЫЙ ПАР. СРЫВ. КПД. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Забелин Н. А., Раков Г. Л., Рассохин В. А., Себелев А. А., Смирнов М. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЯХ КОНСТРУКЦИИ ЛПИ.

На базе расчетов, выполненных в программном комплексе ANSYS CFX, рассмотрены характерные особенности течения рабочего тела в малорасходных ступенях конструкции ЛПИ. Выделены основные проблемы и исследованы возможные пути оптимизации турбинных ступеней этого класса.

МАЛОРАСХОДНЫЕ ТУРБИННЫЕ СТУПЕНИ. СТУПЕНИ КОНСТРУКЦИИ ЛПИ. ТРЕХМЕРНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Захаров В. М., Смирнов Н. Н., Лапатеев Д. А. СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООТРАЖАЮЩИХ ЭКРАНОВ В ОКНАХ.

Приведены результаты исследований по повышению термического сопротивления оконных блоков и стен зданий за счет применения теплоотражающих металлических экранов, а также влияния использования данных конструкций на работу систем энергообеспечения.

ТЕПЛООТРАЖАЮЩИЕ ЭКРАНЫ. ОКНА. СИСТЕМА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЗДАНИЙ. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ЖАЛЮЗИ.

Лапшин К. Л. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН С ПРИМЕНЕНИЕМ «ИНТЕГРАЛЬНЫХ» СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК.

Рассмотрены особенности математической модели для проектировочного газодинамического расчета паровой турбины, структура программы компьютерной оптимизации и способы пространственного конструирования сопловых лопаток цилиндров низкого давления паровых турбин. Положения теории иллюстрируются примерами компьютерной оптимизации цилиндра низкого давления паровой турбины.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ЦИЛИНДР НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Богуславский И. З., Данилевич Я. Б., Попов В. В., Рогачевский В. С. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК.

Получены выражения для расчета комплексных значений напряжения и тока в обмотках ротора и статора машин двойного питания (МДП) в эксплуатационных режимах при различных скольжениях, а также активной и реактивной мощностей, потребляемых возбудителем (преобразователь частоты в цепи ротора); при этом учтены высшие временные гармоники и насыщение магнитной цепи МДП. Предполагается, что высшие пространственные гармоники МДС мощной МДП, отличающейся большим воздушным зазором, создают лишь потоки рассеяния в зазоре и практически не участвуют в создании электромагнитного момента на валу МДП.

МДП. СКОЛЬЖЕНИЕ. МДС. КОМПЛЕКСНЫЕ АМПЛИТУДЫ МДС. НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. ОБМОТКА РОТОРА. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА.

Коровкин Н. В., Шишигин С. Л. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ В ТЕОРИИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ.

Рассмотрены современные математические модели, методы, программы и экспериментальное оборудование для определения параметров заземляющих устройств и создаваемых ими электромагнитных полей.

ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА.

Бочаров Ю. Н., Жук В. В. ГРОЗОУПОРНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОМПОЗИТНЫМИ ОПОРАМИ.

В статье рассмотрены особенности грозозащиты воздушных линий высоких классов напряжения при использовании опор из композитных материалов. Изложены основные проблемы и их причины, представлены предложения по оптимизации конструкций композитных опор при использовании электроизоляционных свойств материала.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ. КОМПОЗИТНЫЕ ОПОРЫ. ГРОЗОЗАЩИТА.

Высогорец С. П., Васильев А. П. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАСЕЛ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35–110 КВ.

Анализируется существующий подход к оценке технического состояния силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ на основе результатов физико-химического анализа изоляционных масел, показаны его недостатки.

Предлагается система более достоверной оценки параметров эксплуатационного трансформаторного масла и мероприятия по восстановлению и продлению его ресурса.

Показана необходимость: введения нового показателя качества эксплуатационного трансформаторного масла — «стабильности против окисления»; изменения пороговых значений кислотного числа водорастворимых кислот и щелочи, тангенса угла диэлектрических потерь масла, содержания антиокислительной присадки масел, а также объема измеряемых показателей для планового физико-химического анализа проб масла для силовых трансформаторов напряжением 35–110 кВ без специальных защит масла.

ОЦЕНКА. ХИМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. ТРАНСФОРМАТОРНОЕ МАСЛО. ТРАНСФОРМАТОР.

Шклярский А. Я., Устинов Д. А., Сычев Ю. А. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК.

В статье проведен анализ режима пуска погружного электродвигателя на различной удаленности от питающей сети. Показаны преимущества устройств, реализующих комбинированный способ компенсации потери напряжения в ЛЭП, которые позволяют использовать достоинства частотного пуска и усовершенствованного динамического компенсатора искажения напряжения.

ПОГРУЖНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ. ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ. ПУСКОВОЙ РЕЖИМ. ПРОВАЛЫ НАПРЯЖЕНИЯ. ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.

Андреев И. А., Безбородов А. А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.

Рассмотрены проблемы идентификации технологических дефектов высоковольтной изоляции электрических машин с использованием статистических характеристик частичных разрядов. Приведены примеры использования методики на реальных образцах изоляции электрических машин.

ЭЛЕКТИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ. ДЕФЕКТ. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ.

Шонин О. Б. НАБЛЮДАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЛАВАЮЩИХ КОНДЕНСАТОРАХ В СХЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СБАЛАНСИРОВАННОГО РЕЖИМА ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

Статья посвящена стабилизации сбалансированного режима четырехуровневого инвертора на основе амплитудной коррекции параметров зарядных/разрядных процессов по сигналам обратной связи, которые формируются с использованием наблюдателя контролируемых величин. Проверка предложенных алгоритмов стабилизации и косвенного измерения напряжений выполнена с помощью компьютерного моделирования.

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ. БАЛАНС НАПРЯЖЕНИЙ. ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ. НАБЛЮДАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Анастасиади Г. П., Кондратьев С. Ю., Орыщенко А. С., Петров С. Н., Фукс М. Д. ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОВ «НАГРЕВ — ОХЛАЖДЕНИЕ» НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛИТОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА 45Х26Н33С2Б2.

Экспериментально определена длительная прочность жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С в литом состоянии и после предварительной выдержки длительностью 2–100 ч при 1150 °С с последующим охлаждением с печью. Установлено, что кататермический режим оказывает большее отрицательное влияние на длительную прочность сплава по сравнению с изотермическим, особенно в начальный период эксплуатации. Рекомендовано для увеличения ресурса работы высокотемпературного оборудования, изготовленного из жаропрочных жаростойких сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni, регламентировать количество технологических циклов «нагрев — охлаждение».

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. РЕСУРС ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Золотов А. М., Паршиков Р. А., Боклаг Н. Ю., Паршин С. В., Трутнев Е. В. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ В *S*-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ.

С использованием методов математического моделирования проведен анализ комбинированного процесса экструзии и равноканального углового прессования (РКУП) заготовок в *S*-образном канале. Исследованы особенности течения металла при РКУП, влияние технологических параметров на напряженно-деформированное состояние металла и на величину накопленных пластических деформаций

РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ. S-ОБРАЗНЫЙ КАНАЛ. ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.

Скотникова М. А., Миронова Е. В., Крылов Н. А., Соколов А. В. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РАСПАД ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ПОЛИМОРФНОМ $\alpha \leftrightarrow \beta$ ПРЕВРАЩЕНИИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ТИТАНА.

В работе представлен обзор литературы по особенностям полиморфного превращения в титане и его сплавах. Развивается представление и строится кристаллогеометрическая модель высокотемпературного вакансионно-пересыщенного состояния ОЦК- кристаллической решетки титана, формирующейся в результате полиморфного превращения при нагреве из плотноупакованной ГПУ-модификации.

СПЛАВЫ ТИТАНА. ПОЛИМОРФНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ. РАСПАД ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ. КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ВАКАНСИОННОЕ ПЕРЕСЫЩЕНИЕ.

Лунев В. А., Шишов И. А., Глухов П. А., Беляев А. А. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТОГО ЛИСТА НА СТАНЕ 5000. ЧАСТЬ 1: ТЕПЛОПОТЕРИ НА ОПЕРАЦИЯХ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПРОКАТКЕ.

В работе были исследованы теплопотери сляба на этапе операций, предшествующих прокатке на толстолистовом стане 5000 ОАО "Северсталь". Получены простые зависимости для определения поверхностной и среднемассовой температуры металла, обеспечивающие высокое быстродействие и точность вычислений.

ТОЛСТОЛИСТОВАЯ ПРОКАТКА. ТЕМПЕРАТУРА. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Кольцова Т. С., Насибулин А. Г., Васильева Е. С., Егоров В. В. СТРУКТУРА УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА МЕДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ.

Исследовано влияние соотношения в водород-этиленовой смеси на морфологию образующихся углеродных наноструктур, синтезированных газофазным методом на частицах медного катализатора. Показано изменение структуры углеродных нановолокон при различных соотношениях компонентов газовой фазы. Выдвинуто предположение о механизме роста углеродного продукта на медном катализаторе.

ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ. МЕДЬ. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОВОЛОКНА.

Алексеев Г. А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ.

В статье рассматриваются вопросы определения механических свойств тонких покрытий. Исследуется точность определения микротвердости и пластичности при малых глубинах вдавливания индентора.

ТОНКИЕ ПОКРЫТИЯ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, ИНДЕНТОР, МИКРОРЕЛЬЕФ.

Демидов А. И., Маркелов И. А. ТЕРМОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНЕТИТА И ВЮСТИТА С МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВЮСТИТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Рассчитаны значения функции G для вюстита, находящегося в равновесии с железом и с магнетитом, с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры и значения равновесной молярной доли монооксида углерода в газовой фазе при взаимодействии магнетита и вюстита с монооксидом углерода. Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

МАГНЕТИТ. ВЮСТИТ. МОНООКСИД УГЛЕРОДА. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИКА.

Русинов Р. В., Добрецов Р. Ю. ВЛИЯНИЕ УПРУГОСТИ ПРИВОДА В СИСТЕМЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ВПРЫСКА ТОПЛИВА.

Предложена методика теоретической оценки жесткости привода топливного насоса высокого давления. Проанализировано влияние жесткости на давление и фактическую продолжительность впрыска дизельного топлива.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЖЕСТКОСТЬ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ.

Башкарёв А. Я., Мусияко Д. В., Пешков В. С. ВИБРАЦИОННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПЛОТНИТЕЛЯ.

С помощью математической модели определяются условия передвижения вибрационной плиты по поверхности уплотняемого материала. При этом для улучшения качества уплотнения и облегчения передвижения плиты она дополнительно оборудована вальцем.

ПЕРЕДВИЖЕНИЕ. ВИБРАЦИОННАЯ ПЛИТА. ОБОРУДОВАНИЕ. ВАЛЕЦ.

Петриченко М. Р. ЭКСТРЕМАЛИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, СВОБОДНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ И «ПРИНЦИП МИНИМУМА ДИССИПАЦИИ» ДЛЯ БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКОВ.

Доказано, что свободная поверхность безнапорного потока совпадает с характеристикой уравнения Лагранжа для минимума (экстремума) потерь напора. Следовательно, расслоение потока характеристиками, погружается в пучок экстремалей. Вдоль свободных поверхностей потери напора и диссипация минимальны.

ЭКСТРЕМАЛЬ. ПУЧОК ЭКСТРЕМАЛЕЙ. ГРУППА ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ. ДИФФЕОМОРФИЗМ (ПОТОК). СВОБОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ. ХАРАКТЕРИСТИКА.

Григорьев А. В., Якунин А. И., Кузнецов Н. Б., Кондратьев В. Ф., Кортиков Н. Н. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО РОТОР — СТАТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА.

Представлены результаты применения метода гармонического баланса при расчете ротор — статорного взаимодействия и пульсаций давления на поверхности лопаток в турбинной ступени. Показана возможность

данным методом, который включен в пакет Star CCM+, моделировать нестационарное течение со значительно меньшими вычислительными затратами. Результаты вычислений сравниваются с опытными данными для одноступенчатой турбины и отмечается важность нестационарных эффектов.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭФФЕКТЫ. ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ. РОТОР — СТАТОРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ. МЕТОД ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА.

Максаров В. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОГО ИНСТРУМЕНТА.

Разработан метод повышения устойчивости процесса резания при чистовом точении, основанный на использовании анизотропных свойств пластически деформированной конструкционной стали и явления диссипации колебательной волны при переходе раздела между разорентированными по текстуре пластинами державки инструмента. На основании изученных физических анизотропных свойств стального проката создан инструмент, оснащенный многослойной демпфирующей державкой.

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ. ТЕКСТУРА ДЕРЖАВКИ. АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА.

Зандер М. С., Семакина Е. Ю., Черников В. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ 3D-ПОТОКА В ОТСЕКЕ «ТУРБИННАЯ СТУПЕНЬ — ОСЕВОЙ ДИФФУЗОР».

Представлены результаты экспериментального и численного исследования блока «последняя ступень турбины — выходной диффузор» на примере модельного отсека турбины V84.3. Для варианта модели с симметричными стойками было выполнено сравнение интегральных характеристик работы отсека и проведен корреляционный анализ влияния качества диффузора на улучшение работы блока. Проведен статистический анализ различий расчетных и экспериментальных скоростей потока в контрольных сечениях на базе экспериментальных измерений 3*D*-полей скорости потока.

ГАЗОВАЯ ТУРБИНА. ВЫХОДНОЙ ДИФФУЗОР. КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ. БЛОК «ПОСЛЕДНЯЯ СТУПЕНЬ ТУРБИНЫ — ВЫХОДНОЙ ДИФФУЗОР». 3D-ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА.

Борисевич А. В., Волков А. Н., Гичев Ю. В., Дьяченко В. А., Петкова А. П. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ И НАТЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СМОТКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ.

Рассматривается моделирование механизма смотки аморфной ленты. Предложена упрощенная модель процесса, для управления которой использована нелинейная обратная связь. Также разработан регулятор на основе адаптивной линеаризации по обратной связи для полной нелинейной модели, учитывающей упругие свойства ленты.

СМОТКА АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ. СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ. АДАПТИВНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ПО ОБРАТНОЙ СВЯЗИ. ВЕРИФИКАЦИЯ РОБАСТНОСТИ РЕГУЛЯТОРА.

Боровков А. И., Грунин В. В., Рутман Ю. Л. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАДЕНИЯ КОНТЕЙНЕРА С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ.

Работа посвящена исследованию амортизации контейнеров, предназначенной для защиты контейнера с отработавшим ядерным топливом при его вертикальном падении с высоты 9 м. Приведено описание конструкции транспортного упаковочного комплекта и строения его отдельных элементов. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния для пространственной модели транспортного упаковочного комплекта с учетом контактного взаимодействия. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

ОТРАБОТАВШЕЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО. ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕВОЗКА ВЕРТИКАЛЬНОЕ ПАДЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ. СИСТЕМА АМОРТИЗАЦИИ. КОНТЕЙНЕР. ОЯТ. ТУК. МАГАТЭ.

Грязнов Н. А., Кочкарев Д. А., Соснов Е. Н. ЛАЗЕРНО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ТРЕХМЕРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕЛЕКАМЕРЫ.

Проанализированы преимущества использования лазерно-телевизионной триангуляционной системы реального времени. Предложен подход к построению лазерно-телевизионной триангуляционной системы трехмерного позиционирования с высокоскоростной телекамерой, продемонстрированный на примере их использования для космических транспортно-манипуляционных систем.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ. ДИСТАНЦИОННОЕ ОСЯЗАНИЕ. ЛАЗЕРНАЯ СТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОДСВЕТКА. КОСМИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНО-МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА.

Востров В. Н, Яблокова Н. А., Кононов П. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАСКАТАННЫХ ДЕТАЛЯХ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.

Исследованы неразрушающим методом дифракции рентгеновских лучей остаточные напряжения и структура поверхностей детали из алюминиевого сплава АК7 с фланцем, изготовленным раскаткой на трубчатой заготовке.

ТЕХНОЛОГИЯ. ДЕТАЛЬ С ФЛАНЦЕМ. ХОЛОДНАЯ КУЗНЕЧНАЯ ОБРАБОТКА. НАПРЯЖЕНИЕ. СТРУКТУРА МЕТАЛЛА. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.

Земляков Е. В., Туоминен Я., Поздеева Е. Ю., Туричин Г. А., Комарова Е. А. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ.

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса лазерной наплавки, в которых применялось сканированием с помощью волоконного лазера мощностью 15 кВт. Поверхностные слои наплавляли в виде одиночных треков и непрерывных покрытий. В качестве материала подложки использовали низкоуглеродистую сталь. Показаны преимущества использования для лазерной наплавки лазеров высокой мощности.

ВЫСОКОМОЩНЫЕ ВОЛОКОНЫЕ ЛАЗЕРЫ. ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ.

Сомонов В. В. ВЛИЯНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.

Работа посвящена исследованию влиянию процесса индукционного нагрева пластин на предотвращение образования в них горячих трещин при лазерной стыковой сварке. В качестве образцов использовались пластины из алюминиевых сплавов марок 6082Т4 и 5754Н22 толщиной 2 мм. Приведены результаты численного моделирования температурных полей, а также полей термонапряжений, возникающих в заготовке в процессе индукционного нагрева. Представлены результаты экспериментальной проверки моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. SYSWELD. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ. ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЕ. ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ.

Иванова О. А., Зубов В. И., Зубова А. Ф., Стрекопытова М. В. ЗАДАЧА ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ АБЕЛЯ.

В статье рассмотрена задача установления условий и конструирования систем, при которых траектории системы остаются в заданном множестве.

УСТОЙЧИВОСТЬ. ТРАЕКТОРИЯ. КОЛЬЦО. СИСТЕМА. МНОЖЕСТВО. УРАВНЕНИЕ. ПЕРЕМЕННАЯ.

Брунман В. Е., Волков А. Н., Коняшин А. В., Петкова А. П., Смородов А. В. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ.

Исследовано влияние различных конструкций и применяемых материалов на долговечность и энергоэффективность мембранных электролизеров. Разработана экспериментальная малогабаритная биполярная электролизная установка (ЭМБЭ), оснащенная адаптивной многоуровневой распределенной автоматизированной системой управления (АСУ). Результатами тестирования показано, что контроллер АСУ ЭМБЭ по своим возможностям полностью удовлетворяет целям сбора, скоростной обработки технологических сигналов и выдачи команд управления в производственных условиях станций обеззараживания и водоподготовки, а программное обеспечение АСУ ЭМБЭ обеспечивает простоту скоростной обработки и графической визуализации технологических сигналов состояния оборудования и телеизмерений давления в составе систем мембранного электролизера.

МЕМБРАННЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗЕР. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ И ВОДОПОДГОТОВКА.

Ташевский А. Г. МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Рассмотрены аспекты совершенствования математического аппарата и методов моделирования редких событий и экстремальных значений случайных величин, используемых при обеспечении безопасности сложных технических систем.

СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ. РЕДКИЕ СОБЫТИЯ. СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. НАДЕЖНОСТЬ. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

Иванов А. Е., Юхнев А. Д., Сенчик К. Ю., Ушаков Ф. Г. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПЕРЕНОСНОГО МЕХАТРОННОГО КАРДИОКОМПРЕССОРА ДЛЯ ЗАКРЫТОГО МАССАЖА СЕРДЦА.

Предложен новый подход к созданию мехатронного комплекса для наружной компрессии грудной клетки с двухконтурной системой очувствления, позволяющей добиться повышения эффективности проведения процедуры сердечно-легочной реанимации.

СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНАЯ РЕАНИМАЦИЯ. НАРУЖНАЯ КОМПРЕССИЯ. КАРДИОКОМПРЕССОР. СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ. МЕХАТРОНИКА.

Феофанов Ю. А., Ряховский М. С. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ СОРБЕНТОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАГРУЗКИ ФИЛЬТРА.

Объект исследования — активированные угли с различной структурой молекулярных решеток. В процессе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования свойств активированных углей и комплексных загрузок. В результате была доказана целесообразность применения комплексных загрузок сорбционных фильтров с послойным распределением макропористых и микропористых активированных углей.

СОРБЕНТЫ. АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ. СОРБЦИОННЫЙ ФИЛЬТР. КОМПЛЕКСНЫЕ ЗАГРУЗКИ ФИЛЬТРОВ.

Розов А. Л., Белянин В. А. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЖАРНОГО НАДЗОРА.

Анализируются проблемы принятия управленческих решений при планировании проверок состояния пожарной безопасности объектов, а также проблемы определения основных показателей, влияющих на проведение проверок.

ПЛАНОВЫЕ ПРОВЕРКИ. УГРОЗА ПОЖАРА (ЗАГОРАНИЯ). ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРА (ЗАГОРАНИЯ). КРИТЕРИИ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ.

Гуменюк В. И., Доброборский Б. С., Федосовский М. Е. РОТАЦИЯ КОНТРОЛИРУЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА КАК СРЕДСТВО УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

Для уменьшения влияния человеческого фактора — процесса естественной адаптации контролирующего персонала энергетических объектов к источникам опасности — предлагается определять закономерность и время достижения процессом адаптации опасного уровня, после которого персонал подлежит ротации.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. АДАПТАЦИЯ. ЭНЕРГЕТИКА. РОТАЦИЯ.

Савин С. Н. ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

Рассмотрены проблемы обеспечения охраны труда и техники безопасности при экспериментальных исследованиях на статических стендах и сейсмостендах. Изложены основные проблемы применительно к особенностям и содержанию испытаний.

ОХРАНА ТРУДА. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ. БЕЗОПАСНОСТЬ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ. СТЕНД ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ. СЕЙСМОСТЕНД. БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЗАЩИТНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ. ОЦЕПЛЕНИЕ.

Гуменюк В. И., Ломасов В. Н., Моторный А. В., Коробицын А. Р. ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО МЕТАЛЛА С ЦЕЛЬЮ ПЕРЕВОДА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ШЛАК.

Рассмотрены недостатки традиционных методов плавления металлических радиоактивных отходов (МРО). Предложена более экономически целесообразная технология плавления МРО с переводом радионуклидов в шлак и получением чугуна для вторичного использования в промышленности. Проведены экспериментальные исследования данной технологии и предложена модель лабораторной установки для проведения полупромышленных исследований процесса плавления МРО.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ. РАДИОНУКЛИД. ОБЛУЧЕНИЕ СТАЛИ; ПЛАВЛЕНИЕ СТАЛИ. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШЛАКА. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕПЛАВА В ШАХТНОЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ ПЕЧИ.

Афанасьева И. Б., Бежанова А. И., Димент Л. И. ФОРМИРОВАНИЕ РЕФЛЕКСИВНЫХ УМЕНИЙ СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ.

В статье рассмотрены педагогические и психологические аспекты формирования рефлексивных умений студентов в обучении, в том числе совокупность педагогических условий для формирования рефлексивных умений как базиса рефлексии.

РЕФЛЕКСИВНЫЕ УМЕНИЯ. ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ. УЧЕБНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.

Попок И. А., Коберницкий В. Е. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ У СТУДЕНТОВ ВОЕННЫХ КАФЕДР НАВЫКОВ И УМЕНИЙ ВОСПИТАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ В ПОДРАЗДЕЛЕНИИ.

Рассматриваются вопросы методической подготовки для формирования у студентов военных кафедр гражданских вузов педагогических знаний, навыков и умений по организации и проведению воспитательной работы в подразделении в процессе повседневной деятельности. Модель методической подготовки построена на основе системного подхода, теории поэтапного усвоения умственных действий и концепции программированного обучения.

ОБРАЗОВАНИЕ. РЕФОРМИРОВАНИЕ. МОДЕЛЬ. МЕТОДИКА.

Буймов А. Г. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗАКОНОВ ОСВОЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ НАВЫКОВ В ПРОГРАММАХ РЕПЕТИЦИОННОГО ТИПА.

Строятся две модели функций забывания. Одна из них позволяет учесть влияние эффекта ретроактивной интерференции, другая – лучше понять роль повторений и мотивации к обучению в программах и тренингах репетиционного типа.

ФУНКЦИИ ЗАБЫВАНИЯ. РЕТРОАКТИВНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. МОТИВАЦИЯ К ОБУЧЕНИЮ. РОЛЬ ПОВТОРЕНИЙ В ОБУЧЕНИИ.

Кобчиков В. С., Ступак В. Б. ПРОФСОЮЗНЫЙ КОМИТЕТ СОТРУДНИКОВ СПбГПУ.

В статье рассматриваются результаты работы профкома сотрудников СПб ГПУ за период 2008–2013 годов. Результаты иллюстрируются наглядно в виде графика и гистограммы.

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ СОЮЗЫ. ВЦСПС. ПРОФКОМ. ЧЛЕНЫ ПРОФСОЮЗА. КОЛЛЕКТИВНЫЙ ДОГОВОР. БАЗЫ ОТДЫХА. МЕДИЦИНСКИЕ СТРАХОВЫЕ ПОЛИСЫ.

Кесаманлы М. Ф., Кесаманлы Ф. П. АКАДЕМИК ГЕОРГИЙ НИКОЛАЕВИЧ ФЛЕРОВ (К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Г.Н. Флёров окончил инженерно-физический (физико-механический) факультет Ленинградского индустриального (политехнического) института в 1938 году. Работал в Физико-техническом институте в 1938–1941 годах в Ленинграде и в 1942–1943 годах в Казани, с 1943 по 1957 год — в Лаборатории № 2 (с 1949 года Лаборатория измерительных приборов — ЛИПАН, а с 1956 Институт атомной энергии) АН СССР и с 1957 по 1990 год в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

ФЛЁРОВ Г.Н.. ЛЕНИНГРАДСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ. ЛАБОРАТОРИЯ № 2. ЛИПАН. ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ОИЯИ.

Демидов А. И. МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПАВЛОВ В ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ (К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ).

Очерк об истории развития металлургического факультета Санкт-Петербургского политехнического института и деятельности профессора М. А. Павлова в период с 1904-го по 1952 год.

ИНСТИТУТ. ФАКУЛЬТЕТ. КАФЕДРА. МЕТАЛЛУРГИЯ. ЧУГУН.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Zheleznyakov A. B. SPACE ACTIVITIES OF THE WORLD IN 2012.

The article describes the various aspects of space activities around the world in 2012: human space flight, the study of the planets application projects. Besides the large factual information and statistics, the comparative analysis of space activities in 2012 in relation to 2011. Outlined's forecast for 2013 in the field of space activities.

SPACE. COSMONAUTICS. ISS. NAVIGATION. MARS.

Arseniev D. G. Malyugin V. I. ST.-PETERSBURG POLYTECHNICAL TRAINING PERSONNEL FOR ENERGY VIETNAM.

Currently, expands the scope of cooperation with the Socialist Republic of Vietnam. A project to create a Vietnamese-Russian Institute of Technology in Hanoi, an intergovernmental agreemention of Russia's participation in the construction of Vietnam's first nuclear power plant, there is a long-term cooperation with leading universities in Vietnam. The questions of training for the Socialist Republic of Vietnam for the nuclear industry and in other areas in the St. Petersburg State Polytechnic University.

NUCLEAR ELECTRICAL POWER ENGINEERING. RUSSIAN-VIETNAMESE COLLABORATION. VIETNAMESE-RUSSIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. EDUCATIONAL PROGRAMS IN AREA OF NUCLEAR ENERGETICS.

Pham H. A., Rassokhin V. A., Andreev K. D. STATUS AND PROSPECTS OF ENERGY DEVELOPMENT VIETNAM.

The current state of Vietnam energy sector has been considered. Some project for electric power development is outlined.

STATUS. PROSPECTS. DEVELOPMENT. ENERGY. PROJECT. COMBINATION GAS-STEAM TURBINE.

Garmider D. N., Fomin V. A. SPECIFICATIONS FOR CYCLE PLANTS THE ANTIEMERGENCY POWER SYSTEM CONTROL.

The article considers the characteristics of the equipment of the CCGT during the impulse unloading of the turbines. The research was conducted on a basis of a constructed mathematical model of the dynamics of the power unit.

CCGT. MATHEMATICAL MODELING. IMPULSE UNLOADING. STABILITY. MANEUVERABILITY.

Zakharov A. V., Shpenzer G. G. CRITICAL OPERATING MODES OF LPC STAGES WITH BLADES WITH OVERALL LENGTH.

An issue of appearance of steam flow separation in LPC last stages in varying operating modes and coming from this decrease of stages efficiency is examined in the article.

STABILITY. CRITICAL OPERATING MODES. WET STEAM. PERFORMANCE INDEX. OPTIMIZATION.

Zabelin N. A., Rakov G. L., Rassokhin V. A., Sebelev A. A., Smirnov M. V. RESEARH OF FLOW CHATACTERISTICS IN LOW FLOW RATE LPI TURBINE STAGES.

In this article on the basis of the calculations performed in the software package ANSYS CFX were considered the characteristics of the flow in the low flow rate LPI turbine stages. The main problems of such turbine stages and ways of optimization identified.

LOW FLOW RATE TURBINE STAGES. LPI TURBINE STAGES. THREE-DIMENSIONAL GAS DYNAMIC CALCULATIONS. OPTIMIZATION.

Zaharov V. M., Smirnov N. N., Lapateev D. A. REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION BY APPLYING HEAT REFLECTIVE SCREENS IN WINDOWS.

Results of researches on increase of thermal resistance of window blocks and walls of buildings on the basis of using heat-reflecting metal screens are resulted, and also influence of the given designs on work of power supply systems is specified.

HEAT-REFLECTING SCREENS. WINDOWS. THE SYSTEM OF ENERGY SUPPLY IN BUILDINGS. THERMAL RESISTANCE. BLINDS.

Lapshin K. L. OPTIMIZATION OF FLOW PARTS OF STEAM TURBINES USING «INTEGRAL» NOZZLE BLADES.

Considered are the peculiarities of mathematical model the design of gas-dynamic calculate the steam turbine, the structure of the program of computer optimization and methods the spatial design of nozzle blades of the low pressure cylinders steam turbines. Provisions of the theory are illustrated by examples of computer optimization low pressure cylinder of the steam turbine.

STEAM TURBINE. COMPUTER OPTIMIZATION. THE LOW-PRESSURE CYLINDER.

Boguslawsky I. Z., Danilevich Ja. B., Popov V. V., Rogachewsky V. S. SPECIAL FEATURE OF DOUBLE-FED MACHINES ELECTRO - MAGNETIC LOADS CALCULATION WITH CONSIDERATION OF SATURATION AND HIGH TIME HARMONICS.

For double-fed a.c. machines by various values of slip operation current and voltage complex values equations are developed. Moreover the equations for active, reactive power of exciter in rotor winding (for example of the converter cycles) taking into account saturation of machine magnetic circuit and high time harmonics are derived. Assumed, that the MMF high space harmonics in air gap of large double-fed machines have only the leakage components and the influence on torque at the shaft of double-fed a.c. machines is not exert.

DOUBLE-FED MACHINE; SLIP; MMF; COMPLEX AMPLITUDES OF MMF. CURRENT AND VOLTAGE; ROTOR WINDING; SLIP RINGS.

Korovkin N.V., Shishigin S.L. CALCULATION METHODS IN THE GROUNDING THEORY.

The article considers the modern mathematical models, methods, programs for definition of parameters of grounding devices and their electromagnetic fields.

GROUNDING DEVICES. MATHEMATICAL MODELS. CALCULATION METHODS.

Bocharov Y. N., Zhuk V.V . LIGHTNING PROTECTION OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINE WITH COMPOSITE TOWERS.

In this article problems of lightning protection of overhead transmission line with towers made of composite materials. Causes of problems, methods of design optimization and the need to use electrical properties of composite materials are stated.

OVERHEAD TRANSMISSION LINE. COMPOSITE TOWERS. LIGHTNING PROTECTION

Vysogorets S. P., Vasilyev A. P. QUALITY ASSESSMENT OPERATING OIL POWER TRANSFORMERS 35–110 KV.

Analyzed is the existing approach to evaluation of technical conditions of 35–110 kV power transformers relying on the results of physicochemical analysis of insulating oils, the drawbacks of such approach pointed out.

Proposed is a system for more adequate evaluation of operational transformer oil parameters and measures for its serviceability recovery and prolongation.

One has demonstrated the necessity: to introduce a new indicator of operational transformer oils quality – "oxidation stability"; revise the threshold values of the acidity index, of content of water-soluble acids and alkali, oil dielectric loss angle tangent, content of agidol-1 (ionol) antioxidant additive in oils filled into 35 - 110 kV power transformers without dedicated oil protections; revise the scope of indicators to be measured for scheduled physicochemical analysis of oil samples established for 35–110 kV power transformers without dedicated oil protections.

EVALUATION. CHEMICAL CONTROL. TRANSFORMER OIL. TRANSFORMER.

Shklyarskiy A. Y., Ustinov D. A., Sychev Y. A. PROBLEMS USING ELECTRICAL RIGS.

The paper gives the analsys of SEM's starting mode at different distances from the power supply. The advantages of facilities that implement combined method of voltage compensation in power lines and allow to use frequent start and dynamic compensator of voltage distortion benefits are shown.

SUBMERSIBLE ELECTRIC MOTOR. DYNAMIC COMPENSATION. STARTING MODE. VOLTAGE DIPS. POWER LINE.

Andreev I. A., Bezborodov A. A. DEVELOPING THE METHODOLOGY OF IDENTIFICATION OF DEFECTS OF STATOR WINDING INSULATION OF HIGH VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES

Development identification technique stator winding insulation defects high electric machines.

In this paper the problem of identifying technological defects high voltage insulation of electrical machines using the statistical characteristics of partial discharges are considered. Examples of methods to real samples insulation of electric machines are presented.

ELECTRICAL INSULATION. DEFECT. PARTIAL DISCHARGES.

Shonin O. B. VOLTAGE OBSERVER-BASED CLOSED-LOOP BALANCING CONTROL OF THE FOUR LEVEL FLYING CAPACITOR FREQUENCY CONVERTER FOR MV ELCTRIC DRIVE APPLIATIONS.

The paper submitted is devoted to the development of automatic voltage–balancing control system of a 4-level inverter which is based upon PWM correction of the capacitor charging/discharging process parameters according to feed back control signals obtained with assistance of a flying capacitors voltage observer. Verification of the algorithms elaborated is implemented via simulation of frequency converter transient responses.

MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTER. VOLTAGE BALANCE. PULSE WIDTH MODULATION. VOLTAGE OBSERVER. FEED-BACK CONTROL. SIMULATION.

Anastasiadi G. P., Kondratyev S. Yu., Orischenko A. S., Petrov S. N., Fuks M. D. INFLUENCE OF HEATING-COOLING CYCLES ON LONG-TERM STRENGTH OF CAST HEAT-RESISTANT ALLOY 45Cr26Ni33Si2Nb2.

Experimentally was determined long-term strength at the temperature of 1150 °C of heat-resistant alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2 in two conditions: cast and after preliminary exposure at 1150 °C in the range of time 2–100 hours with the subsequent cooling in the furnace. It was detected that catathermal working conditions influence on long-term strength of the alloy more negative by comparison with isothermal, especially in an initial stage of operation. It was recommended to reduce quantity of technological heating-cooling cycles for an increase of the remaining life of the high-temperature equipment made from heat-resisting Fe-Cr-Ni-alloys.

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. LONG-TERM STRENGTH. HEAT TREATMENT. REMAINING LIFE OF THE HIGH-TEMPERATURE EQUIPMENT.

Zolotov A. M., Parshikov R. A., Boklag N. Y., Parshin S. V., Trutnev E. V. DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BLANKS IN CHANNEL ANGULAR PRESSING IN S-TYPE CHANNELS.

Using mathematical modeling analysis of the combined process of extrusion and equal channel angular pressing (ECAP) blanks in S-shaped channel. The features of the metal flow during ECAP, the influence of process parameters on the stress-strain state in the metal and the amount of accumulated plastic strain.

CHANNEL ANGULAR PRESSING. S-SHAPED CHANNEL. THE METAL FLOW. ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN.

Skotnikova M. A., Mironova E. V., Krylov N. A., Sokolov A. V. HIGH-TEMPERATURE DISINTEGRATION OF FIRM SOLUTIONS AT POLYMORPHIC $\alpha \leftrightarrow \beta$ TRANSFORMATION OF THE DEFORMED ALLOYS OF THE TITAN.

In work it is presented the literature on the specifics of the polymorphic transformation in titanium and its alloys.

Develops the representation and builds a crystallogeometric model high-temperature vacancy-supersaturated state of the bcc lattice of titanium are formed by the polymorphic transformations during heating of the close-packed hcp modification.

ALLOYS OF THE TITAN. POLYMORPHIC TRANSFORMATION. DISINTEGRATION OF FIRM SOLUTIONS. CRYSTALLOGRAPHIC MODEL. VACANCY SUPERSATURATION.

Lunev V. A., Shishov I. A., Glukhov P. A., Belyaev A. A. THE HEAT LOSSES DURING PLATES ROLLING ON THE MILL 5000.PART 1: THE HEAT LOSSES DURING PRECEDING OPERATIONS.

The slab heat losses during operations preceding rolling at the mill 5000 JSC «Severstal» are investigated. Simple dependences for the surface temperature and the integral temperature of the metal providing high performance and accuracy are suggested.

ROLLING OF PLATES. TEMPERATURE. MODELING.

Koltsova T. S., Nasibulin A. G., Vasilyeva E. S., Egorov V. V. THE STRUCTURE OF CARBON NANOFIBERS SYNTHESIZED ON THE COPPER CATALYST.

In this paper we investigated the effect of carbon-hydrogen ratio influence on the morphology of carbon product synthesized on a copper particles catalyst. The structure of carbon nanofibers produced at the different content of the gas phase we studied precisely by (TEM) and (SEM) techniques. The mechanism of the carbon nanostructures growth on a copper catalyst is carried out.

CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (CVD). COPPER CATALYST. CARBON NANOFIBERS.

Alexeyev G. A. DETECTING MECHANICAL PROPERTIES OF THIN FILMS.

The article reviews the detection issues of mechanical properties of thin films. Researching detection precision of microhardness and plasticity with low depth indenter indenting.

THIN FILMS. MICROHARDNESS. PLASTICITY. INDENTER. MICRO-RELIEF.

Demidov A. I., Markelov I. A. THERMODYNAMICS OF INTERACTION OF MAGNETITE AND WUSTITE WITH CARBON MONOXIDE TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGING OF WUSTITE COMPOSITION WITH TEMPERATURE

Gibbs energy values of wustite in equilibrium with both iron and magnetite taking into account the changing of wustite composition with temperature, and equilibrium mole fraction of carbon monoxide in the gas phase in an interaction of magnetite and wustite with carbon monoxide were calculated; the results were compared with experimental data.

MAGNETITE. WUSTITE. CARBON MONOXIDE. REDUCTION. THERMODYNAMICS.

Rusinov R. V., Dobretsov R. U. INFLUENCE OF THE OPERATING MECHANISM ELASTICITY IN DIESEL FUEL SUPPLY SYSTEM ON THE FUEL INJECTION PARAMETERS.

Suggested methodology for theoretical evaluation of toughness of the high pressure fuel injection pump linkage and analyzed its effect on the pressure and actual duration of the diesel fuel injection process.

DIESEL. RUNNING CYCLE. FUEL SUPPLY SYSTEM TOUGHNESS.

Bashkarev A. Ya., Musiyako D. V., Peshkov V. V. OSCILLATORY MOTION OF THE PLATE COMPACTOR.

Conditions for the plate compactor movements are computed with help of mathematical model. In order to increase the quality of compaction and facilitate the movement of compactor it is additionally equipped with a roller.

THE MOVEMENT OF THE VIBRATION PLATE. EQUIPPED WITH VALCYTE.

Petrichenko M. R. EXTREMALS, CHARACTERISTICS FREE SURFACE AND THE «PRINCIPLE OF MINIMUM DISSIPATION» FOR A FREE FLOW.

Shown that the free surface of a free flow coincides with the characteristic Lagrange equations for a minimum of (extreme) pressure loss. Stratification of flow characteristics, therefore, immersed in a bunch of extremals. The free surface of the head loss and dissipation is minimal.

EXTREMALS. BEAM EXTREMALS. GROUP ONE-PARAMETER. THE DIFFEOMORPHISM (FLOW). THE FREE SURFACE. CHARACTERISTICS.

Grigoriev A. V., Yakunin A. I., Kuznechov N. B., Kondratiev V. F., Kortikov N. N. CALCULATION OF UNSTEADY ROTOR-STATOR INTERACTION IN TURBINE STAGE HARMONIC BALANCE.

This paper represents 3D flow in turbine cascade in which the harmonic balance method is applied for modeling stator – rotor interaction and pressure fluctuations near trailing edges. The harmonic balance method which is included in Star CCM+ code can simulate the whole unsteady flow at considerably reduced CPU costs. Computational results are compared with experimental results which show importance of unsteady effects.

UNSTEADY EFFECTS. TURBINE STAGE. ROTOR/STATOR INTERACTION. PRESSURE FLUCTUATIONS. HARMONIC BALANCE METHOD.

Maksarov V. V. USING ANISOTROPIC PROPERTIES OF METAL TOOL FOR MANUFACTURE SHAKEPROOF.

The article proposing a new technology for manufacturing of vibration-proof tool with multilayered damping tool holder. Desired damping effect is obtained by anisotropic properties of tool holder plates, as a result from machining by pressure a source material. The experimental research in the piece processing allows to provide effective dynamic absorbing of vibration. This method is more effective (in comparison with standard methods) because it have high coefficients of damping and absorption. The value of dissipative force of multilayered tool holder material (with differently directed structure) is enough to ensure a good damping effect.

CUTTING OF MATERIALS AND CUTTING PROCESSING. DYNAMIC POSITIONING. THE TEXTURE OF ARBORS. ANISOTROPIC PROPERTIES.

Zander M. S., Semakina E. J., Chernikov V. A. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF 3D-FLOW STRUCTURE IN THE BLOCK «TURBINE STAGE — AXIAL DIFFUSER».

Results of experimental and numerical research of the block «last turbine stage — exhaust diffuser» are shown on an example model turbine V84.3. The comparing of block integral characteristics were performed for the model with symmetric struts, and correlation analysis of diffuser impact on improving quality of the unit was made. Statistical analysis of the deviations between the calculated and experimental flow velocities at the control plans on the basis of experimental measurements of 3D-velocity flow fields had been carried out.

GAS TURBINE. EXHAUST DIFFUSER. STATIC PRESSURE RECOVERY COEFFICIENT. BLOCK «LAST TURBINE STAGE - EXHAUST DIFFUSER». 3D-VELOCITY FLOW FIELDS.

Borisevich A. V., Volkov A. N., Gichev Yu. V., Dyachenko V. A., Petkova A. P. DEVELOPMENT AND MODELING OF COHERENT MANAGEMENT TO STABILIZE THE SPEED AND TENSION IN THE PROCESS OF WINDING AMORPHOUS RIBBON.

In this paper the modeling of amorphous ribbon winding mechanism is considered. A simplified model of the process with nonlinear feedback control is proposed. Also developed an adaptive controller based on feedback linearization for the full nonlinear model, which takes into account the elastic properties of the tape.

AMORPHOUS RIBBON WINDING. SYNCHRONIZATION CONTROL. ADAPTIVE FEEDBACK LINEARIZATION. SIMULATION OF ROBUST CONTROLLERS.

Borovkov A. I., Grunin V. V., Rutman Y. L. THE DESCRIPTION OF THE CONTAINER WITH FULFILLED NUCLEAR FUEL AT VERTICAL FALLING.

This article includes information about amortization of the container with fulfilled nuclear fuel at vertical falling from height of 9 m. The description of structure of container and calculations of stress and deformed shape for spatial model with contact interaction is provided in this work. Comparison with experimental data is given.

FULFILLED NUCLEAR FUEL. STORAGE AND TRANSPORTATION. VERTICAL FALLING FROM HEIGHT. EXPERIMENTAL DATA. AMORTIZATION. CONTAINER. IAEA.

Gryaznov N. A., Kochkaryov D. A., Sosnov E. N. LASER TRIANGULATION TELEVISION THREE-DIMENSIONAL POSITIONING SYSTEM-BASED HIGH-SPEED CAMERA.

Advantages of laser-TV real-time triangular system usage are analyzed. Approach to design of 3D positioning system on a base of high-speed cameras is considered on the example of mobile space manipulating platforms.

COMPUTER VISION. DISTANT TOUCHING. LASER STRUCTURED ILLUMINATION. MOBILE SPACE MANIPULATING SYSTEMS. TV CAMERA.

Vostrov V. N., Jablokova N. A., Cononov P. V. STUDY OF RESIDUAL STRESSES IN THE ROLL OUT OF PARTS BY X-RAY DIFFRACTION.

Residual pressure (voltage) and structure of surfaces of a detail with a flange from the aluminium alloy AK7, made by plastic processing on tubular preparation are investigated by not destroying method of diffraction of X-rays.

TECHNOLOGY. DETAIL WITH THE FLANGE. COLD FORGE PROCESSING. THE PRESSURE (VOLTAGE). STRUCTURE OF METAL. X-RAY RADIATION.

Zemlyakov E. V., Tuominen J., Pozdeeva E. Yu., Turichin G. A., Komarova E.A. FORMATION OF SURFACE LAYERS DURING LASER CLADDING USING A POWERFUL FIBER LASER.

The results of experimental studies of the process of laser cladding with scanning with the help of a 15-kV fiber laser are presented in the article. The surface layers are deposited in the form of single tracks and continuous coatings. The substrate material is low-carbon steel. The advantages of the use of high-power lasers for laser cladding are demonstrated.

HIGH-POWER FIBER LASERS. LASER CLADDING. FUNCTIONAL LAYERS.

Somonov V. V. EFFECT OF INDUCTION HEATING TO PREVENT HOT CRACKING DURING LASER WELDING OF ALUMINUM ALLOYS.

The work is devoted to research of influence of the process of induction heating plates on the prevention of hot cracks in laser butt welding. Plates were used, which were made from aluminum alloys 6082T6 and 5754H22 with thickness of 2 mm. The article shows the results of numerical modeling of temperature fields and stress fields formed during the process of induction heating. The results of experimental validation of the simulation were demonstrated.

MODELING. SYSWELD. INDUCTION HEATING. ALUMINUM ALLOYS. THERMAL STRESS. HOT CRACK.

Ivanova O. A., Zubov V. I., Zubova A. F., Strecopitova M. V. PROBLEM OF THE STABILITY OF THE LIMIT CYCLE SOLUTIONS OF THE ABEL EQUATION.

In giving article is looks the questions of task installing the conditions and construction systems, by that the trajectories of systems is remains in giving multitude.

STABILITY. TRAECTORY. RING. SYSTEM. MULTITUDE. EQUATION. VARIABLE.

Brunman V. E., Volkov A. N., Konyashin A. V., Petkova A. P., Smorodov A. V. IMPACT OF THE MATERIALS USED AND CONTROL ALGORITHMS FOR DURABILITY AND ENERGY EFFICIENCY OF MEMBRANE ELECTROLYSERS.

The effect of various designs and materials used for durability and energy efficiency of membrane electrolysers. An experimental small scale bipolar electrolysis plant EMBE equipped with adaptive multi-level distributed automated control system (ACS). Test results showed that the controller ACS EMBE in their capabilities fully satisfy the objectives of the collection, processing speed signal processing and issuing commands in a production environment decontamination and water, and process control software for easy EMBE speed processing and graphics rendering process signals of equipment and telemetry pressure in the systems of the cell membrane.

MEMBRANE ELECTROLYZERS. AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEM WATER DISINFECTION AND TREATMENT.

Tashevsky A. G. MODELS FOR EMERGENCIES ENSURE THE SAFE FUNCTIONING OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS.

In this article we see aspects of perfection of mathematical apparatus and methods of modeling of rare events and extreme values of random variables at safety of difficult technical systems.

DIFFICULT SYSTEMS. RARE EVENTS. RANDOM VARIABLES. RELIABILITY. EXTREME DISTRIBUTIONS.

Ivanov A. E., Yuhnev A. D., Senchik K. Yu., Ushakov F. G. PROSPECTS OF CREATING PORTABLE MECHATRONIC CHEST COMPRESSION SYSTEM FOR CARDIOCEREBRAL RESUSCITATION.

New approach to creation of an automatic chest compressor with a two-loop feedback permits increasing efficiency of a cardiopulmonary resuscitation procedure.

CARDIOPULMONARY RESUSCITATION. CLOSED-CHEST CARDIAC MASSAGE. CARDIOCOMPRESSOR. SENSOR MEANS. MECHATRONICS.

Feofanov Yu. A., Ryakhovskiy M. S. THE RESULTS OF STUDIES ON CHOICE OF SORBENTS FOR THE FILTER WITH A COMPLEX LOADING.

The object of the study were activated carbons with different structures of molecular arrays. In the process carrying out theoretical and experimental studies of the properties of activated carbons and complex loads. The studies proved the feasibility of integrated downloads sorption filter with stratified macroporous and microporous activated carbons.

SORBENTS. ACTIVE CARBON. SORPTION FILTER. THE COMPLEX LOADING OF SORPTION FILTERS.

Rozov A. L., Belyanin V. A. METHOD MANAGEMENT TERRITORIAL SUBDIVISION OF STATE FIRE CONTROL.

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.

PLAN INSPECTION. SOURCE OF FIRE. THREAT OF FIRE. OUTBREAK OF FIRE. SOURCE OF FIRE.

Humeniuk V. I., Dobroborsky B. S., Fedosovsky M. E. ROTATION OF THE SUPERVISORY STAFF AS A MEANS OF REDUCING THE IMPACT HUMAN FACTORS ON THE RELIABILITY OF THE OF POWER FACILITIES.

To reduce the influence of the human factor - the process of natural adaptation of supervisory personnel to sources of energy facilities proposed definition of risk patterns and the process of adapting the time to reach a dangerous level, after which the staff is subject to rotation.

THE HUMAN FACTOR. ADAPTATION. ENERGY. ROTATION.

Savin S. N. LABOUR PROTECTION AND SAFETY ENGINEERING IN CARRYING OUT OF BENCH TESTS OF BUILDING STRUCTURES.

The article considers the problems of ensuring health and safety in experimental studies on the static stands and seismic stands. Set out the main issues in relation to the nature and content of the tests.

HEALTH. SAFETY. SECURITY TEST BENCH. BENCH FOR STATIC LOADING. SHAKE TABLE. SECURITY BUILDING STRUCTURES. SEISMIC SECURITY BUILDINGS. GUARDS. CORDON.

Humeniuk V. I., Lomasov V. N., Motornyi A. V., Korobitsyn A. R. RADIOACTIVE METAL MELTING TECHNIQUES IN ORDER TO TRANSFER THE MAIN PART IN THE SLAG RADIONUCLIDES.

The article describes the shortcomings of traditional methods of melting metal waste (MRW). Offered a more cost-effective technology transfer from melting MPO radionuclides in the slag and iron to produce recycled in the industry. Experimental studies of the technology and the model of the laboratory setup for the semi MRI studies of melting.

METALLIC RADIOACTIVE WASTE. RADIONUCLIDES. IRRADIATED STEEL; MELTING STEEL CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL. CHEMICAL COMPOSITION OF SLAG. TECHNOLOGY REMELTING IN COUNTERCURRENT SHAFT FURNACE.

Afanasyeva I. B., Bezhanova A. I., Diment L. I. FORMATION OF STUDENTS REFLEXIVE SKILLS IN TRAINING.

The paper describes pedagogical and psychological aspects of formation students' reflexive skills in training. There is presented a stage of pedagogical conditions to formation of reflexive skills as a basis of reflexia.

REFLEXIVE SKILLS. PEDAGOGICAL CONDITIONS. EDUCATIONAL ACTIVITY.

Popok I. A., Kobernitsky V. E. MODEL FORM THE STUDENTS OF MILITARY DEPARTMENTS OF SKILLS AND ABILITIES OF EDUCATIONAL WORK IN SUBDIVISION.

In article questions of methodical preparation of students of military chairs of civil higher education institutions on formation of pedagogical knowledge, skills and abilities of the organization and carrying out educational work in division in the course of daily activity are considered. The model of methodical preparation is constructed on the basis of a system approach, the theory of stage-by-stage assimilation of intellectual actions and the concept of the programmed training.

EDUCATION. REFORMATION. MODEL. METHODS.

Buimov A. G. THE PROBABILISTIC INTERPRETATION OF THE LAWS OF DEVELOPMENT AND CONSERVATION SKILLS THROUGH TRAINING PROGRAMS WITH REPETITIONS.

Two probabilistic models of forgetting functions are derived. One of them contributes to understanding influence of effect of a retroactive interference, another one – shows a role of repetitions and motivation to training in programs of rehearsal type.

FORGETTING FUNCTIONS. RETROACTIVE INTERFERENCE. MOTIVATION TO TRAINING. INFLUENCE OF REPETITIONS.

Kobchikov V. S., Stupak V. B. UNION COMMITTEE OF EMPLOYEES SPbSTU.

In the article the results of the trade union sotrudikov SPbSTU for the period 2008–2013. Provides illustrative data on the results in a graph or histogram.

TRADE UNIONS. THE ALL-UNION COMMITTEE. MEMBERS OF TRADE UNIONS THE COLLECTIVE AGREEMENT. RECREATION. MEDICAL INSURANCE POLICIES.

Kesamanly M. F., Kesamanly F. P. ACADEMICIAN GEORGY FLEROV (ON THE CENTENARY OF HIS BIRTH).

He graduated from the Engineering and Physical (physical and mechanical) of the industrial department of the Leningrad (Polytechnic) in 1938. He worked at the Physical-technical Institute in 1938–1941 years in Leningrad and in 1942–1943 years in Kazan, from 1943 to 1957 in the Laboratory № 2 (1949 Laboratory instrumentation — LIAS, and since 1956 the Institute of Atomic Energy), USSR and from 1957 to 1990 at the Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for nuclear Research in Dubna.

FLEROV G.N.. LENINGRAD POLYTECHNIC INSTITUTE. PHYSICS AND TECHNOLOGY INSTITUTE. LABORATORY № 2. LIAS. THE NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. LABORATORY OF NUCLEAR REACTIONS. JINR.

Demidov A. I. MIKHAIL ALEKSANDROVICH PAVLOV AT THE POLYTECHNIC (THE 150TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH).

Sketch about history of the development metallurgy department of the St.-Petersburg Polytechnic institute and activities of professor M.A. Pavlov in the period 1904 for 1952.

INSTITUTE. DEPARTMENT. CHIR. METALLURGY. CAST-IRON.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 1 (166) 2013

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

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

Научный редактор, корректор *Л.В. Спиридонова*
Технический секретарь *О.А. Матенёв*
Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 29.03.2013. Формат 60□84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 44,50. Тираж 1000. Заказ 55.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

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

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

• номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);

• аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;

• ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;

• сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;

• рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы.

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**