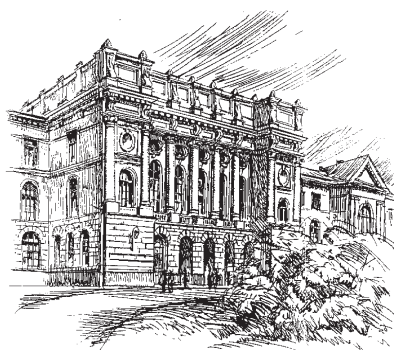


4(135)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011

Содержание

Поздравление Жоресу Ивановичу Алферову.....	9
---	---

К 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова

Рудской А.И., Морачевский А.Г. М.В. Ломоносов и его работы в области химии	11
Окрепилов В.В. Наследие великого ученого М.В. Ломоносова сохранили и преумножили	21
Снетков В.Н., Семенова К.А. М.В. Ломоносов о необходимости закрепления прав России в Арктике: опыт и преемственность	31

Энергетика и электротехника

Федоров М.П., Масликов В.И., Чусов А.Н., Молодцов Д.В. Экспериментальный комплекс по производству водорода из органосодержащих отходов для применения в топливных элементах	35
Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом	41
Кручинина И.Ю. О выборе конструкций и материалов асинхронного двигателя	51
Кравченко И.В., Костин В.Н. Автоматика ограничения снижения напряжения в энергосистемах мегаполисов	58
Соловьев Ю.В., Самарин Г.Н. Анализ условий развития дефектов в полимерных конструкциях оборудования ВЛ 6-35 кВ с изолированными проводами при гололедно-ветровых нагрузках	63
Шклярский Я.Э., Бунтеев Ю.Е., Радковский А.К., Кузнецов В.А. Влияние высших гармоник при измерении реактивной энергии в электрических сетях	67
Власов А.В. Расчет напряженности магнитного поля на средней линии постоянного магнита	70
Шклярский Я.Э., Круглов А.В., Шклярский А.Я. Учет активной и реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями	75
Богуславский И.З. Моделирование токов в демпферной обмотке мощной синхронной машины посредством замкнутой активной цепной схемы	79
Гонсалес И. Моделирование электрической сети и расчет ее режимов при наличии нелинейных искажений	86
Устинов Д.А., Коновалов Ю.В., Плотников И.Г., Турышева А.В. Вероятностные характеристики энергопотребления нефтегазодобывающих предприятий	90
Карпов А.С., Кравченко И.В., Костин В.Н., Попков Е.Н. Автоматизированная система контроля эффективности действия частотной делительной автоматики	94
Богуславский И.З., Рогачевский В.С. Метод расчета асинхронных режимов мощных синхронных машин с учетом распределения токов в демпферной обмотке	100
Киселёв В.Г. Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений	111

Машиностроение

Яблокова Н.А., Трофимов В.В. Остаточный ресурс ремонтных дисков компрессоров низкого давления	117
Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Особенности задачи исследования геометрии механизма с избыточными связями	122

Горелов А.С., Прейс В.В. Методологические основы автоматизированного статистического контроля качества продукции массовых производств	126
Хростицкий А.А., Терёшин В.А. Силовой анализ парадоксального механизма с избыточными связями	133
Кукаленко Б.Д., Чулкин С.Г. Упруго-демпфирующие характеристики шинно-пневматических муфт ..	138
Мазуренко И.А., Семёнов А.Г., Цветков В.В. Исследование возможности стабилизации движения транспортного средства с использованием акселерометров	141

Металлургия и материаловедение

Пупышев А.М., Попов И.О., Митрофанов Ю.А. Исследование процессов разделения железа и титана при выщелачивании восстановленного титаномагнетитового концентрата	149
Иванов Е.К., Скотникова М.А., Крылов Н.А. Структурно-фазовые превращения в труднообрабатываемых материалах как способ повышения износостойкости инструмента	155
Булатов В.В., Абакумов И.И., Кульчицкий А.А. Методика обнаружения пороков стекла с применением камеры технического зрения	163
Золотов А.М., Цеменко В.Н., Котов С.А., Ганин С.В. Определение реологических характеристик механолегированного алюминиевого порошка при повышенных температурах	168

Природопользование

Атоян Г.Л., Корбутов И.И., Осадчий А.И. Организация сбора данных о состоянии экологической обстановки на основе построения беспроводной сенсорной сети	173
Гуменюк В.И., Кулинкович А.В. Хемилюминесцентный экспресс-контроль соединений урана в природных водах	178
Гуменюк В.И., Кулинкович А.В. Анализ существующих механизмов генерации активных форм кислорода в водных растворах уранилов	186

Моделирование. Математические методы

Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Лазерно-дуговая сварка алюминево-магниевого сплава	194
Шабров Н.Н., Куриков Н.Н. Анализ и визуализация результатов научных исследований с помощью технологий виртуальной реальности	200
Калимов А.Г., Шиманский С.А. Применение векторных конечных элементов для повышения точности расчета магнитного поля трансформаторов.....	205
Грязнов Н.А., Кочкарев Д.А., Модягин А.И., Панталеев С.М. Регистрация трехмерного образа сцены в режиме реального времени с использованием структурированной лазерной подсветки	211
Кортиков Н.Н., Миронова М.В. Трехмерное моделирование теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины	215
Гиргидов А.Д. Оценка эффективности винта летательных аппаратов	220
Соколов В. А. Интервальные методы в байесовском подходе при диагностировании технического состояния строительных конструкций зданий	227
Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Моделирование процесса горячей экструзии порошковой быстрорежущей стали	235
Галёркин Ю.Б., Солдатова К.В. Разработка «виртуальных» модельных ступеней с помощью программ 5-го поколения Метода универсального моделирования	241
Смирнова Е.А., Юшин Б.А. Методика проведения экспериментальных исследований индукционного нагрева деталей с покрытиями	248
Белов В.В., Никитин С.Е. Верификация расчетной модели деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций	252
Смирнова Е.А. Методы обработки самофлюсующихся покрытий. Индукционное оплавление	258

Безопасность жизнедеятельности

Туманов А.Ю. Модели и алгоритмы для прогнозирования опасностей объектов техносферы и защиты от угроз в энергетике	263
Терехин С. Н., Балов А.В., Филиппов А.Г. Анализ факторов и закономерностей функционирования систем позиционирования подразделений пожарной охраны МЧС России в закрытых помещениях зданий и сооружений	273

Хроника событий

Кесаманлы Ф.П. Политехники – трижды Герои Социалистического Труда. Академик Анатолий Петрович Александров	277
Демидов А. И. От Вольта до Петрова (к 250-летию В.В. Петрова)	285
Александров С.Е., Демидов А.И. Профессор Андрей Георгиевич Морачевский (к 85-летию со дня рождения)	290
Сведения об авторах, контактные данные	293
Аннотации, ключевые слова	301

Contents

<i>Congratulations J.I. Alferov</i>	9
---	---

On the 300th anniversary of M.V. Lomonosova

Rudskoy A.I., Morachevsky A.G. <i>M.V. Lomonosov and his work in chemistry</i>	11
Okrepilov V.V. <i>The legacy of the great scientist M.V. Lomonosova to preserve and increase</i>	21
Snetkov V.N., Semenova K.A. <i>M.V. Lomonosov on the need to consolidate the rights of Russia in the Arctic: the experience and continuity</i>	31

Power engineering and electrical engineering

Fedorov M.P., Maslikov V.I., Chusov A.N., Molodtsov D.V. <i>The experimental complex for hydrogen production from organic wastes for use in fuel cells</i>	35
Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveev Y.V. <i>Guidelines of the microturbine technology in Russia and abroad</i>	41
Kruchinina I.Yu. <i>The choice of designs and materials induction motor</i>	51
Kravchenko I.V., Kostin V.N. <i>Automation limited reduce the voltage in the power system for metropolis ...</i>	58
Solovyev Y.V., Samarin G.N. <i>Investigation of extreme climatic conditions impacts on defects behavior in polymeric construction elements of overhead line with covered conductors under operating voltages of 6–35 kv</i>	63
Shklyarskiy Y.E., Bunteev Y.E., Radkovskiy A.K., Kuznetsov V.A. <i>Influence of the higher harmonics at measurement of reactive energy in electric circuits</i>	67
Vlasov A.V. <i>Calculation of magnetic field intensity in the midline permanent magnet</i>	70
Shklyarskiy Y.E., Kruglov A.V., Shklyarskiy A.Y., Turysheva A.V. <i>Active and reactive power registration in energy supply systems with distortions</i>	75
Boguslawsky I.Z. <i>Simulation of currents distribution in damper windings of large synchronous machines by means of enclosed regular chain circuit</i>	79
Gonsales I. <i>Electrical network modeling and of its modes of calculation in the presence of harmonic distortion</i>	86
Ustinov D.A., Konovalov J.B., Plotnikov I.G., Turisheva A.V. <i>The probabilistic characteristics of energy oil and gas companies</i>	90
Karpov A.S., Kravchenko I.V., Costin V.N., Popkov E.N. <i>Principles of the automated system control effectiveness of automatic frequency dividing</i>	94
Boguslawsky I.Z., Rogachewsky W.S. <i>Calculation method of the asynchronous operating of large synchronous machines (taking into account the distribution of currents in the damper winding)</i>	100
Kiselev V.G. <i>Basic design principles of cathodic protection of underground metallic structures</i>	111

Mechanical engineering

Yablokova H.A., Trofimov V.V. <i>Residual life repair disk low pressure compressor x-ray diffraction</i>	117
Hrostitsky A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. <i>Research problem geometry features mechanism to redundant links</i>	122

Gorelov A.S., Prejs V.V. <i>Methodological bases of the automated statistical quality assurance of production of mass productions</i>	126
Hrostitsky A.A., Tereshin V.A. <i>Power analysis of paradoxical mechanism with redundant links</i>	133
Kukalenko B.D., Chulkin S.G. <i>Elastic-damping characteristics of the tire-type pneumatic clutch</i>	138
Mazurenko I.A., Semenov A.G., Zwetkov V.V. <i>The Study of the possibility stabilizations of the moving the transport facility with use sensor of the speedups</i>	141

Metallurgy and materials technology

Pupyshev A.M., Popov N.O., Mitrofanov Y.A. <i>Investigation of processes of separation of iron and titanium in titanomagnetite concentrate leaching reduced</i>	149
Ivanov E.K., Skotnikova M.A., Krylov N.A. <i>Structurally-phase transformations into difficultly processable materials as a way of increase of wear resistance of the tool</i>	155
Bulatov V.V., Abakumov I.I., Kulchitsky A.A. <i>The method of detecting glass defects based on machine vision</i>	163
Zolotov A.M., Tsemenko V.N., Kotov S.A., Ganin S.V. <i>Definition of rheological characteristics of mechanically alloyed aluminium powder at high temperatures</i>	168

Nature Management

Atoyan G.L., Korbut I.I., Osadchy A.I. <i>The organization collecting data on the status of environmental conditions on the basis of a wireless sensor network</i>	173
Gumenyuk V.I., Kulinkovich A.V. <i>Chemiluminescent rapid control of uranium compounds in natural waters</i>	178
Gumenyuk V.I., Kulinkovich A.V. <i>Analysis of existing mechanisms of generation of active forms of oxygen in uranium water solutions</i>	186

Modeling. Mathematical Methods

Turichin G.A., Tsubulsky I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V. <i>Laser- arc welding of aluminum-magnesium alloys</i>	194
Shabrov N.N., Kurikov N.N. <i>Analysis and visualization of research results through virtual reality technology</i>	200
Kalimov A.G., Shimansky S.A. <i>Application of the vector finite elements for increasing accuracy of the magnetic field computation in electrical transformers</i>	205
Gryaznov N.A., Kochkarev D.A., Modyagin A.I., Pantaleev S.M. <i>3d image real-time recording by structured light application</i>	211
Kortikov N.N., Mironova M.V. <i>Three-dimensional simulation of thermal state of high-temperature turbine elements cooled by steam</i>	215
Girgidov A.D. <i>Efficiency estimation of airscrew</i>	220
Sokolov V.A. <i>Interval methods in the bayesian approach to the building structures technical condition diagnosis</i>	227
Tsemenko V.N., Hirschov W.L., Mazurov S.A. <i>Modelling of hot extrusion of powder high-speed steel</i>	235
Galerkin Y.B., Soldatova K.V. <i>Working out of «virtual» modelling steps by means of programs of 5th generation of the method of universal modelling</i>	241
Smirnova E.A., Yushin B.A. <i>Experimental research methods for inductive heating of coated parts</i>	248
Belov V.V., Nikitin S.E. <i>Verification corrosion-damaged reinforced concrete constructions model</i>	252
Smirnova E.A. <i>Self-fluxing coatings treatment methods. Inductive vitrification</i>	258

Health and Safety

Tumanov A.Y. <i>Models and algorithms for forecasting hazards objects technosphere and threat protection in energy</i>	263
Terehin S.N., Balov A.V., Filippov A.G. <i>The analysis of factors and principles of functioning of positioning systems of state fire services of emercom of russia indoors of buildings and structures</i>	273

Chronicle of events

Kesamanly F.P. <i>Polytechnic — three times Hero of Socialist Labor. Academician Anatoly Alexandrov</i>	277
Demidov A.I. <i>From Volta to Petrov (the 250th anniversary of Vladimir Petrov)</i>	285
Alexandrov S.E., Demidov A.I. <i>Professor Andrew G. Morachevsky (the 85th birthday)</i>	290
<i>About the authors, contact information</i>	293
<i>Abstracts, key words</i>	309

ПОЗДРАВЛЕНИЕ

Ректорат и попечительский Совет Санкт-Петербургского государственного политехнического национального исследовательского университета горячо поздравляют декана физико-технического факультета, Почетного доктора СПбГПУ Жореса Ивановича Алферова с награждением орденом Почетного легиона Франции.

Орден Почетного легиона от имени Президента Франции был вручен 28 ноября 2011 года Чрезвычайным и Полномочным послом Французской Республики в Российской Федерации господином Жаном де Глиниасти.





К 300-летию со дня рождения М.В. ЛОМОНОСОВА

УДК 001:66

А.И. Рудской, А.Г. Морачевский

М.В. ЛОМОНОСОВ И ЕГО РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ХИМИИ

*Изучение химии имеет двоякую цель:
одна — усовершенствование естественных
наук, другая — умножение жизненных благ.*

М. В. Ломоносов

8 февраля (по новому стилю) 1724 года от имени императора Петра I (1672–1725) был обнародован Указ Правительствующего сената об учреждении Академии наук и художеств. Это решение завершало преобразовательную деятельность первого российского императора, его масштабные реформы [1]. По проекту Петра I Российская академия наук существенно отличалась от родственных ей зарубежных организаций. Она была государственным учреждением, ее члены, получая жалование, должны были обеспечивать научно-технические потребности государства. Академия наук в России в первое время своего существования соединяла функции научного исследования и обучения, имея в своем составе гимназию и университет, в которых преподавали академики. Ученые пользовались свободой творчества, имели широкие возможности для публикации своих трудов. С 1728 года издавался ежегодный сборник трудов «Комментарии Петербургской Академии наук» (на латинском языке).

В первые годы существования Академия делилась на три класса: математический, физический и гуманитарный. Математический класс включал четыре кафедры: одна — теоретической математики, одна — астрономии, две — механики. В физический класс входили четыре кафедры — физики (теоретической и экспериментальной), анатомии, химии и ботаники. Гуманитарный класс состоял из трех кафедр: крас-

норечия и древностей; истории древней и новой; права, политики и этики [2].

Параллельно с Академией создавался Университет, они были взаимосвязаны. Без университета невозможно широкое распространение знаний среди населения. В свою очередь, университеты без Академии не получают должного развития из-за отсутствия в стране достаточно-го числа людей с нужным уровнем образования.

Наряду с академиками в состав действительных членов Академии наук входили адъюнкты (помощники академиков). Поскольку на академиков возлагались преподавательские обязанности в Университете, они именовались профессорами. Центром деятельности ученых Академии были Конференции, на которых, кроме профессоров-академиков, могли присутствовать адъюнкты, приглашенные лица, но право голоса имели только профессора.

В течение 1724 года и большей части 1725-го велись переговоры с иностранными учеными о приглашении их на службу в Петербург. Первые заседания Конференции с чтением докладов начались в августе 1725 года и проводились дважды в неделю.

Первым президентом Академии наук при ее открытии был назначен Л.Л. Блюментрост (1692–1755). Он получил медицинское образование за границей, был лейб-медиком Петра I. Одновременно Блюментрост управлял также царской библиотекой и кунсткамерой, участво-



Михаил Васильевич Ломоносов.

Портрет (масло). Портрет находился
в доме Ломоносова в Усть-Рудицах.
Работа неизвестного художника

вал в составлении проекта об учреждении Санкт-Петербургской Академии наук. По его протекции кафедру химии в 1725 году занял М. Бюргер (1686–1726), никаких данных для этого не имевший. Он в 1716 году закончил Кенигсбергский университет со степенью доктора медицины и занимался врачебной практикой в Прибалтике (в Курляндии) [3]. Ничем себя не проявив в Петербурге, Бюргер в июле 1726 года погиб в результате несчастного случая.

После Бюргера в 1727 году на кафедру химии, опять-таки благодаря связям с президентом, был приглашен 18-летний врач И.Г. Гмелин (1709–1755), только что окончивший университет в Тюбингене (Германия). Однако в этом случае Блюментрост не решился сразу сделать его академиком, Гмелин получил лишь звание адъюнкта, но уже в январе 1731 года он был объявлен «профессором химии и натуральной истории», иными словами, стал академиком.

Из доложенных Гмелиным на заседаниях Конференции Академии наук работ химической направленности можно выделить лишь две. Первая из них касается увеличения веса некоторых тел при их обжиге, а вторая содержит результаты изучения природы щелочей, извлекаемых из золы растений. Как отмечается в работе С.А. Погодина [3], оба сообщения Гмелина не содержали существенно новых научных результатов. С 1733-

го по 1743 год. Гмелин находился в экспедиции в восточных районах России; по возвращении в Петербург, занявшись обработкой ботанических материалов, он по собственной просьбе был освобожден от обязанностей профессора химии. В 1747 году Гмелин вернулся на родину, в Тюбинген. В 1751–1752 годах он опубликовал результаты своего путешествия по Сибири.

В 1745 году в звании профессора химии (то есть академика) был утвержден Михаил Васильевич Ломоносов. Он был первым из российских ученых, занимающихся естественными науками, который стал академиком Петербургской Академии наук. Очень кратко напомним основные события в его биографии. При этом следует иметь в виду, что о раннем периоде жизни будущего ученого, несмотря на большое число публикаций, имеются крайне скудные и в чем-то противоречивые сведения.

М.В. Ломоносов родился 8 (19) ноября 1711 года в Архангельской губернии, на берегу Белого моря, в семье зажиточного крестьянина-помора. Неблагоприятные домашние условия, о которых сам Ломоносов пишет так: «Имеючи отца хотя по натуре доброго человека, однако в крайнем невежестве воспитанного, и злую и завистливую мачеху, которая всячески старалась произвести гнев в отце моем, представляя, что я всегда сижу по-пустому за книгами. Для того многократно я принужден был читать и учиться, чему возможно было, в уединенных и пустых местах и терпеть стужу и голод» [4–6]. Юноша помогал отцу на рыбных промыслах, но все свободное время проводил за книгами, использовал все возможности для самообразования. В 1730 году Ломоносову удалось добраться до Москвы и, выдав себя за дворянского сына, поступить в Славяно-греко-латинскую академию, основанную в 1684 году при Заиконоспасском монастыре. Зачисление состоялось 15 января 1731 года. Целью Академии была подготовка ученых-богословов, но при этом изучалось довольно большое число различных предметов: латинский и славянский языки, география, история, арифметика, стихотворство, сочинительство, риторика. В старших классах основными предметами были богословие и философия. Хотя Академия называлась «Славяно-греко-латинской», согласно указу Петра I с 1701 года греческий язык в ней не изучался [7]. Годы обучения для Ломоносова осложнялись бедственным материальным



положением: «...имея один алтын в день жалования, нельзя было иметь на пропитание в день больше как на денежку хлеба и на денежку кваса, прочее на бумагу, на обувь и другие нужды. Таким образом жил я пять лет и наук не оставил» [5, 6] (алтын — три копейки, денежка — полкопейки). Срок обучения в Академии зависел от успеваемости учеников. Всего в Академии было девять классов, включая подготовительную славяно-русскую школу. Благодаря блестящим способностям Ломоносов первые три класса прошел за один год, уделив особое внимание латинскому языку. Несмотря на разнообразие изучаемых предметов, он не мог быть удовлетворен программой обучения — Ломоносова больше всего интересовали точные науки, а не богословие и философия. Тем не менее значение Славяно-греко-латинской академии для истории России очень велико — она была первым высшим учебным заведением, которое подготовило почву для дальнейшего развития в стране высшего гуманитарного образования [7, 8].

В декабре 1735 года Ломоносов в числе двенадцати лучших учеников Славяно-греко-латинской академии был направлен в Петербург, где все они сразу же были зачислены студентами Университета при Академии наук и приступили к занятиям. Инициатором этой акции был барон, действительный тайный советник, президент («Главный командир») Академии наук (1734–1740) И.А. Корф (1697–1766). Перед Ломоносовым открылись перспективы изучения точных наук. Однако уже в сентябре 1736 года по согласованию с профессором Марбургского университета (основан в 1527 году) и почетным членом Петербургской Академии наук Х. Вольфом (1679–1754) троих из двенадцати воспитанников Славяно-греко-латинской академии, включая Ломоносова, свободно владеющих латинским языком, И.А. Корф направил для обучения в Германию, в Марбург. Студенты должны были ознакомиться с теоретическими предметами, лежащими в основе металлургии и горного дела, — с математикой, механикой, физикой, химией, а также изучить иностранные языки — немецкий, французский. О пребывании Ломоносова за границей имеются подробные сведения [4].

Кратко они изложена недавно в работе [9]. В июле 1739 года студенты переехали из Марбурга во Фрейберг, один из крупных центров горнорудной промышленности Германии. Их учи-

телем стал И.Ф. Генкель (1678–1744), врач по образованию, но наряду с врачебной деятельностью изучивший горное дело, металлургию, химию, маркшейдерское и пробирное искусство. В 1732 году он был назначен горным советником, в 1733-м построил собственную химическую лабораторию, в которой преподавал до конца жизни [8]. В июне 1841-го Ломоносов вернулся в Петербург, и с этого времени вся его последующая жизнь неразрывно связана с Императорской Академией наук. Ученый-энциклопедист, он обогатил российскую науку фундаментальными исследованиями в химии, физике, астрономии, геологии, географии; внес большой вклад в разработку истории, языкознания и поэзии; организовал первую в России химическую лабораторию; активно участвовал в основании Московского университета, носящего его имя [1].

При всем многообразии интересов ученого его личные симпатии все же склонялись к химии и физике, между которыми он не проводил какой-либо границы [10–13]. Еще будучи в Германии, Ломоносов начал работать над сочинением «Элементы математической химии», которое он закончил в 1841 году уже в Петербурге [10]. В нем, в частности, дается такое определение химии: «Химия есть наука изменений, происходящих в сложном теле, поскольку оно сложное». В том же сочинении говорилось: «Химик без знания физики подобен человеку, который все должен искать ошупом. И сии две науки так соединены между собой, что одна без другой в совершенстве быть не могут». Там же Ломоносов пишет: «Истинный химик должен быть теоретиком и практиком... Химик должен доказывать все, что приводится в химии». В работе «Элементы математической химии» Ломоносов стремится ввести в химию четкие и строго сформулированные понятия, как это делается в математике [14].

Первостепенное значение Ломоносов придавал опыту, видя только в нем надежное средство познания природы. Ломоносову принадлежит высказывание: «Один опыт я ставлю выше, чем тысячу мнений, рожденных только воображением». Девизом ученого было: «По возможности пытаться исследовать все, что может быть измерено, взвешено и определено при помощи практической математики» [15]. В высказываниях Ломоносова постоянно прослеживается необходимость тесной связи химии с физикой и математикой: «Мы не сомневаемся, что можно легче

распознать скрытную природу тел, если мы соединим физические истины с химическими», «Математику почитаю за высшую степень человеческого познания, но только рассуждаю, что ее в своем месте после собранных наблюдений употреблять должно».

Вскоре после возвращения в Петербург в начале января 1742 года Ломоносов назначается адъюнктом Академии наук по физическому классу, куда входила и химия. Приступив к работе в Академии наук, Ломоносов сразу же начинает добиваться создания химической лаборатории при Академии наук. Трижды в 1742–1745 годах он обращался с просьбой об этом, но безрезультатно. Однако, даже при отсутствии надлежащих условий для работы, Ломоносов в 1744 году представляет свое первое экспериментальное исследование в области химии — изучение процессов растворения. В работе «О действии химических растворителей вообще» он пишет: «Среди важнейших химических операций выделяется растворение, которое прежде всего заслуживает физического исследования: в самом деле оно очень часто применяется в химических лабораториях...однако причины его пока еще не настолько выяснены, чтобы можно было из них объяснить явления, происходящие при этой операции» [16]. Ломоносов изучал растворение металлов в кислотах и, в частности, впервые описал явление пассивности железа в концентрированной азотной кислоте, изучал растворение солей в воде. На основании выполненных опытов ученый приходит к выводу, что растворение металлов в кислотах сопровождается выделением тепла, а при растворении солей в воде тепло поглощается. Ломоносов объяснял процессы растворения движением частиц жидкости, приводящим в движение частицы твердого тела. В этом он видел то общее, что делает внешне сходными процессы растворения металлов и солей. Не вдаваясь в детали, отметим, что Ломоносов дал принципиально правильное объяснение тепловых эффектов при растворении металлов и солей, согласующееся с законом сохранения энергии.

В первой работе Ломоносова о растворах просматривается чисто физический подход к процессу растворения. В последующие годы (1752–1754) он говорит уже о единстве химических и физических явлений при растворении, о способности растворителя отрывать частицы растворенного вещества и присоединять их к себе [17].

В 1745 году Ломоносов подает прошение императрице Елизавете (1709–1762) о своем назначении профессором химии на освободившуюся после Гмелина кафедру химии, перечисляет свои труды в области химии. Прошение было рассмотрено Академическим собранием, постановившим, чтобы Ломоносов написал диссертацию (сочинение) по металлургии. Очень скоро диссертация была представлена, одобрена, и Академия наук направила в Сенат соответствующий отзыв. Указ о производстве Ломоносова в профессора (академики) был объявлен 25 июля 1745 года. 12 августа он впервые участвовал в заседании Академической конференции в качестве полноправного ее члена. Царствование Елизаветы Петровны считается временем расцвета русской культуры и науки.

Вскоре после назначения профессором по кафедре химии Ломоносов вновь (в четвертый раз) поднимает вопрос о необходимости строительства химической лаборатории, прилагает к прошению в Сенат, которое поддержали многие академики, соответствующие чертежи. В 1746 году последовало распоряжение императрицы, предписывающее «построить по приложенному при сем чертежу на Васильевском острове при Академии наук за счет кабинета Ее Величества химическую лабораторию» [18]. Однако дело продвигалось медленно, только в 1747 году был выбран участок для строительства, закладка здания состоялась 3 августа 1748 года. Закончилось строительство 12 октября того же года, но понадобилось еще несколько месяцев для оснащения лаборатории необходимым оборудованием и закупки реактивов. Стоимость здания и оборудования составила 1344 рубля.

Лаборатория внешне представляла собой небольшое каменное одноэтажное строение (14×10,5 м, высота 5 м) и располагалась совсем близко от дома, где жил Ломоносов, на территории ботанического сада Академии наук, между 1-й и 2-й линиями Васильевского острова, за Средним проспектом (считая от Невы). Ломоносов считал, что «профессор химии должен жить поблизости от того места, где будут производиться химические опыты» [18]. Это была первая в России лаборатория, служившая как для целей преподавания химии, так и для проведения научных исследований. Она отличалась от имевшихся на некоторых предприятиях узко профилированных лабораторий своим устройством,

оборудованием, приборами, по существу являясь первым научно-исследовательским заведением в России. По словам Ломоносова, лаборатория была «преимущественно приспособлена к открытию физических истин путем химическим» [18]. Химическая лаборатория просуществовала на этом месте до 1783 года.

После упомянутого выше исследования растворения солей и металлов все последующие работы химической направленности выполнялись уже в новой лаборатории (1749–1757). Необходимо при этом иметь в виду, что почти все эксперименты проводились лично Ломоносовым и параллельно с его работами в других областях науки. В распоряжении ученого был только один «лаборатор» (лаборант). Сохранились записи о поставленных им опытах [18]. С начала 1749 года экспериментальные исследования в лаборатории проводились исключительно в области технической химии: изучались методы изготовления некоторых красок (в частности, берлинской лазури), импортировавшихся в те годы Россией, разрабатывались способы изготовления цветных стекол, была предложена новая рецептура фарфоровой массы, нашедшая промышленное применение. Вероятно, такой выбор направления исследований имел основание. В январе 1750 года Ломоносов писал президенту Академии наук К.Г. Разумовскому (1728–1803): «По регламенту Академии наук профессорам должно не меньше стараться о действительной пользе обществу, а особливо о приращении художеств, нежели о теоретических рассуждениях, а сие больше всего касается до тех, которые соединены с практикой, каково есть химическое искусство» [19].

Граф К.Г. Разумовский был назначен императрицей Елизаветой президентом Академии наук в 1746 году в восемнадцатилетнем возрасте и занимал эту должность до 1798 года. Одновременно с 1750 по 1764 год был гетманом Малороссии, с 1764-го — генерал-фельдмаршал. В 1751 году Разумовский способствовал изданию собрания сочинений Ломоносова — честь, которой до этого не удостоивался ни один академик [8]. К.Г. Разумовский был младшим братом крупного государственного деятеля графа А.Г. Разумовского, фаворита Елизаветы Петровны.

Особенно широко известны работы Ломоносова по приготовлению цветных стекол и мозаичных картин, по выяснению закономерностей,



Бюст М.В. Ломоносова.

Скульптор Ф. И. Шубин.

Бисквит. Копия. 1792.

Музей М.В. Ломоносова.
Санкт-Петербург

связывающих окраску стекла с его составом. Как отмечал С.И. Вавилов [20], задача эта вполне подходила характеру и вкусам Ломоносова: в ней переплелось изобразительное искусство с химией цветного стекла, оптикой и техникой. Ломоносов был первым в истории науки и техники, кто начал сознательно опираться на химию и пользоваться ею для развития стекольного дела, в частности для изучения свойств стекол и получения новых стекол [21]. В конце августа 1752 года Ломоносов закончил первую свою мозаичную картину «Образ божьей матери», для изготовления которой пришлось сделать 2184 плавки цветных стекол, «коих не токмо рецепты сочинял, но и материалы своими руками по большей части развешивал и в печь ставил». Ломоносов преследовал две главных цели: выяснить влияние состава стекла, входящих в него отдельных компонентов, на его свойства и научиться изготавливать стекла с заранее заданными свойствами. Одной из сложных задач, которую успешно решил ученый, было изготовление рубиновых стекол, окрашенных золотом. В химической лаборатории Ломоносов также разработал способы компоновки стеклянных кусочков цветного стекла в прочную мозаичную картину, обладающую художественными достоинствами. Благодаря своим успешным опытам с мозаикой, Ломоносов после долгих хлопот получил в 1753 году от императрицы Елизаветы в дар поместье в 64 верстах от Петербурга, в Усть-Рудицах Копорского уезда, для устройства стекольной фаб-

рики с целью выделки разноцветных стекол, бисера, стекляруса и прочих изделий. Подробные сведения об Усть-Рудицкой фабрике содержатся в работе [22]. Из двенадцати известных мозаичных картин, включая знаменитую «Полтавскую баталию», выполненных в химической лаборатории или на фабрике, пять приписываются лично Ломоносову.

Мозаичная картина «Полтавская баталия», изготовленная в 1761–1764 годах, во всех деталях описана Б.Н. Меншуткиным [4]. Мозаичное производство и работа фабрики в Усть-Рудице прекратились в 1767 году, спустя два года после кончины ученого.

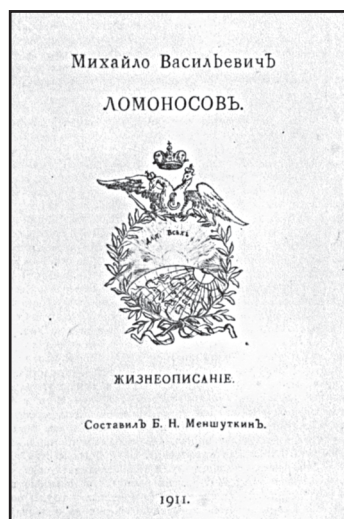
Начиная с 1753 года, наряду с продолжением исследований цветных стекол, снова фигурируют темы физико-химического характера. В 1754-м Ломоносовым была сформулирована очень обширная программа всестороннего изучения физико-химических свойств растворов [17], которая, однако, была выполнена лишь частично. Ломоносов впервые изучил влияние температуры (от 0 до 100 °С) на растворимость многих солей в воде, впервые показал, что с ростом концентрации растворенного вещества температура замерзания раствора понижается, составил соответствующие таблицы. По-видимому, эти исследования проводились в 1753–1755 годах. В отчете за 1755 год указано: «В химии: деланы различные физико-химические опыты, что яв-

ствует в журнале того же года на 14 листах». Лабораторные журналы за 1754–1756 годы не сохранились [19]. Отчет за 1756 год оказался последним, в котором фигурирует экспериментальная работа по химии: «В химии... деланы опыты в заплавленных накрепко стеклянных сосудах, чтобы исследовать прибывает ли вес металлов от чистого жару, оными опытами нашлось, что... без пропущения внешнего воздуха вес сожженного металла остается водной мере». Эти опыты очень подробно анализируются Ю.И. Соловьевым в [12]. После 1756 года продолжались только работы по дальнейшему расширению рецептур цветных стекол и технологии производства разнообразных стеклянных изделий.

Таким образом, экспериментальные исследования Ломоносова в области химии и химической технологии сводятся к работам: по растворению металлов в кислотах и солей в воде, по влиянию температуры на растворимость солей, определению некоторых физико-химических характеристик различных веществ, изучению поведения металлов при прокаливании. Отдельную группу составляют работы в области рецептур окрашенных стекол и другие работы, связанные с производством стекол, красителями. Кроме того, Ломоносовым выполнялись разнообразные работы химико-аналитического характера (анализы солей, руд, минералов). Ломоносов был опытным химиком-эксперимента-



Титульный лист книги
Б.Н. Меншуткина
«М.В. Ломоносов
как физико-химик» (1904)



Титульный лист книги
Б.Н. Меншуткина
(1911)



тором, но утрата лабораторных журналов за ряд лет не позволяет в полном объеме судить о всей выполненной работе в период с 1753 по 1756 год.

Помимо упоминавшихся уже сочинений «Элементы математической химии» (1741) и «О действии химических растворителей вообще» (1744), Ломоносову принадлежат следующие труды химической направленности: «Размышления о причинах теплоты и холода» (1744), «О металлическом блеске» (1748), «Диссертация о рождении и природе селитры» (1749), «Слово о пользе химии» (1751), «Введение в истинную физическую химию» (1752).

Очень кратко остановимся на важнейших выводах из этих работ. В диссертации о причинах теплоты и холода Ломоносов делает новое для того времени заключение: «...что нельзя приписывать теплоту тел сгущению какой-то тонкой, специально для того предназначенной материи, но что теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи нагретого тела». Не зная лучистой теплопередачи, Ломоносов считал, что тепло от солнца распространяется путем вращения частиц мирового эфира. В этой работе излагаются основы молекулярно-кинетической теории теплоты, а также доказывается теорема о невозможности передачи теплоты от менее нагретого к более нагретому телу, указывается на существование «температуры абсолютного холода». Ломоносов с полной определенностью устанавливает связь между теплотой и механической работой, ему не доставало только опытного установления механического эквивалента тепла.

Отказавшись от широко распространенных представлений о «теплороде», Ломоносов, однако, использовал в своих работах понятие о «флогистоне», что видно из диссертации «О металлическом блеске» («О светлости металлов»). В «Рассуждении о селитре» ученый дает вполне точные определения химических синтеза и анализа: «Составное (т. е. сложное) тело состоит из составных частей, на которые разлагается анализом. Эта истина вполне очевидна из понятия о целом и частях. Напомним, что в химии синтез иногда вернее анализа: его одного достаточно для определения составных частей тела, так как в телах, составные части которых — сами составные тела, различные способы разделения дают различные результаты; в связи же с синтезом анализ как дает ему достоверность, так и сам приобретает ее».

«Слово о пользе химии» представляет собой речь Ломоносова на торжественном собрании Академии наук 6 сентября 1751 года по случаю именин императрицы Елизаветы. Ученый отмечает важную роль химии в изучении строения материи, а также показывает, как химия «широко простирает руки в дела человеческие» — в изучение медицины и природы огня, в развитие металлургии, в создание одежды, красок, стекла, оружия.

«Введение в истинную физическую химию» является началом учебника, который Ломоносов, по-видимому, намеревался написать в связи с преподаванием в Академическом университете в 1752–1753 годах курса химии, названного им «Истинная физическая химия» [23]. Лекции читались с одновременной демонстрацией опытов. Формально это было первое в мировой практике преподавание физической химии, фактически речь шла просто о курсе химии. Ломоносов читал также лекции по экспериментальной химии, сопровождая их практическими занятиями в Химической лаборатории.

Работе над текстом «Введения в физическую химию» предшествовало составление плана курса, который должен был включать три больших части: I. Введение, II. Физическая химия, часть опытная; III. Физическая химия, часть теоретическая. Ломоносов дает следующее определение физической химии: «Физическая химия есть наука, объясняющая на основании положений и опытов физики то, что происходит в смешанных телах при помощи химических операций». Он отличает физическую химию от технической, в которую входит «все, относящееся к наукам экономическим, фармации, металлургии, стеклянному делу и т. д.». В годы Ломоносова химия была искусством, он хотел превратить ее в науку. Если же химия — наука, то, по мнению Ломоносова, она должна иметь свою теорию, позволяющую вскрыть причины химических явлений и объяснить зависимость физико-химических свойств соединений от их состава и строения [12]. На первом этапе своей научной деятельности (1741–1747) Ломоносов стремился превратить химию в науку, опираясь на союз химии с математикой и механикой. На втором этапе (1747–1756) ученый все внимание уделяет союзу химии с физикой. Еще в 1904 году Б.Н. Меншуткин [24] писал, что Ломоносов «... ставил себе целью построить на математических началах, на законах

механики, управляющих взаимными отношениями частиц, составляющих тела, он стремился объяснить при помощи физических истин истинны химические, одним словом, сделать химию наукой точной, сделать ее истинной физической химией». Сам термин «физическая химия» возник давно, еще в XVII веке, и получил довольно широкое распространение в первой половине XVIII века, когда под этим названием был опубликован ряд руководств [25].

Представляется неправомерным отождествлять физическую химию в толковании Ломоносова и физическую химию, которая оформилась в самостоятельную пограничную научную дисциплину в 1870–1880 годах главным образом трудами В. Оствальда (1853–1932), Я. Вант-Гоффа (1852–1911), С. Аррениуса (1859–1927), других ученых того времени. Ломоносов под термином «физическая химия» понимал не пограничную науку, а всю химию, исключая лишь техническую химию. Весьма обстоятельно это рассмотрено Ю.И. Соловьевым [12, 25]. Большое, хотя и дискуссионное по ряду положений, исследование о предмете и границах физической химии выполнил Я.И. Герасимов [26], многие годы заведовавший кафедрой физической химии в МГУ.



Надгробный памятник М.В. Ломоносову на Лазаревском кладбище Александро-Невской лавры (Санкт-Петербург)

С 1757 года Ломоносов вынужден все большее внимание уделять административной работе — он назначается советником Академической канцелярии. В марте 1758 года президент Академии наук поручил Ломоносову «особое смотрение» за академическими Историческим и Географическим собраниями, а также за университетом и гимназией. С этого времени в ущерб научной деятельности Ломоносов начал оказывать большое влияние на все академические дела, старался привести Академию «в доброе состояние», предложил ряд конкретных практических мер. Гимназией и университетом Ломоносов руководил до конца жизни.

В 1762 и в начале 1763 года Ломоносов тяжело болел, хотя и написал работы, направленные на улучшение деятельности Академии наук. В середине марта 1765-го он простудился и скончался 5 апреля того же года. Ломоносов был торжественно похоронен на Лазаревском кладбище Александро-Невской лавры в Петербурге. Долголетним покровителем Ломоносова графом М.Л. Воронцовым (1707–1783), крупным государственным деятелем, на могиле ученого был установлен памятник из белого мрамора. Другой почитатель и покровитель Ломоносова, граф И.И. Шувалов (1727–1797), сочинил на французском языке оду, где воздал должное заслугам ученого.

Научные труды М.В. Ломоносова были отмечены избранием его иностранным членом Шведской Академии наук в 1760 году и почетным членом Болонской Академии наук (Италия) в 1764-м. В 1763 году за успехи, достигнутые в области мозаичного искусства, Ломоносов был избран почетным членом Академии художеств («Академия трех знатнейших художеств»), созданной в 1757 году графом И.И. Шуваловым при Московском университете.

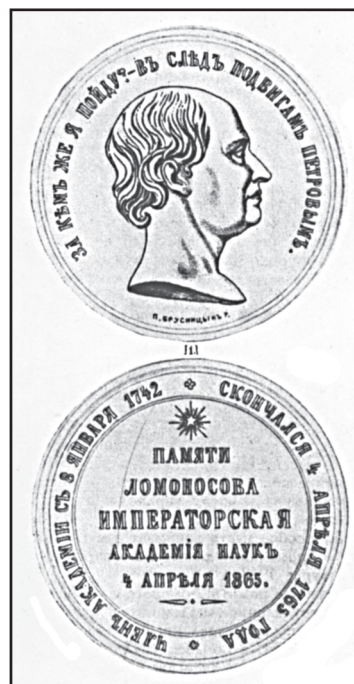
Императорскими указами Ломоносову в 1751 году присвоен чин коллежского советника (чин VI класса в Табеле о рангах России), а в 1763-м — чин статского советника (чин V класса).

Литература, посвященная жизни и разнообразной деятельности Ломоносова, огромна, даже если ограничиться работами естественно-научной направленности. В конце XVIII-го и в XIX веке основное внимание уделялось литературным трудам Ломоносова — о них говорится, в частности, в произведениях А.Н. Радищева (1749–1802), А.С. Пушкина (1799–1837). В XIX веке Ломоносов был известен прежде всего «как первый поэт России».

Ряд исследований о Ломоносове был опубликован в 1865—1868 годах в связи со столетней годовщиной со дня смерти ученого. Однако все они практически не касались работ Ломоносова в области химии. В 1865 году была выпущена памятная медаль и объявлен конкурс на «ученое жизнеописание Ломоносова». В 1901-м при активном участии известного химика профессора Московского университета В.В. Марковникова (1837—1904) вышел в свет «Ломоносовский сборник» [27], посвященный 150-летию созданной Ломоносовым первой российской Химической лаборатории. Сборник существенно способствовал развитию истории отечественной химии, но он не давал представления о том, что сделал Ломоносов в области химии и физики. Без сомнения, самый большой вклад в изучение научного наследия Ломоносова в области естественных наук принадлежит профессору Петербургского политехнического института Б.Н. Меншуткину (1874—1938), сыну первого декана Металлургического отделения Н.А. Меншуткина (1842—1907) [28—30]. В конце 1902 года молодой химик начал изучать подлинные рукописи Ломоносова, хранящиеся в рукописном отделе Библиотеки Академии наук в Петербурге, а также в Архиве Академии наук: «Я быстро научился разбирать прекрасный почерк Ломоносова и его черновики». В начале 1904 года Б.Н. Меншуткин закончил кропотливую работу по переводу с латинского языка на русский статей, диссертаций, лабораторных записей, других материалов Ломоносова, впервые выявил в Архиве Академии наук рисунки различных физико-химических приборов и самой Химической лаборатории, построенной по проекту ученого. Все это вошло в рукопись «М.В. Ломоносов как физико-химик». Один экземпляр рукописи Б.Н. Меншуткин передал в «Журнал Русского физико-химического общества», а другой — в журнал «Известия С.-Петербургского политехнического института». Оба журнала в 1904 году в ряде номеров опубликовали эту работу [31, 32]. В том же 1904 году вышло сто отдельных оттисков работы. Широкий круг специалистов впервые мог ознакомиться на русском языке с трудами своего великого соотечественника.

Известный химик и историк химии академик П.И. Вальден (1863—1957) писал: «Заслуга открытия М.В. Ломоносова принадлежит Б.Н. Меншуткину» [33].

В 1909 году при Академии наук была создана Комиссия в связи с приближающимся 200-летием со дня рождения М.В. Ломоносова. Наряду с группой академиков (из числа химиков — Н.Н. Бекетов и В.И. Вернадский) в состав Комиссии был введен Б.Н. Меншуткин. 18 октября он представил Комиссии написанную им биографию М.В. Ломоносова, которая вышла в свет в 1911 году. За эту работу автор получил Ломоносовскую премию, поскольку объявленный в 1865 году конкурс был продлен из-за недостатка претендентов. В 1911 году был издан «Ломоносовский сборник» [34], куда вошли две статьи Б.Н. Меншуткина, работы В.В. Курилова «Ломоносов как физико-химик», П.И. Вальдена «О трудах М.В. Ломоносова по вопросу о растворах», другие работы. Кроме того, в 1911-м Академия наук опубликовала избранные естественно-научные труды Ломоносова со вступительной статьей Б.Н. Меншуткина «Труды Ломоносова по физике и химии». В 1923 году в серии «Классики естествознания» опубликована брошюра «М.В. Ломоносов. Физико-химические работы» под редакцией и с предисловием Б.Н. Меншуткина. В 1936 году Б.Н. Меншуткин заканчивает работу над фундаментальной монографией, по-



Медаль памяти
М.В. Ломоносова

священной трудам М.В. Ломоносова [10]. Издания работ Б.Н. Меншуткина, посвященных Ломоносову, за рубежом подробно рассмотрены в книге [28].

Начиная с 1935 года большой интерес к трудам Ломоносова, прежде всего в области физики, проявлял академик С.И. Вавилов (1891–1951), президент АН СССР (1945–1951).

К большому сожалению, структура Академии наук того времени не позволила Ломоносову иметь учеников и последователей. Единственным его помощником и учеником был лаборант В.И. Клементьев (1731–1759), который очень рано скончался. После Ломоносова Химическая лаборатория Академии наук изменила направление исследований. Вместо физико-химической тематики в лаборатории начинает преобладать химико-аналитическое изучение минералов, руд, нерудных ископаемых России.

М.В. Ломоносов был одним из самых выдающихся ученых-энциклопедистов в истории мировой науки, хотя вся его научная и литературная деятельность по времени продолжалась не более

двадцати четырех лет (1741–1765). Как отмечал С.И. Вавилов [20], Ломоносову по необъятности его интересов принадлежит одно из самых видных мест в культурной истории человечества. Даже Леонардо да Винчи, Лейбниц, Франклин и Гете «более специальные и сосредоточены». По общему выражению П.И. Вальдена, «если в древней Греции семь городов спорили между собою, кому принадлежит слава слыть родным городом Гомера, то ныне в России более семи наук спорят между собой о праве и чести считать Ломоносова своим основателем или первым представителем» [33]. На первом месте у М.В. Ломоносова стояли физика и химия, связанные им воедино в физическую химию. Прошло триста лет со дня рождения великого русского ученого-романтика. Современная химия настолько пронизана физическими принципами и физическими методами исследования, что можно считать сбывшимся предвидение М.В. Ломоносова — вся химия стала физической. Сейчас успешны «физически ориентированные химики» и «химически ориентированные физики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осипов, Ю.В.** Академия наук в истории Российского государства [Текст] / Ю.В. Осипов.— М.: Наука, 1999.— 208 с.
2. **Комков, Г.Д.** Академия наук СССР. Краткий исторический очерк в двух томах: Т. I. 1724–1917 [Текст] / Г.Д. Комков, Б.В. Левшин, Л.К. Семенов.— М.: Наука, 1977.— 383 с.
3. **Погодин, С.А.** // Труды Ин-та истории естествозн. и техники. 1962.— Т. 39. История химических наук.— С. 3–23.
4. **Меншуткин, Б.Н.** Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова [Текст] / Б.Н. Меншуткин.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937.— 238 с.
5. **Капустинский, А.Ф.** Очерки по истории неорганической и физической химии в России. От Ломоносова до Великой Октябрьской социалистической революции [Текст] / А.Ф. Капустинский.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949.— 166 с.
6. **Усанович, М.И.** Из истории химии. Очерки о жизни и деятельности выдающихся ученых [Текст] / М.И. Усанович.— Алматы: Казахский университет, 2004.— 328 с.
7. **Клименко, А.А.** // Памятники науки и техники. 1985.— М.: Наука, 1986.— С. 187–206.
8. **Ломоносов.** Краткий энциклопедический словарь [Текст] / Ред.-составитель Э.П. Карпеев. СПб.: Наука, 1999.— 258 с.
9. **Демидов, А.И.** // Научно-технич. ведомости СПбГТУ.— 2011. № 1 (117).— С. 323–327.
10. **Меншуткин, Б.Н.** Труды М.В. Ломоносова по физике и химии [Текст] / Б.Н. Меншуткин.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1936.— 537 с.
11. **Фигуровский, Н.А.** История химии [Текст] / Н.А. Фигуровский.— М.: Просвещение, 1979.— 311 с.
12. **Соловьев, Ю.И.** История химии в России: Научные центры и основные направления исследований [Текст] / Ю.И. Соловьев.— М.: Наука, 1985.— 416 с.
13. **Павлова, Г.Е.** Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765) [Текст] / Г.Е. Павлова, А.С. Федоров.— М.: Наука, 1986.— 465 с.
14. **Фигуровский, Н.А.** // Вопросы истории естествозн. и техники. 1962. Вып. 12.— С. 22–27.
15. **Михайло Ломоносов.** Жизнеописание. Избранные труды. Воспоминания современников. Суждения потомков. Стихи и проза о нем [Текст].— М.: Современник, 1989.— 493 с.
16. **Ломоносов, М.В.** Избранные труды по химии и физике [Текст] / М.В. Ломоносов.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— 560 с.
17. **Соловьев, Ю.И.** История учения о растворах [Текст] / Ю.И. Соловьев. М.: Изд-во АН СССР, 1959.— 582 с.



18. **Раскин, Н.М.** Химическая лаборатория М.В. Ломоносова [Текст] / Н.М. Раскин — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962.— 340 с.
19. **Фигуровский, Н.А.** // Ломоносов: Сб. статей и материалов.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961.— С. 68–88.
20. **Вавилов, С.И.** Ломоносов и русская наука [Текст] / С.И. Вавилов.— М.: Воениздат, 1947.— 46 с.
21. **Безбородов, М.А.** Очерки по истории и технологии силикатов в России [Текст] / М.А. Безбородов.— Минск: Изд-во АН БССР, 1950.— 199 с.
22. **Сидоров, Н.И.** // Изв. АН СССР. Отд. обществ. наук.— 1937. № 1.— С. 149–174.
23. **Кулябко, Е.С.** М.В. Ломоносов и учебная деятельность Петербургской Академии наук [Текст] / Е.С. Кулябко.— М.: Изд-во АН СССР, 1962.— 216 с.
24. **Меншуткин, Б.Н.** М.В. Ломоносов как физико-химик. К истории химии в России // Отдельный оттиск из «Известий С.-Петербургского политехнического института» за 1904 г. [Текст] / Б.Н. Меншуткин.— Том I. СПб.: 1904.— 300 с.
25. **Соловьев, Ю.И.** // Ж. физич. химии. 1980. Т. 54, № 4.— С. 1077–1083.
26. **Герасимов, Я.И.** // Вестник МГУ. Серия математ., механики, астроном., физики, химии.— 1956. № 2.— С. 133–142.
27. Ломоносовский сборник. Материалы для истории развития химии в России [Текст]. М.: Типогр. А.И. Мамонтова, 1901. Нет сплошной нумерации страниц.
28. **Смолеговский, А.М.** Борис Николаевич Меншуткин. Химик и историк науки [Текст] / А.М. Смолеговский, Ю.И. Соловьев.— М.: Наука, 1983.— 232 с.
29. **Морачевский, А.Г.** Очерки об ученых-химиках Санкт-Петербургского политехнического института [Текст] / А.Г. Морачевский.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.— 140 с.
30. **Морачевский, А.Г.** Очерки об ученых-химиках. Вторая половина XIX века и XX век [Текст] / А.Г. Морачевский.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 108 с.
31. **Меншуткин, Б.Н.** // ЖРФХО. Часть химич. 1904. Т. 36, отд. 2. Вып. 6. С. 77–III.— Вып. 7. С. 113–158.— Вып. 8. С. 159–219.— Вып. 9. С. 221–318.
32. Меншуткин Б.Н. // Изв. СПб. Политехн. ин-та. 1904. Т. I. С. 135–181, 369–424. Т. 2. С. 3–78, 217–338. 1905. Т. 4. С. 119–150.
33. **Вальден, П.И.** Очерк истории химии в России [Текст] / П.И. Вальден // В кн.: Ладенберг А. Лекции по истории развития химии от Лавуазье до конца нашего времени.— Одесса, 1917.— 585 с.

УДК 001:66

В.В. Окрепилов

НАСЛЕДИЕ ВЕЛИКОГО УЧЕНОГО М.В. ЛОМОНОСОВА СОХРАНИЛИ И ПРЕУМНОЖИЛИ

Недавно в России отметили знаменательную дату — 300-летие со дня рождения Михаила Васильевича Ломоносова. Его жизнь, научные и творческие достижения — уникальный пример стремления к новым знаниям и научным открытиям, таланта, упорства и трудолюбия, позволивших Ломоносову стать одним из самых знаменитых ученых в истории человечества.

Действительно, Ломоносов — человек уникальной судьбы и дарований. Выходец из простого народа, из Архангельской губернии, он «по своей и Божьей воле» стал студентом Университета при Академии наук и художеств в Петербурге, успешно завершил обучение в Германии, получил ученые звания адъюнкта, а затем и профессора, стал автором множества трудов и от-

крытий в различных областях знания — химии, физике, астрономии, географии и многих других. Ломоносов снискал себе и славу одаренного стихотворца, автора мозаичных картин, создателя производства цветного стекла для изготовления мозаик, одного из создателей отечественного фарфора. Ломоносов последовательно воплощал свои идеи о реформировании системы образования в стране.

Главным праздничным событием для научной общественности Петербурга стало торжественное заседание, посвященное юбилею великого ученого, которое прошло 17 ноября 2011 года в Санкт-Петербургском научном центре РАН. Президиум заседания возглавил Председатель СПбНЦ РАН академик Жорес Алферов. Утром

19 ноября при участии губернатора Санкт-Петербурга Георгия Полтавченко представители органов власти, науки и образования возложили цветы на могилу Ломоносова на Лазаревском кладбище Александро-Невской лавры, был отслужен молебен. А в полдень в честь Ломоносова был дан полуденный выстрел из пушки Петропавловской крепости.

В 2004 году Президиум Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук принял решение о создании Ломоносовской комиссии для подготовки к празднованию 300-летнего юбилея великого ученого. Решением Правительства Санкт-Петербурга был образован организационный комитет по подготовке и проведению празднования 300-летия со дня рождения М.В. Ломоносова. Оргкомитетом и Ломоносовской комиссией и были разработаны планы мероприятий.

В Санкт-Петербургском Научном центре РАН и академических учреждениях города на Неве в рамках деятельности Ломоносовской комиссии в 2004–2011 годах был выполнен большой комплекс мероприятий, направленных на популяризацию деятельности великого ученого, сохранение и преумножение его научного и культурного наследия.

Так, в ноябре 2006 года Санкт-Петербургский Научный центр РАН, Санкт-Петербургский комитет по истории и философии науки и техники РАН и Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники РАН провели научную конференцию, посвященную 295-летию со дня рождения М.В. Ломоносова. На конференции были сделаны доклады, открывающие новые грани жизни и творчества ученого. Многие материалы докладов включены в юбилейный сборник статей и материалов «Ломоносов». Комиссия инициировала проведение в апреле 2010 года круглого стола «Ломоносов и его немецкое окружение» в рамках немецкой недели в Санкт-Петербурге, проводимой МИД ФРГ и генеральным консульством ФРГ.

В год празднования 300-летия со дня рождения М.В. Ломоносова Институтом антропологии и этнографии имени Петра Великого РАН была возрождена традиция проведения Ломоносовских чтений в Кунсткамере. В 2011 году Ломоносовская комиссия выступила инициатором проведения пятого межвузовского фестиваля «Морфест—2011», посвященного 300-летию

юбилею М.В. Ломоносова, международной конференции «Филологическое наследие М.В. Ломоносова», ряда выставок и других мероприятий, приуроченных к юбилею.

Активно шла работа и в сфере издательской деятельности. В рамках выполнения плана работы Ломоносовской комиссии СПбНЦ РАН была опубликована книга Э.П. Карпеева «Русская культура и М.В. Ломоносов».

В Санкт-Петербургском институте истории РАН на протяжении нескольких лет велась исследовательская работа по историческим трудам М.В. Ломоносова в контексте русской исторической науки XVIII в. Один из ее важных итогов — выход в свет монографии М.Б. Свердлова «М.В. Ломоносов и становление российской исторической науки XVIII в.».

Еще один пример плодотворной издательской деятельности Ломоносовской комиссии — подготовка монографии Л.Б. Модзалевского «М.В. Ломоносов и его литературные отношения в Академии наук (из истории русской литературы и просвещения середины XVIII в.)». Этот проект был реализован при поддержке Ломоносовской комиссии СПбНЦ РАН по гранту СПбНЦ РАН в Санкт-Петербургском филиале Архива РАН.

Также в СПФ АРАН был создан мастер-диск электронного издания «Документы М.В. Ломоносова в СПФ АРАН». Материалы, освещающие различные стороны жизни и трудов М.В. Ломоносова размещены на интернет-сайте СПФ АРАН.

Институт лингвистических исследований РАН издал пятый выпуск «Материалов к «Словарю языка М.В. Ломоносова» — «Минералогия М.В. Ломоносова». Этот проект также включает в себя работы «Исследования и материалы по стихосложению М.В. Ломоносова», «Метрико-строфический справочник к произведениям М.В. Ломоносова» и «Словарь рифм М.В. Ломоносова» (в двух томах). Институтом была проведена большая работа по подготовке трехязычного словаря «М.В. Ломоносов: словарь языковой личности», словаря-справочника «М.В. Ломоносов и немецкая культура XVIII века», по созданию сетевого электронного издания академического Полного собрания сочинений М.В. Ломоносова.

В Музее антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН (Кунсткамера) по итогам на-



учно-исследовательской работы по истории Химической лаборатории М.В. Ломоносова подготовлен сборник статей и материалов «Летопись Химической лаборатории».

К юбилею М.В. Ломоносова вышло из печати два каталога: каталог книг библиотеки Ломоносова, в том числе выявленных в Хельсинской национальной библиотеке, а также каталог, содержащий записи ученого на рукописных книгах, хранящихся в фондах БАН.

Ломоносовская комиссия СПбНЦ РАН постоянно вела работу по популяризации жизни и деятельности М.В. Ломоносова: даны интервью теле-радиожурналистам о подготовке к 300-летию юбилею Ломоносова, подготовлены радиопередачи на «Радио России», записаны выступления на интернет-телевидении Архангельска, совместно с представителями Архангельской области проведена пресс-конференция в агентстве РИА «Новости».

Члены Ломоносовской комиссии принимали участие в российских и международных научно-практических конференциях, посвященных 300-летию Ломоносова, проводившихся на родине ученого в Архангельской области, в том числе в традиционных Ломоносовских чтениях.

Комиссия приняла участие в подготовке и проведении международных передвижных выставок «Михаил Ломоносов и его роль в мировой науке» в российских центрах науки и культуры за рубежом.

Следует отметить, что юбилей Ломоносова — значимое событие не только для России, но и для всего мира: 2011 год объявлен ЮНЕСКО годом химии и годом Ломоносова. Поэтому Ломоносовская комиссия при подготовке юбилея активно взаимодействовала с зарубежными организациями: Британским обществом технологии стекла, Хельсинским университетом, Международным союзом истории и философии науки, Саксонским музеем искусств и многими другими.

Реализация программы празднования 300-летия со дня рождения М.В. Ломоносова заметно способствовала повышению престижа науки в нашем обществе, к чему стремился и о чем мечтал сам Ломоносов.

Великого ученого отличала постоянная направленность на достижение практических результатов, на развитие экономики и промышленности, на решение экономических проблем Российского государства. Он был идейным на-

следником Петра Первого, разделяя и творчески развивая его воззрения на становление промышленности и торговли, на роль наук и просвещения, на задачи Академии в экономической сфере. Утвержденное первым российским императором Положение об учреждении Академии наук и художеств гласило: «Аще же притом экономия учена будет, то похвально и весьма полезно, ибо в общем жительстве учением ее великая прибыль и польза чинится». Основатель Петербурга и Академии предусматривал развитие в академических стенах экономики как отрасли науки и учебной дисциплины.

Ломоносова нередко называют первым русским академиком. Важно отметить, что у историков нет единого мнения на этот счет. Одни исследователи полагают, что в Академии наук академиками были все профессора и адъюнкты. Другие отстаивают точку зрения, согласно которой академиками считались только профессора. Соответственно нет единого мнения о том, был ли Ломоносов первым русским академиком или нет. Если исходить из первой точки зрения, первые русские академики — это Василий Евдокимович Ададуров, который с 1733 года носил звание адъюнкта по высшей математике, и Григорий Николаевич Теплов, ставший с января 1742 года адъюнктом по ботанике. Если исходить из второй точки зрения, то первыми русскими академиками считаются М.В. Ломоносов (профессор химии) и В.К. Тредиаковский, которому также 25 июля 1745 года присвоили звание профессора элоквенции (красноречия).

Исследования Ломоносова на протяжении всей его жизни носили не только научный, но и прикладной характер, совершенствовали созданное им современное производство материалов, способствовали развитию отечественной промышленности и улучшению экономической ситуации в стране. Ломоносов проявлял себя не только как талантливый изобретатель, но также и как предприниматель, экономист.

Так, именно Ломоносов основал в России многие химические производства по выпуску неорганических пигментов, глазури, стекла и фарфора. Он не только составлял рецептуру получаемых веществ, но и активно занимался самим процессом промышленного производства, внедряя свои идеи непосредственно в жизнь. Особой страницей в биографии русского академика стало создание Усть-Рудицкой фабрики

цветного стекла и организация первого в России промышленного выпуска цветных стекол. Производя множество опытов, Ломоносов выявлял оптимальные рецепты изготовления, по сути закладывая первые русские стандарты производства фарфора, стекла и других видов продукции.

Говоря о развитии державы, ученый ставил во главу угла экономику. «Благополучие, слава и цветущее состояние государств от трех источников происходит. Первое — от внутреннего покоя, безопасности и удовольствия подданных, второе — от победоносных действий против неприятеля, с заключением прибыточного и славного мира, третье — от взаимного сообщения внутренних избытков с отдаленными народами чрез купечество. Российская империя внутренним изобильным состоянием и громкими победами с лучшими европейскими странами равняется, многие превосходит» [2, т. 6, с. 421] — этими программными тезисами начинал он свое «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию».

Ломоносов считал необходимым установление государственной опеки над отечественным промышленным и торговым предпринимательством, введение покровительственных таможенных тарифов и даже, в отдельных случаях, запрета на ввоз из других государств товаров, которые могли производиться внутри страны.

Разумеется, напрямую с вопросами экономики и организации производства ученый увязывал свои работы в сфере геологии, горного дела и металлургии. Первейшей государственной задачей он считал развитие этих отраслей в России. Российской державе нужно было развивать промышленность, прежде всего металлургию, и Ломоносов это ясно понимал. «Военное дело, купечество, мореплавание и другие государственные нужды неотменно требуют металлов, которые... почти все получаемы были от окрестных народов, так что и военное оружие иногда у самих неприятелей нужда заставляла перекупать через другие руки, дорогою ценою» [2, т. 5, с. 401].

К слову, геология была хорошо известна Ломоносову и очень его интересовала — ведь еще будучи молодым студентом он был направлен в Германию с задачей обучиться геологической науке, горному делу и металлургии. Также базой для последующих исследований Михаила Ломоносова в этих областях науки стало порученное профессором Амманом составление Каталога

камней и окаменелостей Минерального кабинета Академии наук и художеств.

Еще в 1742 году ученый приступил к написанию учебного руководства «Первые основания горной науки, или Горная книжица». В «Горной книжице» Ломоносов систематизировал и проанализировал собственные научные изыскания и собранные им многочисленные материалы горнозаводских предприятий. В «Основаниях» автор утверждал: задача геологии — отыскивать «минералы в обществе потребные, которые промыслы могут принести не последнюю прибыль» [2, т. 5, с. 397–631, 688–721]. Академик хотел, чтобы его соотечественники «вяще вникнули разумом и рачением в земные недра, к большому приращению государственной пользы» [Там же].

Деятельность Ломоносова-экономиста отличалась широтой научного диапазона, многоплановостью. Научный труд «О сохранении и размножении российского народа» был непосредственно посвящен решению важнейших социально-экономических проблем Российской державы: умножению внутреннего богатства, улучшению земледелия, совершенствованию здравоохранения, широкому просвещению. То есть — повышению благосостояния страны и ее населения.

Ломоносов хорошо понимал, что темпы развития науки и производства зависят и от скорости решения терминологических проблем. Всестороннее знание русского языка, обширные сведения в области экономики и естественных наук, владение латинским, греческим и западноевропейскими языками позволили Ломоносову заложить правильные основания русской технической и научной терминологии.

Велики заслуги Ломоносова и в области картографии. Размышляя о промышленном и экономическом развитии России, он в своих трудах большое внимание уделял изучению природных ресурсов. По существу, Ломоносов исследовал производительные силы России. А это требовало познания географии. В середине XVIII века, когда большинство известных ученых еще считали географию придатком той или иной науки, Ломоносов не только утверждал географию как самостоятельную науку, но и рассматривал ее как науку комплексную, охватывающую не только природу, но и экономическую деятельность человека.

«...По моему расположению, представлению и хождению Правительствующий сенат прика-



зал из всех городов Российского государства присылать в Академию надежные и обстоятельные географические известия, по тридцати запросам, от чего неотменно воспоследует не токмо российской географии превеликая польза, но и экономическому содержанию всего государства сильное вспомоществование», — отмечает Ломоносов в «Росписи упражнений сего 1759 года» — отчете о работах за 1759 год [3, ф. 20, оп. 3, № 134, л. 42].

Именно Ломоносов стал основоположником экономической географии, выделившим эту отрасль знаний в самостоятельную науку. В XVIII веке среди географов безраздельно господствовала описательная статистика. Ломоносов всегда стремился связать разрабатываемые им теоретические проблемы с практическими нуждами государства. Он предложил изучать экономико-географические характеристики районов, зависимость их хозяйства от географического положения и природных условий. Это была совершенно новая для того времени научная концепция. Даже сам термин «экономическая география», предложенный Ломоносовым, прочно вошел в научный обиход лишь в начале XX века. М.В. Ломоносов руководил работой по созданию подробного географического атласа и географического описания страны. В 1759 году ученый составил маршруты трех экспедиций для определения географических координат различных пунктов Российской империи.

Понимание Ломоносовым значения географических знаний, их развития видно в его «Слове похвальном... императрице Елисавете Петровне»: «Что полезнее есть человеческому роду к взаимному сообщению своих избытков, что безопаснее плавающим в море, что путешествующим по разным государствам нужнее, как знать положение мест, течение рек, расстояние градов, величину, изобилие и соседство разных земель, нравы, обыкновения и правительства разных народов? Сие ясно показывает География, которая всея вселенная обширность единому взгляду подвергает» [2, т. 8, с. 252].

Особым вниманием ученого пользовались проблемы востоковедения. В его время еще не существовало понятий «геополитика», «демография» и «этнография», но Михаил Ломоносов углубленно вел работу в этих важнейших научно-практических направлениях. Он предвидел: «России могущество будет прирастать Сибирью». Он был первым российским общественным дея-

телем и ученым, который осознал: геополитическое положение Российской державы требует неукоснительно налаживать экономические, политические и культурные связи с государствами Востока, а также пристально изучать язык, культуру и особенности быта мусульманских и буддистских народностей России.

Нельзя не упомянуть о «Кратком расположении сочиняемого экономического лексикона российских продуктов и показании внутреннего и внешнего оных сообщения с принадлежащими к тому ландкартами», представленном в Академию наук 11 августа 1763 года. Первоначальной целью автора было подготовить свод сведений для отечественных коммерсантов. Чтобы составить этот своего рода справочник, Ломоносов организовал запросы в российские регионы для получения необходимой информации о каждом указанном в запросах продукте: о количестве и качестве его изготовления, о масштабах его продажи и потребления, о цене товара и проч.: «Собрать имена всех российских товаров, внутри производимых натурою и искусством, и расположить по алфавиту, к чему могут служить: 1) лексиконы российские, каковы есть, 2) тарифы пошлинные, 3) материалы, кои по подрядам ставятся ко Двору, в Адмиралтейство, в Академию Наук, в Канцелярию от строений, на Конюшенный двор, в Медицинскую канцелярию и в другие команды, здесь в Санкт-Петербурге, в Москве и в губернских городах, а особливо в корабельных пристанях и где бывают постройки крепостей и каналов... К оным именам, по алфавиту расположенным, приписывать места, где каждый продукт родится или производится, с его количеством и добротой, на том ли самом месте исходит или для распродажи в другие города развозятся и каким путем, по чему продается; места упоминаемые поставить на картах, при том присовокупленных, и назначить в лексиконе градус и минуту долготы и широты для удобнейшего на карте сыскания... На картах должно по течению судоходных рек поставить значки судов, какие где ходят... Пересухи летние, соединение вершин, пристани, волоки, пороги назначить по рекам особливими знаками, нарочно к тому вымышленными. А по сему пути — перевозки, мосты, высокие горы и прочая; и, наконец, по воде и по суку заставы для пошлин... Таким образом, не надобно будет сочинять особливых карт для каждого продукта, от чего бы произошли великие и бесконечные

томы, но довольны к тому быть имеют две карты — российская и сибирская; и все содержаться будет в одной книге, на полудести, в полтора или в два алфавита» [3, ф. 3, оп. 1, № 474, л. 214 об.].

Запрошенные сведения с мест продолжали присылаться в Императорскую Академию наук и художеств на протяжении ряда лет и представляли несомненную научную и хозяйственную ценность.

Большое внимание ученых уделял становлению современного, передового сельского хозяйства. Достаточно вспомнить «Мнение о учреждении Государственной Коллегии Земского Домоустройства». Этот документ был составлен после того, как Екатерина Вторая распорядилась представить ей проект создания «класса агрикультуры» в составе Императорской Академии наук и художеств. Вопреки мнению российской самодержицы, профессор Ломоносов выступил со встречным предложением: он полагал целесообразным вместо нового академического подразделения сформировать новую полноправную Коллегию, которая бы располагала куда большими возможностями для реализации поставленных задач.

Предложения Ломоносова остались без ответа. Но уже в 1765 году, несколько месяцев спустя после кончины русского академика, согласно воле императрицы будет создано Вольное экономическое общество, прототипом которого и послужила та самая Государственная Коллегия Земского Домоустройства. Провозглашенная задача Вольного экономического общества — всемерно способствовать развитию отечественного земледелия и домостроительства, промышленности и внутренней торговли, то есть тех самых сфер экономики, которым Ломоносов придавал приоритетное значение. В этой связи следует упомянуть и о выполненном Ломоносовым переводе книги С. Губерта «Экономическая стратегема», получившем название «Лифляндская экономия», где регламентируются все стороны сельхозпроизводства.

Ученый уделял большое внимание экономическому просвещению. Он горячо выступал за широкий выпуск специализированных изданий. 15 июля 1759 года он представил в Академическую канцелярию очередной свой проект: «По примеру других государств весьма полезно быть рассуждаю, чтобы учредить при Академии наук печатание внутренних Российских ведомостей, которые бы в государственной экономии и частных людях, а особливо в купечестве при-

носили пользу отечеству сообщением знания о внутреннем состоянии государства, в чем где избыток или недостаток, например плодородия хлеба или недороду, о вывозе и привозах товаров или припасов и многих других недрах подобных...» [4, с. 392—393]. Проект этот получил одобрение президента Императорской Академии наук и художеств, но, к сожалению, не был воплощен.

Особо следует отметить вклад Ломоносова в совершенствование процесса измерений и создание необходимой приборной базы.

XVIII век был веком реформ, развития науки и промышленности, в том числе и в России. Для промышленного производства товаров и надежной международной торговли необходимо было упорядочить систему измерений. Оживление разнообразных связей России с западноевропейскими государствами приводило к возникновению новых производств, отраслей науки и техники. Необходимые для этого измерительные приборы, поступавшие из-за границы, способствовали появлению новых единиц измерений — механических, электрических, тепловых, магнитных. Все это требовало и создания принципиально новых измерительных приборов, которые позволили бы получать доступную для восприятия и учета информацию о ранее малоизученных явлениях.

В первой половине XVIII столетия были созданы первые термометры и начались количественные тепловые измерения. Активно развивалось мореплавание, что вызывало необходимость в новых методах измерений расстояний и соответствующих измерительных приборах. Исследования выходили на новый уровень, что предъявляло особые требования к точности и объективности проводимых измерений.

Изготовлением, наладкой и поверкой приборов стали заниматься ремонтно-юстировочные мастерские, «барометренная» и «инструментальная» палаты при Академии наук и художеств.

Петр I повелел в качестве основной меры ввести сажень, которая приравнивалась к семи настоящим английским футам и делилась на три аршина. Подлинного указа императора не сохранилось; полагают, что он был издан после основания Петербурга. Потому в XVIII веке предстояло уже не столько и не только «единообразить» систему мер, сколько определить их точность, создать эталоны.

Европейскими исследователями необходимость употребления в химических опытах меры



и веса была признана только после работ А.Л. Лавуазье, осуществленных в самом конце XVIII века, спустя годы после кончины Ломоносова. Что же касается количественного метода, то он получил распространение среди ученых-химиков намного позже. Ломоносов же неоднократно подчеркивал необходимость проверять вычислением все произведенные химические анализы, взвешивать, соблюдать пропорции. Вместе с тем Ломоносов не раз предостерегал и от опасности одностороннего увлечения опытами, энергично отстаивая права теоретического мышления в естествознании. В своем «Рассуждении о большой точности морского Пути», Ломоносов сформулировал принцип, утверждающий неразрывное единство теории и опыта: «Из наблюдений устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения — есть лучший способ к изысканию правды» [2, т. 2, с. 163]. В опытах Ломоносова большое принципиальное внимание к результатам сочеталось с оригинальностью и остроумием экспериментальной методики.

Вклад Ломоносова в совершенствование процесса измерений и создание необходимой приборной базы, а в конечном итоге — в развитие отечественных приборостроения и метрологии — сложно переоценить. Им было изобретено множество самых разнообразных приборов. Среди них — оптические приборы (микроскопы, фотометры, рефрактометры, телескопы и проч.), навигационные, гравиметрические, метеорологические, а также аппаратура, предназначенная для осуществления электрических и тепловых измерений. Принципиальное значение в деятельности Ломоносова как приборостроителя имел тот факт, что, в отличие от большинства современников, он вел проектирование и изготовление своих новых приборов на прочной основе глубоких и строгих расчетов, многочисленных экспериментов и всесторонних исследований. Благодаря этому многие приборы, созданные Ломоносовым, не только вошли в обиход еще при жизни их создателя, но далеко пережили свое время. Принципы действия, заложенные в них, не потеряли значение и в наши дни. Подавляющее большинство изобретенных Ломоносовым измерительных устройств, пройдя сложный путь от инженерных расчетов до опытных образцов и выдержав испытание временем, впоследствии стало примером для русских приборостроителей.

Особое место среди работ Ломоносова занимала серия устройств, позволявших проводить физические исследования химических объектов: измерять вязкость жидкостей, производить гидростатическое взвешивание и т. д.

Необходимые ученому термометры изготавливались в Инструментальной палате Императорской Академии наук и художеств, но они не всегда могли удовлетворить высоким требованиям академика к точности проводимых им измерений. По этой причине Ломоносов разработал собственную конструкцию термометра с оригинальной шкалой.

Также он сконструировал точило «для исследования твердости камней разных и стекол в диаметре около полуторых футов» [3, ф. 3, оп. 1, № 165, л. 237]. Это точильное устройство по своим характеристикам выполняло роль инструмента, позволявшего определять силу сцепления твердых тел.

Говоря о созданных Ломоносовым приборах, нельзя не упомянуть вискозиметр и «новый Папинов котел». Первый позволял изучать силу сцепления в жидких веществах [3, ф. 3, оп. 1, № 165, л. 237], второй — исследовать поведение тел под повышенным давлением при высоких температурах в автоклавах. Существовавший «Папинов котел» (изобретен французским физиком Дени Папеном (Papin) в 1680 году) не устроил ученого, и тот разработал усовершенствованный проект такого прибора [3, ф. 3, оп. 1, № 165, л. 236]. В феврале 1753 года академику была доставлена «сделанная на Сестрорецких заводах по его инвенции стальная Папинова машина» [4, с. 193].

С 1756 по 1758 год ученый работал над созданием одного из наиболее значительных своих изобретений — «ночезрительной трубы» (или «никтоптической»), позволяющей в сумерках отчетливо различать предметы. Она имела крупный объектив, обеспечивала сильное увеличение, при этом ее выходной зрачок по своим размерам не превышал зрачка человеческого глаза в темноте.

«Изобретен мною новый оптический инструмент, который я назвал никтоптической трубой (*tubus nyctopticus*); оный должен к тому, чтобы ночью видеть можно было; первый показывает на сумерках ясно те вещи, которые простым глазом не видны, и весьма надеяться можно, что старанием искусных мастеров может простереться до такого совершенства, какого ныне достигли те-

лескопы и микроскопы от малого начала» [2, т. 10, с. 393], — писал Ломоносов.

Вопросы измерения и конструирования новых приборов непосредственно связаны с проблемами метрологии и стандартизации — тех важнейших направлений, становлению которых М.В. Ломоносов активно способствовал своей как научной, так и организационной деятельностью.

Характерная черта Ломоносова-ученого — в экспериментальные исследования он непременно внедрял методы количественных определений: линейных измерений, взвешивания, определения плотности, яркости и т. д.

Благодаря усилиям Ломоносова Химическая лаборатория Императорской Академии наук и художеств была оснащена самыми разнообразными весами, в частности большими «пробными весами в стеклянном футляре», серебряными пробирными весами, несколькими ручными аптекарскими весами с медными чашками и т. д.

С помощью этой аппаратуры профессор Ломоносов добивался высочайшей по тем временам точности измерений. Наиболее точные «опытовые весы» (равновесы) он заказывал Сестрорецкому оружейному заводу. Это предприятие (созданное по указу Петра Первого) славилось искусными мастерами. И изготовление сверхточных весов, как и своего «Папинова котла», профессор Ломоносов доверил именно им.

Разновесы были выполнены из меди и серебра и содержались в специальных футлярах. Наименьший разновес, которым располагала Химическая лаборатория, позволял производить взвешивание препаратов с точностью до четверти «уменьшенного золотника» (золотник — старая русская мера веса, равная 4,266 г [5]).

Талантливый изобретатель и приборостроитель, Ломоносов сам сконструировал множество приборов для самых разных сфер научной и иной деятельности, так или иначе связанных с точным измерением. Это были приборы для физическо-го исследования химических объектов: вискозиметр для измерения вязкости, рефрактометр для определения показателя преломления, прибор для определения твердости образцов. Также Ломоносовым был создан ряд новых приборов и методов для определения долготы и широты места. Ломоносовым был изобретен горизонтоскоп, с помощью которого можно было наблюдать за отдаленными предметами, находясь ниже поверх-

ности земли. Он представлял собой медную трубу с двумя коленами по краям, направленными в разные стороны. В колена под углом 45° к оси трубы вставлялись два зеркальца. Световые лучи отражались от верхнего зеркала и направлялись по трубе вниз, а затем от нижнего зеркала попадали в глаз наблюдателя. Спустя почти век российский инженер Карл Шильдер догадался создать на основе горизонтоскопа первый в мире перископ, важный элемент подводных лодок.

Значение, которое Ломоносов придавал измерениям, ясно видно из написанного им в 1752 году «Представления в Академическое собрание о физических опытах при чтении курса экспериментальной химии». Этот документ показывает, какие требования академик предъявлял к процессу измерений в ходе проводимых экспериментов и насколько ответственно относился к обеспечению необходимой приборной базы:

«Славнейшие мужи, почтеннейшие коллеги.

Я считаю весьма полезным в моих химических лекциях, читаемых учащемуся юношеству, всюду, где только возможно, присоединять к химическим опытам физические и попытаюсь сам осуществить то, о чем говорил на последнем публичном собрании в «Слове о пользе химии», которое представляю вам в латинском переводе студента Яремского. Поэтому в течение всего курса экспериментальной химии я буду трудиться над тем, чтобы:

- 1) определять удельный вес химических тел;
- 2) исследовать взаимное сцепление их частиц:
 - a) путем излома,
 - b) путем сжимания,
 - c) путем стачивания на камне,
 - d) для жидкостей — путем счета капель;
- 3) описывать фигуры кристаллизующихся тел;
- 4) подвергать тела действию Папинова котла;
- 5) всюду наблюдать степени теплоты;
- 6) изучать тела, преимущественно металлы, при помощи продолжительного растирания.

Одним словом, по возможности, пытаться исследовать все, что может быть измерено, взвешено и определено при помощи практической математики.

Для этого мне необходимы:

- 1) деревянные вески для взвешивания твердых тел в воздухе и в воде...;
- 2) прибор для дробления и сжимания тел...;
- 3) круглый точильный камень для изучения твердости тел...;



4) прибор для получения одинаковых капель и для их подсчета...;

5) более прочная и более соответствующая моей цели Папинова машина;

6) машина для растирания с четырьмя ступками и пестиками, сделанными: 1) из меди, 2) из железа, 3) из свинца, 4) из олова;

7) пирометр, который по моей просьбе начали делать три с лишком года тому назад, но до сих пор не сделали;

8) десять ртутных термометров, маленьких и простых...» [3, ф. 20, оп. 3, № 12, л. 1–2].

Ломоносов не только использовал меру и вес в своих исследованиях, но и обучал своих учеников необходимой точности измерений.

Ученик Ломоносова, талантливый русский химик Василий Клементьев писал: «Я думаю, нет такого ученого, который бы не знал, какое почти бесконечное множество имеется химических опытов; но при всем том он не сможет отрицать, что авторы почти всех их прошли молчалием такие весьма важные и крайне нужные указания, как мера и вес» [6]. И действительно, во времена Ломоносова ученые во многих отраслях науки не вполне понимали важность обязательной проверки опытов мерой и весом, довольствуясь предположениями, унаследованными от классиков науки прошлых веков и принятыми как данность.

Выполненная в 1754 году под руководством Ломоносова диссертация химика Василия Клементьева «Об увеличении веса, которое некоторые металлы приобретают при осаждении» была целиком построена на точных измерениях. Впоследствии В.И. Клементьев стал одним из наиболее активных сотрудников Химической лаборатории Императорской Академии наук и художеств и вписал свое имя в историю российской химии XVIII столетия.

Клементьев указывал, что «в отсутствие меры и веса мы не можем наверняка, не опасаясь неудачи, обещать желательное нам явление, хотя оно и было уже ранее достигнуто другими. Это обстоятельство вполне поясняет, почему из химических опытов, уже опубликованных, многие редко или даже никогда не удаются другим производящим их впоследствии». И, тем более, при отсутствии зафиксированных результатов точных измерений, при несовершенстве терминологической базы нельзя было бы говорить о повторении результатов для промышленного и иного применения сделанных открытий.

Так же, как в процессе создания отечественных смальты и фарфора, Ломоносов во многих направлениях своей деятельности формировал необходимые, по его мнению, нормативы. Выражаясь современным языком, он использовал методы стандартизации для упорядочения различных видов деятельности.

Так, например, он предъявлял очень жесткие требования к степени очистки веществ, используемых для постановки научных и научно-практических экспериментов. Еще составляя проект Химической лаборатории в марте 1745 года, адъютант Ломоносов настаивал на непременном использовании химически чистых веществ и реактивов: «Нужные и в химических трудах употребительные материи сперва со всяким старанием вычистить, чтобы в них никакого постороннего примесу не было, от которого в других действиях обман быть может» [7].

К результатам своей работы он всегда предъявлял высокие требования, обеспечивающие самое лучшее качество, — будь то качество исходных материалов, качество технологических процессов, качество выпускаемой продукции или качество предприятия, тем самым закладывая в отечественных науке и производстве новые традиции, которые определяли их развитие еще многие годы.

В своих работах ученый непременно старался отразить научные эксперименты и производство продукции в конкретных цифрах, выставив порой довольно жесткие, но точные требования к качеству используемых и получаемых материалов. Разработка Ломоносовым рецептур смальты — пример подобной работы. При проведении проб стеклянных масс в Химической лаборатории Императорской Академии наук и художеств он вел подробные записи, в которых тщательно фиксировал название и точный вес взятых материалов, способ плавки и полученные результаты. Его план экспериментальных работ был строго продуман. Опыты ставились последовательными сериями, состав смальты постепенно усложнялся.

Ломоносов установил влияние температуры плавки на физические свойства готового стекла, изучал прозрачность получаемых стекол, их цвет в проходящем и отраженном свете.

Зафиксированные Ломоносовым взаимосвязи требовалось тщательно соблюдать при повторных операциях. Только при таком условии

можно было рассчитывать на стабильность характеристик получаемых изделий.

Один из важнейших параметров стекла — его цвет. Известные в то время красители были малочисленны и не всегда выдерживали высокие температуры. Ученый вплотную занялся созданием новых красящих веществ, которые бы, с одной стороны, отличались термической стойкостью, не утрачивали своих свойств при варке стекла, а с другой, — обеспечивали яркость, сочность и чистоту цветового тона и, в своей совокупности, широкую гамму цветов и оттенков.

Устанавливаются конкретные технологические режимы, позволяющие получать различные цветовые оттенки изготавливаемого стекла. Для этого ученый конструирует специальные приборы — прообразы современных колориметров (устройств, обеспечивающих фотометрические методы количественного анализа и основанных на определении концентрации вещества в окрашенном растворе путем измерения количества света, поглощенного этим раствором).

Важную роль в получении конечного продукта играл температурный режим. Ломоносов вооружил Химическую лабораторию Императорской Академии наук и художеств широким набором печей для варки стекла («финифтяных печей»), обжигательных печей и специальных вертикальных печей, в которых длительное время можно было поддерживать заданный температурный режим. По сути, это было первым предвестником термостатных производств, получивших широкое распространение только в XX веке. Академик постоянно и самым тщательным образом, используя разнообразные термометры, производил замеры температуры. Для «финифтяных печей» он подбирал специальные огнеупорные материалы, после чего отрабатывал оптимальный режим варки цветного стекла.

Большое значение ученый придавал также чистоте исходных и получаемых химических веществ в растворах. Чтобы обеспечивать требуемую чистоту, он специально сконструировал прибор для фильтрования под вакуумом.

Так, химический состав, весовые соотношения и степень чистоты компонентов исходного сырья, температура плавки, степень прозрачности и цвет стекла, другие его физические параметры унифицируются и закладываются в нормативы, регламентирующие технологические процессы для Усть-Рудицкой фабрики и всего отечественного стекольного производства.

Претворяя в жизнь популярный сегодня принцип «в качестве нет мелочей», профессор Ломоносов поставил в Химической лаборатории около 4 тысяч экспериментов — и в конце концов определил рецептуру изготовления цветных стекол, прозрачных и непрозрачных, и разработал технологию их производства.

Русский ученый открыл способ получения смальты любого цвета, глубоких и сочных тонов. Он добился, чтобы смальты, изготовленные в Химической лаборатории Императорской Академии наук и художеств, превосходили аналогичную продукцию итальянских мастеров по яркости цвета, по глубине и сочности цветового тона, по разнообразию оттенков. Достаточно взглянуть на широчайший диапазон цветовых оттенков, которые придавались стеклу в Химической лаборатории Академии, а в дальнейшем — на Усть-Рудицкой фабрике. Проведя множество опытов, сопровождаемых точнейшими измерениями всех параметров используемых материалов, процессов и конечных результатов, Ломоносов получил богатейший статистический материал по интересующей его теме. В результате он смог отобрать оптимальные способы производства, доступные для многократного воспроизведения. По сути, это была унификация производимой смальты. Унификация — это и сегодня один из наиболее распространенных и эффективных методов стандартизации, который предусматривает приведение объектов к однотипности на основе установления рационального числа их разновидностей.

В своих исследованиях цвета и других оптических свойств стекла ученый опирался на мощную измерительную базу. Только им самим было сконструировано свыше десяти новых оптических приборов.

Фабрика Ломоносова, несомненно, имела черты сходства с аналогичными предприятиями того времени, но в то же время сильно от них отличалась. Она также была сравнительно небольшого размера, имела схожую планировку цехов. Но ни один из современных Ломоносову заводов не занимался изготовлением такого широкого ассортимента стеклянных изделий. Ломоносов не только тщательно изучил опыт уже существовавших производств, но в первую очередь оснастил свою фабрику новыми механизмами, выработал новые методики обработки материалов.

Так, 22 мая 1753 года Ломоносов отправил доношение в Канцелярию Академии, в котором сообщал, что на «новоучреждаемой фабрике



делания разноцветных стекол» потребны некоторые инструменты, им «вновь изобретенные для ускорения работ, а особенно станок для формовки стеклянных четырехгранных брусков к мозаике и другие машины... нигде купить нельзя, за тем что их нет, а инструментальные художники при Академии Наук оные инструменты по моему указанию могут делать» [4, с. 137].

Налаживая производство смальты, русский академик унифицировал и размер ее кусочков — чтобы те проще было впоследствии складывать друг с другом в мозаичные изображения. Во времена Ломоносова отсутствовало понятие «параметрические ряды продукции» (важнейший элемент современной стандартизации). Но ученый в ходе своих исследований выстраивал такие ряды — по размеру, по цвету, по степени прозрачности, по чистоте обработки поверхности и т. д. Получившиеся параметрические ряды (то есть, ряд установленных оптимальных параметров продукции) позволяли получать более удобную в применении продукцию и в результате — предметы более высокого качества с меньшими затратами средств и усилий.

Но цвет, прозрачность и размеры брусочков смальты были не единственными критериями, из которых профессор Ломоносов исходил в своих требованиях к качеству мозаичного стекла. К этим критериям он причислял также качество обработки поверхности. Поэтому много времени ученый посвятил и разработке методов шлифовки смальты.

Столь же тщательно подбирал М.В. Ломоносов рецептуру для отечественного фарфора, создавал нормативные требования к сырью, к режиму обжига (температура, время и т. д.) и к качеству продукта.

«Исследовать все, что может быть измерено, взвешено и определено при помощи практической математики» [3, т. 9, с. 57] — это было своего рода девизом для Ломоносова в его экспериментах и научных поисках. И этот девиз удивительным образом совпадает с тем правилом, которое около века спустя сформулирует другой великий русский ученый — Дмитрий Иванович Менделеев, основатель русской метрологической службы: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский государственный архив древних актов. Ф. 1451. Д. 18. Л. 89–100.
2. **Ломоносов, М.В.** Полное собрание сочинений (в 11 томах). — М.: Изд-во АН СССР, 1952–2008.
3. Материалы Санкт-Петербургского филиала Архива РАН.
4. **Биярский, П.С.** Материалы для биографии Ломоносова [Текст] / П.С. Биярский. — СПб., 1865.
5. **Лебедев, Е.Н.** Ломоносов [Текст] / Е.Н. Лебедев. — М.: Молодая гвардия, 1990. — С. 138.
6. **Раскин, Н.М.** Василий Иванович Клементьев — ученик и лаборант М.В. Ломоносова [Текст] / Н.М. Раскин. — М.-Л.: АН СССР, 1952. — С. 37.
7. **Меншуткин, Б.Н.** Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова [Текст] / Б.Н. Меншуткин // АН СССР. — 3-е, доп. изд. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — С. 171.

УДК 340

В.Н. Снетков, К.А. Семенова

М.В. ЛОМОНОСОВ О НЕОБХОДИМОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРАВ РОССИИ В АРКТИКЕ: ОПЫТ И ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ

Наследие трудов М.В. Ломоносова представляет колоссальный интерес для многих отраслей современных наук: истории, физики, химии, географии, экономики и целого ряда других.

Значителен вклад М.В. Ломоносова и в области освоения и развития отдаленных территорий Арктики. Будучи выходцем из Русского Севера, М.В. Ломоносов понимал, какое значение

имеют северные пространства для экономического и политического будущего России.

В своем труде «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию» М.В. Ломоносов отмечал, что «...российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном...» [6]. Эти его слова отражают и характеризуют значение сухопутных и морских арктических пространств для обеспечения экономических, территориальных и стратегических интересов России.

П.В. Федоров тезис М.В. Ломоносова о прирастании российского могущества «...Сибирью и Северным океаном...» оценивает как отражение «...проведенного Петром I переустройства российской «географии власти». Как в свое время Петр Великий противопоставил Запад и Восток, так и М.В. Ломоносов отмечал, что «...чем больше европейская Россия растворит в себе Востока, чем скорее достигнет до главных поселений европейских в Азии и в Америке, тем могущественнее будет...». По мнению П.В. Федорова «Север» в концепции Ломоносова выступал как связующее звено с Востоком. Потому, как отмечает автор, «...Север не столько цель России, сколько ...средство на пути к могуществу» [8].

По мнению Н.П. Залывского, в наследии М.В. Ломоносова о Русском Севере «...современнику важно то, что он расценивал владение полярным пространством стратегической предпосылкой будущего экономики России». [2].

Интерес русского народа к изучению и освоению арктических пространств возник еще задолго до времен М.В. Ломоносова.

Так, например, уже в 1114 году в Новгородской летописи встречается упоминание о хождении новгородцев на Югру. Считается, что еще ранее, в 1032 году, состоялось плавание двинского посадника Улеба до Карских Ворот [10].

Как указывает А. Марголин, уже в XV веке «...русские промышленники — поморы ходили в Полярное море...и основали ряд промышленных становищ и селений на Мурманском Севере» [7]. Представляется, что создание становищ и селений на Севере русскими поморами свидетельствует о заселении и эффективном использовании арктических территорий подданными России.

На сегодняшний день известно, что русские мореплаватели начали путешествовать в Арктику уже очень давно. В итальянской литературе начала XVII века упоминается о донесении Папе Иннокентию VIII о плавании русских по северному морю и об открытии ими в конце 1500-х годов острова, «...который величиной превосходит остров Кипр и на картах называется именем Новой Земли» [1].

Так, например, в первой половине XVII века русские землепроходцы основали в Арктике систему так называемых острогов, военно-административных пунктов: «...Березовский острог, Обдорский, Мангазейский, Якутский, Жиганский, Олекминский, Зашиверский, Анадырский, Охотский». Представляется, что возведение русскими землепроходцами острогов в Арктике подтверждает, что указанные арктические территории попадают под суверенитет России, и что управляются и защищаются эти территории силами Российского государства. Представляется также, что оборона и управление какой-либо территорией, несомненно, предполагает в числе прочего ее заселение людьми и осуществление на ней определенной хозяйственной деятельности [10].

Известно также об образовании во второй половине XVII века русских селений в устьях рек Яны, Лены, Индигирки, Колымы.

Тем не менее, несмотря на активность русского народа на арктических пространствах, идеи М.В. Ломоносова отличаются новаторством в области перспектив и направлений освоения Севера.

Анализ и сопоставление знаний и разработок из различных областей науки позволили великому русскому ученому прийти к выводу о существовании так называемого Северо-Восточного прохода, соединяющего Атлантический и Тихий океаны.

По мнению В.Н. Лаженцева, «...систематизация различных фактов позволила М.В. Ломоносову сделать вывод: по Северному океану плавать можно и с большей пользой для России...» [4].

Доказывая возможность создания этого морского прохода, М.В. Ломоносов опирался и на естественнонаучные знания. Ученый пришел к выводу, что одно из основных препятствий для реализации этой идеи — полярные арктические



льды. По этой причине он стал автором специального научного труда — «Рассуждение о происхождении ледяных гор в северных морях» [5].

В своей работе «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию» М.В. Ломоносов отмечал, что «...могущество и обширность морей, Российской империи окружающих, требуют ... рачения и знания ... Северный океан есть пространное поле, где ... усугубиться может российская слава, соединенная с беспримерною пользою, чрез изобретение восточно-северного мореплавания в Индию и Америку» [6].

И.Ф. Кефели рассматривает «Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию» как первую геополитическую работу, поскольку именно на основании положений этого труда М.В. Ломоносова указом Екатерины II Адмиралтейств-коллегии от 14 мая 1764 года решено было «...в соответствии с предложениями Ломоносова о плавании «западно-северными морями» организовать поиск прохода Северным океаном... в Камчатку Северо-Западным проходом» [3].

М.В. Ломоносов также говорил о необходимости обеспечения территориальных интересов России в Арктике всеми возможными силами и способами, в том числе осваивая и заселяя арктические пространства: «...для приобретения малого лоскута земли... посылают на смерть многие тысячи народа, ... то здесь ли должно жалеть около ста человек... для расширения мореплавания, купечества, могущества, для государственной и государственной славы..., имея Сибирского океана оба концы и целый берег» [4].

Действительно, сегодня одним из юридических способов закрепления государственного суверенитета на территориальные пространства является установление факта открытия этих территорий и факта их освоения и заселения.

Труд М.В. Ломоносова по исследованию северных морей и обоснованию необходимости создания Северного морского пути стал исторической основой для защиты и обеспечения российского государственного суверенитета на обширных территориях Арктики.

На основании трудов и по инициативе М.В. Ломоносова в 1765 году была организова-

на арктическая экспедиция под руководством капитана В.Я. Чичагова. Целью экспедиции было произведение разноплановых исследований (метеорологические и гидрологические наблюдения, измерение температуры моря, сбор образцов минералов и др.), что позволило бы обнаружить возможный Северный морской путь. Несмотря на не вполне удачный исход экспедиции В.Я. Чичагова, необходимо отметить, что это была одна из первых экспедиций, в основе которой были заложены лишь научный расчет и прогнозирование. Многочисленные исследования и выводы М.В. Ломоносова о свойствах воды и течения в Северном Ледовитом океане ускорили открытие искомого Северного морского пути.

Деятельность и труды великого М.В. Ломоносова, как и многих других российских ученых, во всем были направлены во благо России и ее будущего.

В рамках современной науки и правоприменительной деятельности важно сохранить историческое наследие и опыт, оставленный нашими предками, оберегать территориальную целостность России, включая ее арктические территории.

Стремясь перенять и сохранить наследие великого русского ученого М.В. Ломоносова о защите интересов России на Севере, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ведет научную деятельность, направленную на изучение правового режима Арктики и выработку наиболее оптимальных условий для защиты интересов России в арктических пространствах. В частности, под руководством президента СПбГПУ, действительного члена РАН, профессора доктора технических наук Ю.С. Васильева на юридическом факультете СПбГПУ активно ведется научная работа в рамках гранта Российского гуманитарного научного фонда на тему: «Становление международно-правового режима Арктики». На этом же факультете СПбГПУ подготовлена к защите кандидатская диссертация на тему «Становление правового режима российской Арктики: историко-теоретический аспект». Санкт-Петербургский государственный политехнический университет выражает готовность и в дальнейшем претворять в жизнь призыв М.В. Ломоносова о необходимости защиты интересов России в Арктике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вилькицкий, А.** Северный морской путь [Текст] / А. Вилькицкий.— СПб.: Типография Морского Министерства, 1912 .
2. **Залывский, Н.П.** О преемственности северной концепции М.В. Ломоносова при выборе геополитической модели защиты экономических интересов России в Арктике [Текст] / Н.П. Залывский // «Арктика и Север».— 2011. № 2.
3. **Кефели, И.Ф.** Ломоносов был одним из тех провидцев нашей земли русской, который на века предопределил геостратегию развития [Текст] / И.Ф. Кефели // Арктика и Север.— 2011. № 1.
4. **Лаженцев, В.Н.** Географические идеи М.В. Ломоносова [Текст] / В.Н. Лаженцев // Известия Коми научного центра УрО РАН. Выпуск 1(5).— Сыктывкар, 2011.
5. **Лебедев, Е.Н.** Ломоносов [Текст] / Е.Н. Лебедев.— М.: Молодая гвардия, 1990.
6. **Ломоносов, М.В.** Краткое описание разных путешествий по северным морям и показание возможного проходу Сибирским океаном в Восточную Индию // М.В. Ломоносов.— Полное собрание сочинений в 11 томах.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1952.
7. **Марголин, А.** Большевики осваивают Арктику [Текст] / А. Марголин.— М.: Партиздат ЦК ВКП, 1937.
8. **Федоров, П.В.** Российское могущество прирастать будет не только Сибирью, но и Севером [Текст] / П.В. Федоров // Арктика и Север.— 2011. № 1.
9. **Чувинов, И.А.** Деятельность М.В. Ломоносова в географическом департаменте [Текст] / И.А. Чувинов // Вестник Международного института управления.— Архангельск.— 2006. № 10–12.
10. **Шиловский, М.В.** Хозяйственное освоение Арктики в дореволюционной России [Текст] / М.В. Шиловский // ЭКО.— 2009. № 10.
11. **Шитарев, В.** На просторах арктических морей [Текст] / В. Шитарев // Наука и жизнь.— 1990. № 1.

УДК 662.767.2: 661.961:621.2

*М.П. Федоров, В.И. Масликов,
А.Н. Чусов, Д.В. Молодцов*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПРОИЗВОДСТВУ ВОДОРОДА ИЗ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Биомасса в настоящее время и в ближайшей перспективе остается важнейшим возобновляемым энергетическим ресурсом ввиду значительного потенциала, доступности, эффективности преобразования в тепловую и электрическую энергию. В 2008 году использование биомассы достигло примерно 1220 млн тонн нефтяного эквивалента (ТНЭ), что составило 77 % от вклада всех возобновляемых источников энергии в мировом потреблении первичных энергетических ресурсов (12270 млн ТНЭ). К 2035 году мировое потребление первичных энергетических ресурсов прогнозируется на уровне 16750 млн ТНЭ, в том числе вклад возобновляемых источников энергии составит 3130 млн ТНЭ, из которых доля биомассы 62 % [1].

Наряду с использованием в энергетических целях значительных объемов первичной биомассы, все большее внимание уделяется вторичной биомассе — различным видам отходов, которые образуются в большом количестве, практически не используются и загрязняют окружающую среду. Использование отходов для энергетики позволит обеспечить местных потребителей относительно дешевым энергоресурсом и попутно решить задачи охраны окружающей среды. Особенно это актуально для России, где образуется значительный объем отходов [2], основная часть которых остается в местах их образования: отходы с/х — 150–200 млн т/год (по сухому веществу), лесного хозяйства — 150 млн м³/год, твердые бытовые отходы (ТБО) — 35–50 млн т/год, осадки сточных вод — 10–15 млн т/год

Существуют различные способы получения энергии из биомассы. Например, из биомассы, выращенной на поле площадью 1 га, можно по-

лучить разные виды топлива: биодизеля — 1180 л, биоэтанола — 1450 л, сингаза — 3100 л, биогаза — 10000 л. Если использовать их затем для производства электрической энергии, то можно получить соответственно: 27000 кВт·ч при себестоимости 8,3 цент/кВт·ч; 36000 кВт·ч (6,1 цент/кВт·ч); 75000 кВт·ч (5,0 цент/кВт·ч); 150000 кВт·ч (1,4 цент/кВт·ч) [3]. Таким образом, одной из относительно простых, недорогих и наиболее эффективных технологий является производство биогаза, содержащего 45–65 об. % метана.

Следует отметить, что приведенные данные справедливы для хорошо отлаженных процессов со стабильными характеристиками органосодержащего сырья. На практике не всегда удается оптимизировать процесс получения биогазов из-за многокомпонентности сырья, многостадийности процесса и других причин. Поэтому большое внимание уделяется поиску более эффективных методов интенсификации процессов разложения отходов. Могут быть использованы физические, химические и биологические методы. К наиболее часто применяемым физическим методам относятся дробление, а также температурное, паровое, ионизирующее воздействия. К химическим методам относится обработка кислотами (серная, фосфорная) и щелочами. К биологическим методам — воздействие специальных штаммов грибов и бактерий. Перечисленные методы дают хороший результат для однородной биомассы некоторых конкретных видов (растения, с/х отходы, осадки и илы). Так, при обработке биопрепаратами растительной биомассы в зависимости от ее состава увеличение количества биогаза может составить от 3 до 35 %. Соответственно увеличение выхода мета-

на при паровой обработке будет от 4 до 65 %, ультразвуком — от 14 до 82 %, кислотами — от 7 до 16 %. Проводятся исследования по обработке трудноразлагаемых фракций отходов ТБО бактериальными штаммами и ультразвуком. Можно отметить, что обработка отходов сельского хозяйства бактериальными штаммами, а осадки, ила — ультразвуком уже имеет промышленное применение [4].

Однако эти методы трудно реализовать в условиях полигонов ТБО из-за большого объема свалочных масс, неоднородности морфологического состава, разной степени разложения, воздействия внешних факторов, значительных размеров полигонов и т. д. Для условий полигонов ТБО реальным методом интенсификации процессов разложения отходов является организация рециркуляции очищенного фильтрата (промывка отходов), а также аэрация свалочных масс. При подаче очищенного фильтрата в тело полигона процессы биоразложения ускоряются, срок разложения отходов с 80–100 лет может сократиться до 10–15 лет. В этом случае основной объем биогаза выделяется за короткий промежуток времени, что повышает эффективность его использования. При аэрации тела полигона совместно с рециркуляцией очищенного фильтрата

срок разложения отходов может сократиться до 6–8 лет, но при этом в основном будет наблюдаться эмиссия углекислого газа [5], а энергетический потенциал отходов не используется.

Следующей задачей является создание эффективных систем очистки биогазов [6], так как наряду с метаном они содержат балластную примесь — CO_2 (30–40 об. %), токсичные примеси и другие загрязняющие вещества. Ввиду большого содержания в биогазе разнообразных примесей (см. таблицу), нестабильности состава во времени его очистка представляет сложную задачу, требующую применения комбинации различных методов, что приводит к ее удорожанию.

На рис. 1 показана последовательность удаления из биогаза основных примесей.

Прежде всего удаляются сероводород и углекислый газ, так как первый является токсичным, а второй — негорючий, т. е. балластный, к тому же может вызывать коррозию деталей энергетических установок. Кроме того, как правило, биогаз подвергается сушке для удаления влаги. Во время этих операций удаляется и ряд микропримесей. Это позволяет выделить из биогаза метан высокой чистоты для дальнейшей подачи в газовые сети.

Таблица 1

Состав биогазов

Компонент	Отходы с/х	Осадки сточных вод	ТБО	Природный газ
Метан	50–70 %	55–65 %	45–55 %	93–98 %
Углекислый газ	25–40 %	30–40 %	30–40 %	1 %
Азот	< 3 %	< 4 %	5–15 %	1 %
Сероводород	до 4000 ppm	до 1000 ppm	50–300 ppm	—
Аммиак	70 ppm	—	—	—
Силоксаны	Следы	< 6 мг/м ³	—	—

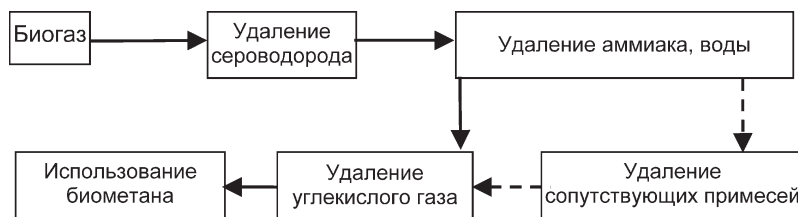


Рис. 1. Схема очистки биогаза от примесей

О состоянии этой проблемы можно судить по тому, что при наличии в странах Евросоюза порядка 10 тысяч различных биогазовых установок эксплуатируется менее 100 установок по очистке биогаза [7]. Имеющийся разрыв в количестве установок, генерирующих биогаз и его очищающих, обусловлен дороговизной последних. В настоящее время вопросу создания эффективных систем очистки биогазов в Евросоюзе уделяется большое внимание, так как поставлена задача к 2020 году уменьшить на 20 % потребление российского природного газа, заменив его биогазом.

При решении задачи очистки биогаза открывается перспектива использования его вместо природного газа — основного сырья для получения водорода. Биогаз можно получить практически везде, так как органосодержащие отходы постоянно образуются в процессе хозяйственной деятельности человека, между тем ресурсы природного газа ограничены, а его использование лимитировано. Это пока шаг в будущее, так как технологии получения водорода из отходов являются дорогостоящими, но делать этот шаг нужно сегодня, потому что создан определенный технологический задел по ключевым звеньям получения водорода из биогазов. Открывается возможность его широкого использования в системах автономного энергоснабжения потребителей с применением низкотемпературных топ-

ливных элементов для получения электрической и тепловой энергии, имеющих значительно более высокий КПД по сравнению с тепловыми установками при практическом отсутствии вредных выбросов. Отработка новых технологий требует проведения лабораторных экспериментов, позволяющих с использованием относительно недорогого оборудования изучать сложные процессы биоэнергетической конверсии органосодержащего сырья.

В СПбГПУ разработана методика многостадийного лабораторного эксперимента (рис. 2). На первом этапе исследований производится предварительная оценка биогазового потенциала отходов с использованием системы OxiTor, позволяющей определить содержание органического углерода в исследуемом субстрате, а также выход биогаза на единицу его массы. Следующим этапом является оценка и прогноз динамики образования биогаза с использованием комплекса «Биореактор», который соответствует уровню международных требований по оборудованию и применяемым методикам [8]. На третьем этапе проводятся исследования по энергетическому использованию биогаза с помощью нового лабораторного комплекса, созданного при участии ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН [9]. Комплекс состоит из следующих

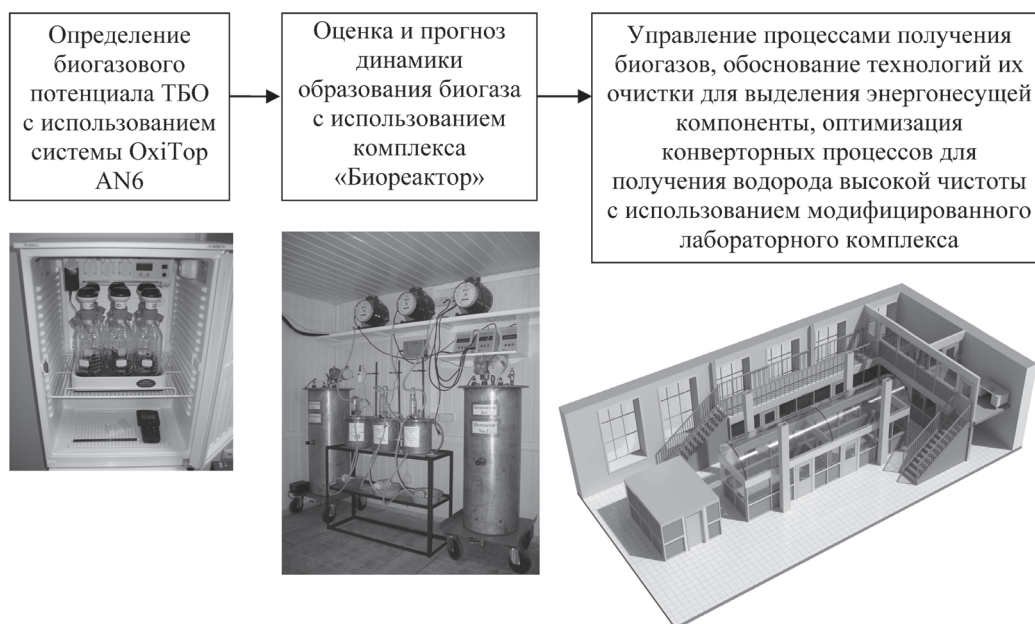


Рис. 2. Многостадийный лабораторный эксперимент

модулей (рис. 3): генерации биогаза, его аккумуляирования и очистки, реформинга метана с получением водорода и топливного элемента. В биореакторы закладываются модельные образцы отходов, получаемый биогаз подается в модули очистки, где из него выделяется метан (более 95 об. %), из которого в топливном процессоре получается водород высокой чистоты для дальнейшей подачи в низкотемпературный топливный элемент с полимерной мембраной FC50. Электрический КПД этих элементов достигает 45 %. Приведем основные технические характеристики топливного элемента:

Расчетная развиваемая (выходная) мощность	40 Вт
Максимальная развиваемая (выходная) мощность	~ 50 Вт
Напряжение открытого контура	~ 9 В
Ток при номинальной мощности	8 А
Напряжение при номинальной мощности	5 В
Максимальный ток	10 А
Потребление водорода при расчетном выходе	~ 580 нмл/мин
Температура:	
рабочая	50 °С
при запуске	45 °С

Одним из ключевых модулей комплекса является реформер производительностью до 60 литров водорода в час, реализующий технологию высокотемпературной адсорбционной очистки с термической регенерацией поглотителя. Реформер состоит из двух адсорбционно-каталитических модулей, работающих в периодическом режиме. Смесь метана с водяным паром конвертируется и проходит предварительную очистку на указанных модулях, после чего поступает на дополнительную очистку от СО в метанатор. Рабочая температура адсорбционно-каталитических модулей составляет 600–850 °С, а метанатора — 250 °С. Основные технические характеристики реформера:

Номинальная производительность по водороду	10 нсм ³ /с
Рабочее давление метана	1,3 атм. изб.
Давление водородсодержащего газа	0,6 атм. изб.
Влажность водородсодержащего газа (абсолютная)	< 5 %
Объемная доля водорода	> 96 %

Схема блоков реформера приведена на рис. 4. Экспериментально подтверждено стабильное получение водорода высокой чистоты (98,5 об. %) при подаче биометана (95 об. %) в широком диапазоне нагрузок реформера (30–

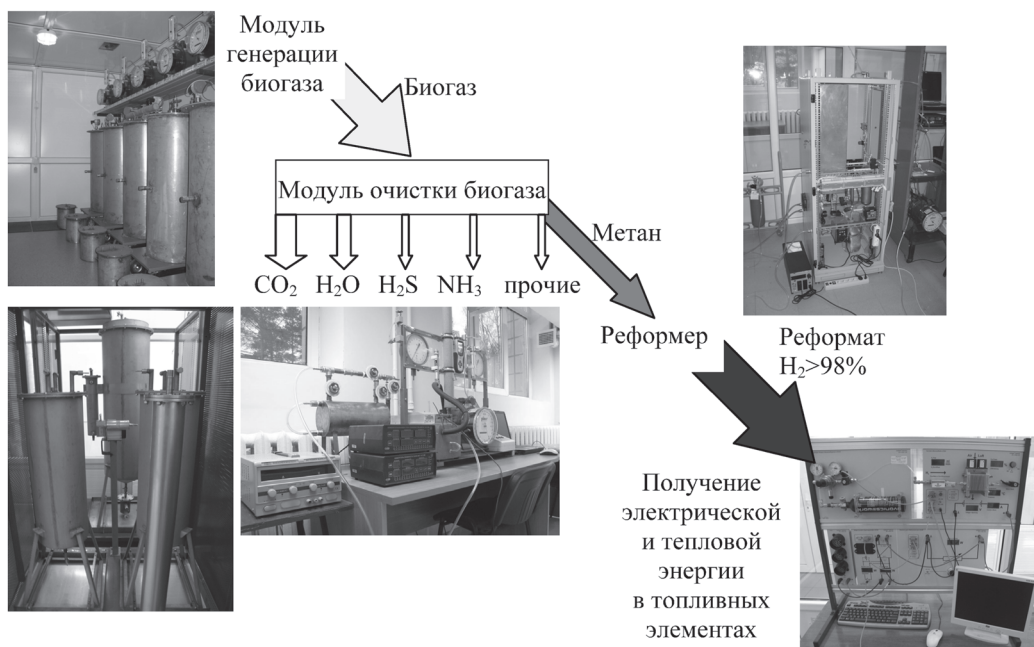


Рис. 3. Состав модулей лабораторного комплекса

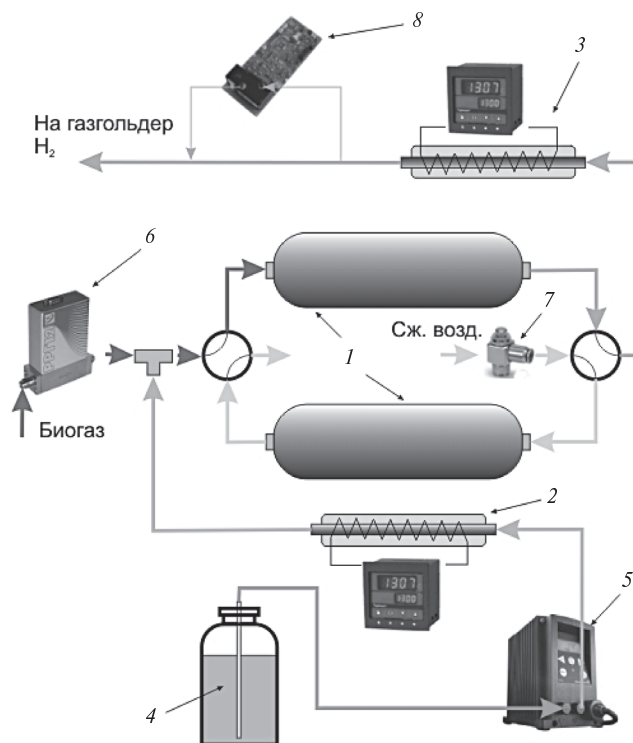


Рис. 4. Схема реформера:

1 — адсорбционно-каталитические модули; 2 — испаритель с регулятором температуры; 3 — метанатор; 4 — дистиллят;
5 — жидкостный насос; 6 — регулятор расхода газа;
7 — дроссель газовый; 8 — контроль концентрации метана

100 % от номинальной). Содержание CO в реформате составляет менее 10 ppm, соответственно CO₂ — менее 270 ppm [10]. Концентрация примесей определялась при помощи ИК Фурье-спектрофотометра ФСМ1202. Были так же проведены эксперименты при подаче в реформер «слабого» биогаза, содержащего 30–45% об. метана. При этом концентрация водорода в реформате оставалась высокой (более 93 об. %) (рис. 5). Это расширяет возможности использования в автономной энергетике значительного потенциала «слабых» биогазов с относительно невысокой концентрацией органосодержащей компоненты для получения электрической и тепловой энергии. Кроме водорода в реформате зафиксировано содержание до 2 об. % метана.

Низкое содержание остаточного метана открывает возможность прямого использования реформата в топливном элементе, что позволит отказаться от дорогостоящих технологий его очистки.

В СПбГПУ создан не имеющий аналогов лабораторный комплекс, позволяющий моделировать все стадии процесса от получения биогаза из органосодержащих отходов с дальнейшей его конверсией в водород до работы топливного элемента, оснащенный современным оборудованием. Произведено тестирование основных элементов комплекса, показавшее их работоспособность и безопасность. В настоящее время разрабатываются учебные программы по использованию оборудования в образовательном процессе при подготовке студентов и аспирантов.

Следующим этапом развития комплекса планируется создание действующего макета интегральной энергосистемы энергоснабжения индивидуального дома. В качестве источника энергии будет использоваться водород, получаемый из биогаза, а так же возможно использование и других, например фотоэлектрических, модулей. Целью создаваемого макета автономной энергосистемы является не только получение

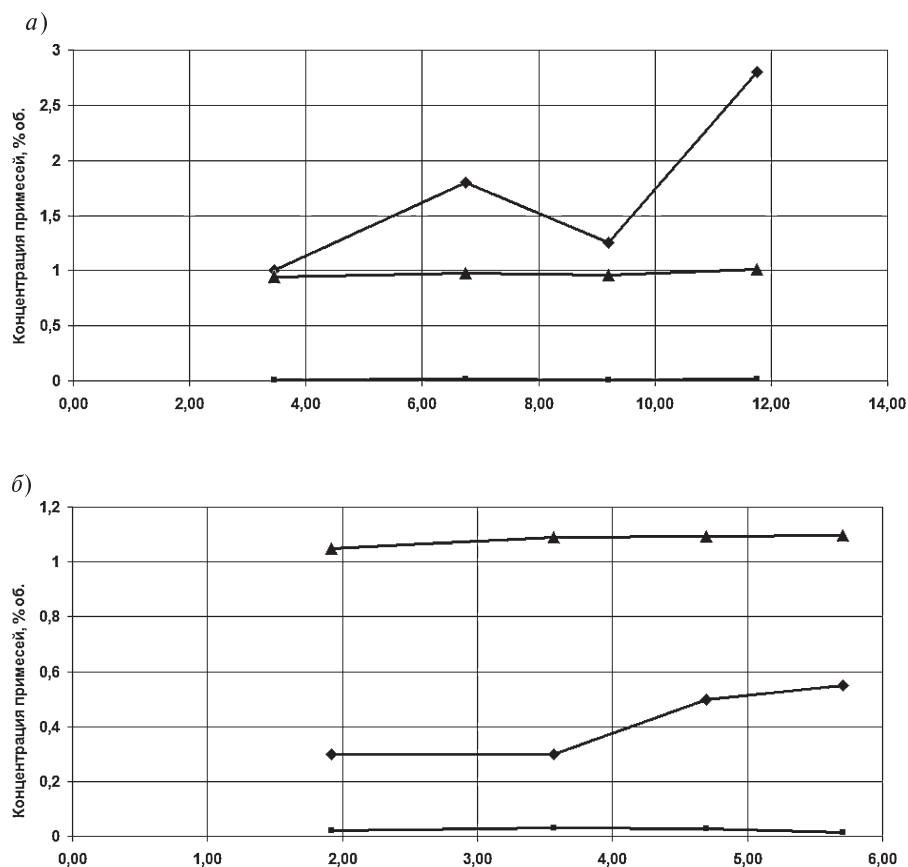


Рис. 5. Концентрация примесей

(—♦— метан; —■— углекислый газ; —▲— пары воды) в получаемом газе:

a — расход получаемого газа, см³/с (содержание водорода более 98%).

Исходная смесь: CH₄ = 94,8 %; CO₂ = 5,2 %;

б — расход получаемого газа, см³/с (содержание водорода более 93%).

Исходная смесь: CH₄ = 44,6 %; CO₂ = 40 %; N₂ = 15,4 %

энергии, но и ее эффективное использование за счет применения энергосберегающего оборудования и технологий, систем управления нагруз-

кой, а так же современных материалов и конструкций. Мощность электрооборудования такого дома ориентировочно не превысит 2 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Energy Outlook [Текст] / ISBN 978-92-64-08624-1.— 2010.— 736 p.
2. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) [Текст] / Под ред. Безруких П.П. — М.: «ИАЦ Энергия», 2007.— 272 с.
3. Thrän, D. Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie / D. Thrän, M. Seiffert, F. Müller-Langer [и др.] // Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE), Leipzig.— 2007. №16/44 Jan. 141 s.
4. Möglichkeiten zur Verbesserung der Gasausbeute aus Gdrrohstoffen [Электронный ресурс] / Hopfner-Sixt K., Amon T., Bauer A. [и др.] // <http://energytech.at>, 2007.
5. Ritzkowski, M. Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills [Текст] / M. Ritzkowski, K.-U. Heyer, R. Stegmann // Waste Management 26, 0956-053X. Elsevier Ltd. 2006. Vol. 4. P. 356–372.
6. Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung [Текст] / Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, ISBN 3-00-014333-5.— 2006.— 232 s.
7. Beil, M. Biogasaufbereitung in Deutschland und Europa — ein Blick über den Tellerrand [Текст] / M. Beil, U. Hoffstede, U. Klaas / DVGW energie|wasser-praxis.— 2009. № 1.— S. 44–49.



8. **Федоров, М.П.** Углеродные инвестиции в энергетическое использование полигонов ТБО / М.П. Федоров, В.В. Кораблев, В.И. Масликов, Е.О. Иокша // Экология и жизнь : научно-популярный и образовательный журнал.— 2008. № 4(77) .— С. 16–22.

9. **Федоров, М.П.** Разработка и создание экспериментального комплекса по оптимизации конверторных процессов получения водорода из биогазов органосодержащих отходов / М.П. Федоров

[и др] // «Физические проблемы водородной энергетики» 6-я Российская конференция.— 2010. — С. 117–118.

10. **Lysikov, A.I.** Novel approach for municipal solid waste biogas reforming into hydrogen for fuel cell powered generators [Текст] / A.I. Lysikov, A.G. Okunev, D.V. Molodtsov, V.I. Maslikov // XIX International Conference of Chemical Reactors «Chem-reactor-19» Vienne, Austria.— 5–9 September 2010. P. 192–193.

УДК 621.438

В.А. Рассохин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Энергетика, сформировавшаяся как ведущая отрасль промышленности примерно сто лет тому назад, прошла сложный путь развития, как и многие другие отрасли. Сначала были созданы отдельные агрегаты небольшой мощности, затем, когда стали вполне очевидными все преимущества использования электрической энергии, мощность создаваемых установок постоянно увеличивалась, а сами установки объединялись уже в энергосистемы. При такой централизации показатели эффективности и надежности установок неуклонно повышались как в зарубежной, так и в советской (ныне российской) энергетике [1].

В последние годы в энергетике России наметились тенденции к использованию децентрализованного производства тепла и электроэнергии в самых различных сферах хозяйственной жизни страны [2]. Это обстоятельство обусловлено рядом причин, немаловажной из которых является чрезвычайно большая доля физически и морально устаревшего энергогенерирующего оборудования на крупных тепловых и гидравлических электростанциях страны. Так, по прогнозам Минпромэнерго к 2010 году должно было выработать свой ресурс не менее 50 % установленной мощности на ТЭС и ГЭС, а к 2020 году эта цифра может вырасти и до 70 % [3]. Модернизация электрического хозяйства и ввод в эксплуатацию новых мощностей не успевают за ро-

стом темпов потребления электроэнергии. Все это крайне негативно сказывается на надежности поставок электрической и тепловой энергии различным ее потребителям. Так, энергетическая авария в Москве в мае 2005 года, обусловленная выходом из строя электроподстанции «Чагино», показала полное отсутствие взаимодействия между генерирующей и сетевой компаниями «Мосэнерго». Каскадные отключения электроэнергии в городе привели к тому, что треть столицы и 24 города Московской области остались без электричества. Вместе с тем до половины возникшего дефицита электроэнергии можно было бы оперативно перебросить с недогруженных атомных электростанций в центре России, но вследствие узковедомственных интересов и общей безответственности это не было сделано [3]. Переход на локальные газовые электростанции — это прогрессивное решение проблемы энергоснабжения, сокращение сроков ввода новых мощностей и расходов на строительство ЛЭП, уход от неэффективного инвестирования крупных долгосрочных проектов. Выбор природного газа в качестве энергоносителя для двигателей оправдывается его приемлемой ценой на внутреннем рынке, к тому же он обладает существенным экологическим преимуществом по сравнению с твердым и жидким топливами.

Роль децентрализованной энергетики в мировой энергетической безопасности

На энергообъекте большей мощности себестоимость производства и электроэнергии, и тепла (а следовательно, и срок его окупаемости) ниже, чем на небольших станциях и котельных. Но протяженность инженерных сетей, необходимых для транспортировки тепла и электроэнергии к месту потребления, — значительная. Это обстоятельство приводит к весьма значительной доле капитальной составляющей в себестоимости производства тепла и электроэнергии. По этой причине государству, которое является собственником крупных сетей, все труднее поддерживать генерирующие мощности и распределительные сети в исправном состоянии. Все это приводит к неуклонному росту цен на электроэнергию и тепло, получаемые от объектов их централизованного производства [1].

Решение этой проблемы многие специалисты видят в создании новых локальных, автономных и распределенных систем генерации электричества и тепла. При этом самостоятельные энергоисточники — это не альтернатива энергосистеме, они лишь дополняют ее, повышая надежность энергоснабжения потребителей. Использование котельных или электростанций малой мощности для небольших предприятий или нескольких жилых зданий не требует больших и разветвленных теплотрасс и электросетей, но при этом необходимо создать широкую сеть трубопроводов для подвода топлива [3].

Необходимо широкое внедрение технологий, позволяющих увеличивать производство электроэнергии при существующем тепловом потреблении, что возможно, например, за счет применения энергоисточников малой и средней мощности. В этом случае промышленные и отопительные котельные будут утилизировать выхлопные газы двигателей.

На Западе трудно найти предприятие без резервного электроисточника, так как всеобщая компьютеризация делает практически любую трудовую деятельность зависящей прежде всего от стабильного энергоснабжения. В Израиле, например, такими автономными источниками энергии обеспечиваются все жилые дома, имеющие более четырех этажей. Эту практику вводят и европейские страны. Западные специалисты высказывают предположение, что автономные

электростанции и локальные энергетические сети будут объединены в единую мировую систему (по типу интернета), что не исключает их автономной работы в своем регионе.

Эффективность использования автономных энергетических установок малой мощности определяется следующим:

- снижением удельной себестоимости производства электроэнергии и тепла за счет использования более совершенного оборудования;

- повышением надежности энергоснабжения;

- существенным сокращением сроков их сооружения;

- независимостью режима работы от энергосистемы;

- снижением масштабов отчуждения территории под крупное энергетическое строительство;

- возможным повышением экологичности производства электроэнергии и тепла, снижением затрат на охрану окружающей среды.

Этот класс установок должен быть ориентирован на широкую гамму топлив (многоотопливность): жидкое, газообразное, твердое и др.

Принципиально в качестве автономных могут быть применены теплоэнергетические установки с различными типами агрегатов: двигателями внутреннего сгорания; паровыми и газовыми турбинами и их комбинациями.

Каждый из этих типов может оказаться рациональным для той или иной конкретной области применения и типа топлива. В некоторых случаях речь может идти о применении различных агрегатов одного и того же типа для привода разных устройств. Из этого вытекает требование многоцелевого назначения автономных энергетических установок. При этом необходима широкая унификация энергоагрегатов.

К автономным энергетическим установкам должно быть предъявлено требование комплектности и блочной поставки, а следовательно, необходимость создания малогабаритных турбин, котлов, конденсаторов, камер сгорания, насосов и теплообменного оборудования.

Разрабатываемые автономные энергетические установки должны работать с минимальными вредными выбросами в окружающую среду за счет применения оригинальных технологий сжигания, что обеспечивает экологическую безопасность теплоэнергетических агрегатов.

Практически всем перечисленным выше требованиям в полной мере удовлетворяют так на-



зываемые микротурбинные энергетические установки, появившиеся на рынке энергогенерирующего оборудования не более двадцати лет тому назад [4]. КПД производства электроэнергии микротурбинными установками составляет 15–20 % (когенерационные установки без регенератора для получения большого количества тепла) и 25–30 % (установки с регенерацией тепла).

Устройство и принцип работы микротурбинных установок

Микротурбина — это высокооборотная газовая турбина, в чьей камере сгорания сжигается природный или какой-либо иной газ, выполненная в виде конструкции с одной движущейся (вращающейся) деталью — неразъемным ротором, на котором соосно расположены электрический генератор, центробежный компрессор и центростремительная радиально-осевая турбина. Она представляет собой тепловой двигатель, в котором реализуется рабочий процесс (цикл) ГТУ с регенерацией.

Принцип работы микротурбинной установки следующий (рис. 1):

Очищенный в фильтре атмосферный воздух попадает в воздухозаборник 4, откуда подается на вход в компрессор 3. В компрессоре 3 воздух сжимается и в результате сжатия одновременно нагревается. После компрессора сжатый воздух еще дополнительно подогревается в специальном газоздушном теплообменнике 10 (регенератор).

Использование регенеративного подогрева позволяет примерно в два раза повысить электрическую эффективность установки. Затем нагретый сжатый воздух перед камерой сгорания бсмешивается с газообразным топливом 9 и го-могенная газоздушная смесь подается через горелку в камеру сгорания для сжигания. Такое предварительное смешение воздуха с газообразным топливом позволяет снизить уровень эмиссии вредных веществ в выхлопных газах до 25 ppm (в пересчете на 15 % содержания кислорода в выхлопных газах) при 100 % электрической нагрузке и практически до 0 при нагрузках менее 50 %.

Нагретый в камере сгорания газ поступает в рабочее колесо турбины 7 (где, расширяясь, совершает полезную работу, приводя его в движение), а также в колесо компрессора 3 и высокооборотного генератора 2. Выходя из турбины 7, по газоходу 8 выхлопные газы попадают в реге-

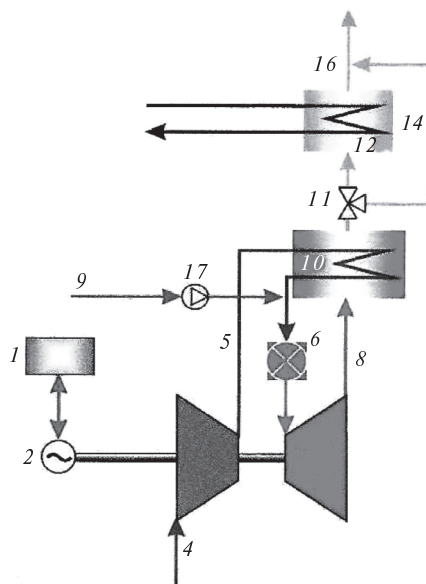


Рис. 1. Функциональная тепловая схема автономной микротурбинной установки типа TA-100 RCHP компании Elliott Energy Systems:

1 — силовая электроника; 2 — генератор; 3 — воздушный компрессор; 4 — воздухозаборник; 5 — воздуховод между компрессором и рекуператором; 6 — камера сгорания; 7 — турбина; 8 — газоход между турбиной и рекуператором; 9 — подвод природного газа; 10 — рекуператор; 11 — байпасная заслонка; 12 — котел-утилизатор; 13 — выход горячей воды; 14 — байпасный газоход; 15 — вход холодной воды; 16 — выхлопной тракт

нератор 10, где отдают часть своего тепла сжатому после компрессора воздуху.

На выходе из регенератора 10 установлена байпасная заслонка 11, которая направляет выхлопные газы либо по байпасному газоходу 14, либо напрямую в котел-утилизатор 12. В котле-утилизаторе (газозводяной теплообменник) выхлопные газы отдают свое тепло сетевой воде, которая там нагревается до требуемой температуры.

Типичное устройство установки с микротурбиной (на примере установки компании Elliott Energy Systems модели TA-100 RCHP) представлено на рис. 2. Эта установка представляет собой агрегат полной заводской готовности с котлом-утилизатором, вспомогательными системами и устройствами, смонтированными на единой пространственной раме. Для защиты от внешних атмосферных воздействий используется защитный капот со звукоизолирующим

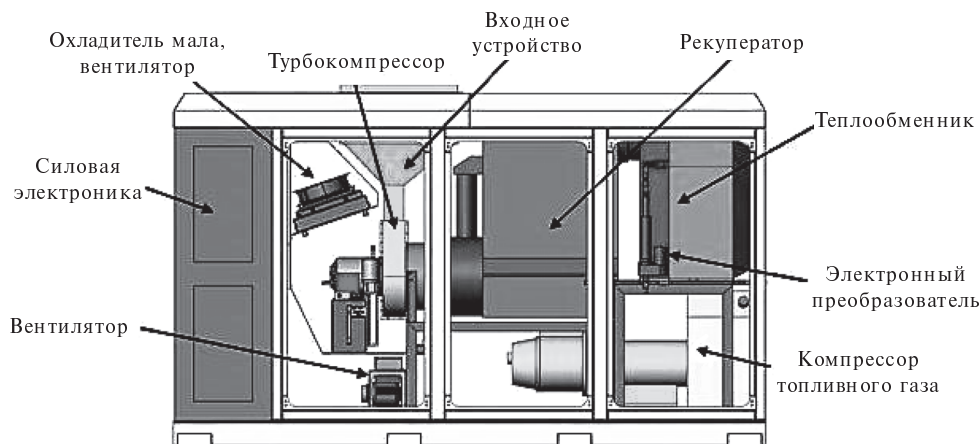


Рис. 2. Компоновка агрегатов автономной микротурбинной установки типа TA-100 RCHP компании Elliott Energy Systems

покрытием. Все агрегаты под капотом, нагревающиеся в процессе эксплуатации установки, закрыты теплоизолирующими чехлами. Данная установка изготавливается в двух вариантах исполнения: для эксплуатации внутри и снаружи помещений. В состав установки входят: турбогенератор, камера сгорания, регенератор, котел-утилизатор, дожимной газовый компрессор, силовая электроника (выпрямитель, инвертор, фильтр), воздушная система охлаждения силовой электроники и дожимного компрессора, воздушная система охлаждения радиатора масляной системы и котла-утилизатора, цифровая система автоматического управления и панель управления оператора, аккумуляторные батареи с зарядным устройством.

Ведущие мировые производители микротурбинных установок

Одним из мировых лидеров в разработке и производстве микротурбин является компания Elliott Energy Systems (г. Стюарт, штат Флорида, США). Основная продукция Elliott — микротурбинные установки мощностью до 100 кВт в различных вариантах исполнения [5]. Микротурбинные энергоустановки компании Elliott производит с 1995 года. В настоящее время это модели:

электростанция TA-100 R с выработкой только электроэнергии мощностью 100 кВт;

когенерационная установка TA-100 RCHP электрической мощностью 100 кВт и тепловой мощностью 172 кВт;

электростанция TA-100 R в кожухе из нержавеющей стали для эксплуатации на морских газодобычных платформах.

TA-100 RCHP — это агрегат полной заводской готовности.

Микротурбина TA-100 RCHP в целом работает в автономном (островной) режиме или параллельно с сетью как по электрической, так и по тепловой (холоду) энергии. В параллель может работать до 10 агрегатов. В конструкции турбины отсутствует редуктор, поэтому частота вращения ротора изменяется от 33 000 до 69 000 об/мин в зависимости от величины нагрузки. В связи с этим вырабатываемое высокочастотное напряжение подвергается двойному преобразованию: из высокочастотного переменного в постоянное, а затем в переменное 380, 400 или 480 В с частотой 50 или 60 Гц.

В конструкции TA-100 RCHP отсутствуют несбалансированные части, поэтому работа установки отличается практически полным отсутствием вибраций и низким уровнем акустического шума.

Важный игрок на рынке производства микротурбинных установок — компания Ingersoll, энергетические микротурбинные установки которой имеют мощность 70 и 250 кВт. Отличительная особенность установки мощностью 70 кВт — наличие двух турбин (для привода компрессора и силовая турбины). При этом силовая турбина соединена с электрогенератором через редуктор, что позволило использовать в этой установке стандартный низкооборотный генератор со скоростью вращения 1500 (1800) об/мин.



В установках компании Ingersoll мощностью 70 и 250 кВт применены подшипники качения на жидкой смазке с шариками, а также керамическое рабочее колесо турбины, что является характерной особенностью конструкции для компании Ingersoll. Благодаря усовершенствованной керамике типа кремниевого нитрида (Si_3N_4 Ceramics), микротурбина может работать с более высокими температурами, чем микротурбина из металлических сплавов. Сказанное приводит к экономии топлива и понижению выброса NO_x .

Таким образом, использование керамики позволяет иметь температуру газа перед турбиной 925°C , что обеспечивает высокий (32 %) КПД и достаточно продолжительный (80000 часов) ресурс установки. Недостатком установок компании Ingersoll можно считать увеличенные габариты.

Фирма Turbес, появившаяся на рынке микротурбинных установок в 1999 году, выпускает микротурбинную энергетическую установку электрической мощностью 100 кВт. Отличительная особенность установки — использование единого высокоскоростного ротора, объединяющего радиальную турбину, центробежный компрессор и компактный высокооборотный электрогенератор на постоянных магнитах. Отсутствие редуктора между турбогруппой и генератором существенно уменьшило вес и повысило надежность всей установки. В роторе использованы подшипники качения, требующие минимального расхода жидкой смазки — 9 литров на 6000 часов работы.

Скорость вращения ротора рассматриваемой установки компании Turbес составляет 70000 об/мин; степень сжатия в компрессоре равна 4,5; температура газа перед турбиной — 950°C . Важное место в конструкции микротурбинной установки занимает регенератор, рассчитанный на входную температуру газа 650°C , что позволяет иметь КПД установки на уровне 30 %.

Признанным лидером в разработке и производстве микротурбин на сегодняшний день по многим показателям является фирма Capstone Turbine Corporation (США), выпускающая установки мощностью 30, 65 и 200 кВт [6]. В 1998 году Capstone первой предложила коммерческий продукт, основанный на микротурбинной технологии, — результат десятилетних усилий коллектива разработчиков. Компания Capstone совместно со своими партнерами уже установила более 3000 микротурбинных систем по всему миру.

Фирма Capstone достигла значительного успеха в обеспечении эффективного сгорания топлива и минимального уровня выбросов NO_x за камерой сгорания. Успех основывался на использовании современных достижений в области теории горения. В частности, Capstone совершенствовала конструкцию топливных инжекторов, обеспечивающих необходимую подачу топлива в камеру сгорания.

Для установок Capstone система утилизации тепла уходящих газов после рекуператора в течение ряда лет была дополнительной — в минимальный набор поставки она не входила. Со временем Capstone разработала такую систему, основанную на газо-водяном подогревателе.

На мировом рынке микротурбинных установок имеются изделия и таких компаний, как Nissan, выпускающая установки мощностью 2,6 кВт, Toyota с установками мощностью 50 и 300 кВт, Bowmen, выпускающая микротурбинные установки типа TG80CG мощностью 80 кВт, и т. д.

Правовые и экономические аспекты

Во многих странах на законодательном уровне поддерживается развитие распределенных систем генерации в дополнение к существующим централизованным системам. В США, например, приняты законы, освобождающие владельцев автономных источников энергии от налогов, а также обязывающие энергетические компании покупать у них излишки электроэнергии по выгодным ценам. В Великобритании владельцам малых электростанций возвращается часть налогов. Определены компенсации и льготы владельцам малых установок в Германии. В Индонезии и Сингапуре действуют программы поддержки независимых энергопроизводителей.

Даже на Украине в принятом законе об электроэнергетике определен статус «независимого» производителя электроэнергии, в соответствии с которым владелец энергомощностей до 5 МВт беспрепятственно допускается к сети, у него покупаются все излишки электроэнергии. Вырабатываемую энергию мощностью до 20 МВт можно продавать по прямым договорам с потребителями, оплатив при этом только сетевую составляющую тарифа, а мощность свыше 20 МВт должна продаваться на оптовом рынке.

В 2000 году Министерством энергетики США (DOE) была разработана рассчитанная на 2000–2006 годы общегосударственная програм-

ма и объявлен конкурс на создание прорывных технологий в области микротурбинных установок. Только правительственные инвестиции на реализацию этой программы составили 60 млн долл., еще такой же объем планировалось получить со стороны частных инвесторов. В задачу указанной программы входило руководство всей общегосударственной работой по проектированию, изготовлению, испытанию и опытно-промышленному освоению нового поколения микротурбинных установок, которые должны быть более экономичны по топливу, более чисты в отношении загрязняющих выбросов, более приспособлены к различным сортам топлива, более долговечны и надежны, более дешевы по сравнению с их поколением, существовавшим на момент опубликования данной программы. При этом разрабатываемые микротурбинные установки должны были удовлетворять следующим основным требованиям: электрический КПД — не менее 40 %; содержание NO_x в отработавших газах (при работе на природном газе) — не более 10 ppm; срок службы — не менее 45000 часов; ресурс до капитального ремонта не менее 11000 часов; стоимость оборудования — не более 500 \$/кВт; стоимость электроэнергии должна находиться на уровне ее стоимости в сетях энергосистем.

Себестоимость производства электроэнергии микротурбинными установками оказалась примерно в 2,5–3,0 раза ниже ее стоимости при покупке от крупной электросети. Были отмечены вполне удовлетворительное техническое сопровождение и правовая поддержка со стороны поставщиков приобретенного микротурбинного оборудования.

Что же касается экономических и правовых аспектов использования автономных энергетических установок малой мощности в Российской Федерации, то, по-видимому, здесь прежде всего следует начать с получения достоверных статистических данных о масштабах их использования в нашей стране. По-прежнему остается крайне низким качество статистических данных по России о вводимых в эксплуатацию энергогенерирующих установках малой мощности, что, по-видимому, может быть объяснено следующими причинами. Прежде всего, достаточно большое количество установок приобретается уже взамен существующих для модернизации и реконструкции действующих малых ТЭС, как муниципальных, так и производственных. Да-

лее, значительное количество реализуемых установок приобретается в качестве резервных, в том числе и в районах коттеджной застройки, для предприятий мобильной связи, котельных и т. п. И, наконец, не все реализуемые в России электрогенераторы учитываются отечественной статистикой. Так, действующими формами статистического наблюдения за электроэнергетикой страны достаточно полно отслеживаются электростанции мощностью от 500 кВт и выше, значительно хуже — электростанции меньшей мощности, особенно находящиеся на балансе неэнергоснабжающих организаций. Руководители же малых предприятий и индивидуальные предприниматели вообще не предоставляют каких-либо энергетических данных в органы государственной статистики. Следовательно, большое количество установок по производству электроэнергии малой мощности для государственной статистики остается ненаблюдаемым [6].

Микротурбинные технологии на Российском рынке

Российская энергетика вступила в полосу перемен, и от того, насколько успешно они будут проходить, зависит и развитие экономики в целом. Тот огромный дефицит электроэнергии, о котором пишут, пока не наступил, но перебои в обеспечении потребителей становятся все более частыми. Всем памятные энергетические кризисы в Краснодарском крае и на Дальнем Востоке. Даже космодром «Плесецк» и комплекс управления МКС бывают ограничены в подаче электроэнергии.

Вместе с тем программа реформирования РАО «ЕЭС России» вызывает серьезные опасения у потребителей электроэнергии, так как при этом появляется несколько функциональных монополистов: администратор торговой системы, системные операторы, федеральная и региональные сетевые компании, оптовые генерирующие компании, а также сбытовые фирмы.

В результате реформирования в 1990-х годах РАО ЕЭС потеряло рынок тепловой энергии: выросло число мелких низкоэкономичных котельных, значительно снизился отпуск тепла большими электростанциями. Совместная выработка электрической и тепловой энергии на ТЭЦ составляет теперь менее 50 %, а структура постоянных затрат на ее производство не изменилась. Учитываемая перекрестное субсидирование, доля затрат на



электрическую энергию в продукции предприятий превышает нормативы, в итоге делая эту продукцию неконкурентоспособной.

По-видимому, в современных экономических условиях альтернативы использованию малой энергетики для скорейшего решения насущных экономических задач не существует. Возможность ее широкого применения в России обусловлена климатическими условиями и большими территориями с размещением основных топливно-энергетических ресурсов в малонаселенных регионах. Рост производства автономных источников электроэнергии позволит удовлетворять возрастающие требования к качеству и надежности энергоснабжения.

При этом, развивая российскую малую энергетику, необходимо учитывать следующие аспекты:

сегодня в топливно-энергетическом комплексе России две трети топлива затрачивается на производство тепла. Сжигать органическое топливо для производства только одного вида полезной продукции крайне неэффективно. Не используется высокотемпературный потенциал газового топлива. Его необходимо сжигать только в установках комбинированного производства тепла и электроэнергии, при этом важно приблизить источник к потребителю;

при разработке приоритетов для объектов малой энергетики необходим объективный сравнительный анализ различных технологий, типов энергоустановок в зависимости от требований к энергообъекту;

важнейшим условием успешного строительства объектов малой энергетики является объем и форма финансирования. А потому необходима разработка четкой схемы реализации проектов — от исследовательских работ до строительства и ввода в эксплуатацию, в том числе обучение персонала;

при выборе типа основного оборудования необходим учет условий и стоимости его обслуживания, гарантий поставщиков. Надо знать возможности различных производителей;

необходимо учитывать динамику изменения стоимости топлива и оборудования, тарифов на тепло и электроэнергию, инфляцию;

необходимо в случае определенных обстоятельств предусмотреть использование местного топлива: попутного газа, сырой нефти, бурого угля и т. д.

На начальном этапе разработки проектов необходимо провести исследовательские проектные работы. Они не требуют больших затрат, а экономический эффект — ощутимый.

В последнее время заметную роль в развитии малой энергетики стали играть и новые факторы, в частности некоторый экономический подъем в зонах централизованного энергоснабжения при наличии существенных инфраструктурных ограничений (отсутствие технологических возможностей подключения к уже имеющимся электрическим и тепловым сетям). Так, согласно данным Росгосстата в 2007 году в стране не удовлетворены заявки на подключение к электрическим сетям на общую мощность в 2300 МВт, что составило около 12,6 % от общей заявленной на подключение мощности. Наиболее сложная ситуация с подключениями складывается в Южном федеральном округе, где не было удовлетворено 28,9 % от заявленной на подключение мощности. Сложная ситуация с возможностью подключения к электросетям наблюдалась в Центральном и Сибирском федеральных округах, где не было удовлетворено соответственно 13,5 и 11,8 % от заявленной на подключение мощности.

Таким образом, развитие малой энергетики для России — это жизненно важный фактор, так как более 50 % территории страны не имеют связи с энергосистемой и надежное энергоснабжение может быть обеспечено только малыми ТЭЦ. Предприятия, выстроившие и отладившие технологические цепочки, понимают, что эффективность производства можно повышать, лишь установив собственные энергоисточники, — вступление в ВТО не за горами. Многие предприятия уже имеют собственные паросиловые, газопоршневые и газотурбинные электростанции. Их автономные электростанции вырабатывают от десятков кВт до нескольких десятков МВт электроэнергии и эксплуатируются в базовом режиме, но существуют серьезные проблемы во взаимоотношениях IPPs и энергосистемы по вопросу определения стоимости принимаемой в сеть электроэнергии.

На российском рынке автономных энергетических установок предлагаются к применению различные технологии для решения проблем тепло- и электроснабжения. Основные из них: газотурбинные и газопоршневые установки; дизельные, паротурбинные и ветроэнергетические установки; паровые и водогрейные котельные.

Они должны выбираться в зависимости от конкретных условий как наиболее оптимальный вариант с точки зрения затрат и сроков реализации проекта.

Как указывалось выше, основной причиной распространения малой энергетики стало хозяйственное освоение территорий, не охваченных еще централизованным тепло- и электроснабжением. А таких территорий, например, в Российской Федерации не менее 2/3 от ее общей площади. Снабжение топливом энергетических объектов, особенно в отдаленных регионах, — один из основных вопросов экономики страны. Следовательно, должен быть выбран наиболее эффективный вариант обеспечения их энергоресурсами. В любом случае необходимо подробное обследование и анализ энергетического состояния территории потребителя.

Так, например, создание фермерских хозяйств и коттеджных зон усилит потребность в сравнительно маломощных энергетических установках для привода электрических генераторов, насосов, компрессоров, различных машин и механизмов, для выполнения тех или иных сельскохозяйственных, бытовых и других технологических операций. Такие установки должны быть недорогими и доступными для приобретения широкому кругу представителей малого бизнеса. Потребность в таких автономных установках может оказаться значительной даже в районах с развитыми электрическими станциями, так как вряд ли целесообразно будет создавать в каждом фермерском хозяйстве свои трансформаторные подстанции и развитые сельские электрические сети.

К настоящему времени на российском рынке микротурбинных технологий производства тепла и электроэнергии представлены лишь три иностранные компании (Capstone, Turbec, Elliott). К середине 2006 года ими было поставлено в общей сложности более 60 установок, предназначенных для энергоснабжения самых различных объектов (см. таблицу).

Как указывается в работе [7], количество установленных микротурбинных установок в России к 2009 году составило (по отраслям): котельные — 20 ед.; жилые комплексы — 44 ед.; конторские здания — 18 ед.; промышленные предприятия — 13 ед.; медицинские учреждения — 1 ед. Также установлено, что средняя мощность ТЭЦ с микротурбинными установками

в России (550 кВт) существенно больше, чем за рубежом (200 кВт). Это прежде всего связано с тем обстоятельством, что российские установки практически все — автономные, тогда как большинство зарубежных микротурбинных установок работают параллельно с электрической сетью. Еще одно существенное отличие отечественных мини-ТЭЦ заключается в наиболее полном использовании энергии топлива (применение когенерации и тригенерации).

В работе [7] также представлен анализ опыта эксплуатации микротурбинных установок в России. Так, промышленная эксплуатация ГТУ, установленных на мини-ТЭЦ в автосалоне ГАЗ в Санкт-Петербурге (см. табл. 1), была начата в сентябре 2006 года, но уже через 5 дней (после 132 часов работы) автоматика установки выдала команду на отключение из-за прекращения подачи газа от газораспределительной сети. В случае такого аварийного отключения в рассматриваемой мини-ТЭЦ предусмотрен автоматический запуск резервного дизель-генератора, который обеспечивает аварийное электроснабжение объекта. После возобновления подачи газа установка была запущена вновь. Общая наработка аварийного дизель-генератора за все время эксплуатации ГТУ составила не более 6 часов. Средняя загрузка ГТУ составляла 45 кВт в рабочее и 10 кВт — ночное время.

В ноябре 2006 года была введена в действие вторая ГТУ. За два месяца работы средняя нагрузка в рабочее время составляла 50 кВт, с кратковременным возрастанием до 100 кВт и более, а в ночное время — 12 кВт. После резкого похолодания в середине зимы средняя нагрузка в дневное время возросла до 90 кВт, так что в течение всего зимнего периода покрытие тепловой нагрузки объекта осуществлялось в основном за счет утилизации тепла выхлопных газов ГТУ. Время работы пикового водогрейного котла за все это время составило около 60 часов. Суммарное же время наработки микротурбинных установок за 2007 год составило 11500 часов. В ходе первого технического обслуживания в соответствии с руководством по проведению регламентных работ каких-либо неисправностей обнаружено не было.

За 9 месяцев работы 2007 года рассматриваемые микротурбинные установки выработали 292570 кВт·час электроэнергии. При этом среднесуточная электрическая нагрузка была равна

Таблица 1

Использование микротурбинных установок иностранных компаний в России

Место установки	Объект установки	Дата установки	Производитель ГТУ	Тип ГТУ	Количество ГТУ	Вид топлива	Назначение агрегата
Ханты-Мансийск	Радиорелейная подстанция	2004	Capstone	C30	2	дизельное	Основное электроснабжение
Якутск	Предприятие торговли	2004	Capstone	C60 CHP	2	газ (дизельн.)	Основное тепло- и электроснабжение
Белгород	Отопительная котельная	2005	Capstone	C30 CHP	1	газ	Аварийное электропитание
С.-Петербург	Автосалон ГАЗ	2006	Elliott	TA-100 RCHP	2	газ	Основное тепло- и электроснабжение
п. Коробицыно Ленингр. обл.	Гостиничный комплекс	2006	Capstone	C60 CHP	30		Основное тепло- и электроснабжение
Магнитогорск	Предприятие торговли	2006	Capstone	C60 CHP	1	газ	Основное тепло- и электроснабжение
Зеленогорск	Отопительная котельная	2007	Elliott	TA-100 RCHP	15	газ	Основное тепло- и электроснабжение
Москва	Энергоцентр ЗАО «Аптеки 36,6»	2007	Capstone	C65 RCHP	12	газ	Основное тепло- и электроснабжение; кондиционирование
Москва	Жилищный комплекс	2008	Elliott	TA-100 CHP	10	газ	Основное тепло- и электроснабжение
Москва	Отопительная котельная	2008	Elliott	TA-100 CHP	1	газ	Собственные нужды

47 кВт, а тепловая нагрузка — около 100 кВт. Затраты на ЗИП составили 10400 руб, так что себестоимость электроэнергии оказалась равной 62 коп. за кВт·час.

Российские предприятия также ведут работы по созданию микротурбинных установок. Так, ОАО «Калужский двигательный завод» предлагает микротурбинную теплоэлектростанцию типа ТЭЦ-100/600 электрической мощностью 100 кВт и тепловой до 650 кВт в качестве пикового или же аварийного энергоисточника. ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» разрабатывает первую отечественную микротурбинную установку типа ГТЭ-0,1 мощностью 100 кВт на газодинамических подшипниках.

Начиная с 2007 года ООО Научно-технический центр «Микротурбинные технологии», ООО «Газпром Трансгаз — Санкт-Петербург» и кафедра турбинных двигателей и установок СПбГПУ совместно с ОАО Научно-производственное объединение «Центральный котлотурбинный институт» начали разработку серии малогабаритных установок с электрической мощностью от 20 до 500 кВт [8]. Одной из целей работы стало создание отечественной газотурбинной установки с электрической мощностью 100 кВт и характеристиками, близкими к характеристикам лучших зарубежных аналогов:

высокий КПД (преобразование топлива в электричество с КПД, превышающим 30 %);

максимальная защищенность окружающей среды — выбросы NO_x не более 7 ppm для микротурбин, использующих природный газ;

долговечность — расчетные 11000 часов эксплуатации между капитальными ремонтами и срок службы не менее 45000 часов;

относительная стоимость менее 500 долларов США за кВт установленной мощности; стоимость производимого электричества должна быть конкурентоспособной по сравнению с альтернативными источниками, существующими на рынке (включая электросеть);

должна быть предусмотрена возможность использования различных видов топлива, включая природный газ, дизельное топливо, этанол, газ из органических отходов и другое жидкое и газообразное биотопливо.

Для решения поставленной задачи были применены новые технические решения, нехарактерные для отечественной энергетики, позволяющие обеспечить основные требования к автономным энергетическим установкам и их широкое внедрение. К таким решениям относится использование: высокоэффективных радиально-осевых турбин; газодинамических подшипников; теплообменников с высокой степенью регенерации (0,9); высокооборотных электрогенераторов с преобразователями частоты; малотоксичных камер сгорания.

Тепловая схема газотурбинной установки приведена на рис. 3. Воздух из атмосферы через систему фильтров входного устройства 6 поступает в радиальный компрессор 2, где сжимается до необходимого давления и затем подается в теплообменник (рекуператор) 8. В теплообменнике происходит подогрев воздуха, после чего он поступает в камеру сгорания (КС) 7, в которой происходит процесс горения углеводородного топлива, поданного в КС. Продукты сгорания, имеющие высокую температуру, подводятся в радиально-осевую турбину 3, в которой вырабатывается полезная мощность.

Выходные газы после турбины отдают теплоту воздуху в теплообменнике и отводятся в выходное устройство. Для выработки тепловой энергии за турбиной может быть установлен теплофикационный котел 9, обеспечивающий горячим теплоносителем местного потребителя 11. Полезная мощность турбины передается в высокооборотный электрогенератор 1, в котором вырабатывается электрическая энергия. Эта электрическая энергия на выходе преобразователя 4 обеспечивает электрическое напряжение с необходимыми параметрами.

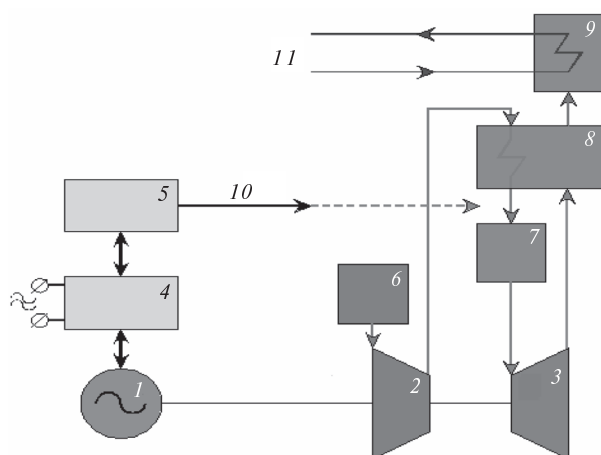


Рис. 3. Тепловая схема автономной микротурбинной установки типа МТГ-100



В настоящее время коллективы ООО Научно-технический центр «Микротурбинные технологии», ООО «Газпром Трансгаз — Санкт-Петербург» и кафедры турбинных двигателей и установок СПбГПУ ведут на кафедре ТДУ и на ГРС Сертолово широкомасштаб-

ные экспериментальные исследования микротурбодетандерного генератора МДГ-20. Эти работы позволят создать отечественную микротурбинную установку, способную конкурировать с лучшими аналогичными зарубежными установками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилевич, Я.Б. Роль децентрализованной энергетики в общей энергосистеме [Текст] / Я.Б. Данилевич, А.Н. Коваленко, И.Ю. Кручинина / Академия энергетики.— 2008. № 1.— С. 42–45.
2. Филиппов, С.П. Малая энергетика в России [Текст] / С.П. Филиппов // Теплоэнергетика.— 2009. № 8.— С. 38–44.
3. Капралов, Д.А. Распределенное производство энергии должно гармонично дополнять существующие энергосистемы [Текст] / Д.А. Капралов // Турбины и дизели.— 2005. № 9–10.— С. 2, 3.
4. Аксель, В.А. Энергоцентры на базе микротурбинных установок [Текст] / В.А. Аксель // Энергосбережение.— 2006. № 5.— С. 73–76.
5. Кривобок, А.Д. Микротурбинные установки [Текст] / А.Д. Кривобок // Газотурбинные технологии.— 2006. № 7–8.— С. 10–15.
6. Мельник, Г.В. Системы автономного распределенного энергоснабжения: микротурбины [Текст] / Г.В. Мельник // Двигателестроение.— 2006. № 4.— С. 46–51.
7. Соколов, С.В. Опыт применения микротурбинных установок [Текст] / С.В. Соколов // Газотурбинные технологии.— 2006. № 12.— С. 6–10.
8. Беседин, С.Н. Разработка и создание микротурбинного генератора электрической мощностью 100 кВт (МТГ-100) [Текст] / С.Н. Беседин // Изобретатели и инновационная политика России: материалы Всероссийского форума / Под ред. Ю.Г. Попова и А.Г. Семенова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 80–84.

УДК 621.313

И.Ю. Кручинина

О ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Принципы энергосбережения и экологии, связанные с ужесточением требований к охране окружающей среды, привели к необходимости разработки новых серий высокоэффективных электрических машин.

Например, одна из задач — создание экологически чистых погружных асинхронных электродвигателей, способных работать в среде коррозионной пластовой жидкости (смесь нефти и воды в любой пропорции, минеральных примесей и нефтяного газа) с температурой до 150 °С и давлением до 30 МПа [1].

В настоящее время в приводах центробежных насосов для откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин используются трехфазные асин-

хронные короткозамкнутые погружные маслозаполненные двигатели серии ПЭД, конструкция и элементы защиты которых не обеспечивают в полной мере их надежную работу. Вместе с тем увеличение глубины скважин требует работы двигателя при температурах 150 °С и давлении 30 МПа. Применение новых электродвигателей позволит увеличить глубину скважин, значительно (почти вдвое) сократить длину применяемых погружных электродвигателей серии ПЭД и заменить экологически грязную маслозаполненную машину на экологически чистую [1].

Выбор для этих целей асинхронного двигателя с массивным ротором обоснован рядом пре-

имущества данной конструкции. К достоинствам относится относительно высокая кратность пускового момента по сравнению с обычным двигателем с короткозамкнутой обмоткой на роторе, особенно это касается двигателей малой и средней мощности. Из практики электромашиностроения известно, что асинхронный двигатель с массивным ротором имеет пусковой ток по крайней мере в 1,5–2,0 раза ниже, а пусковой вращающий момент выше, чем у асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой на роторе [2]. В двигателях с массивным ротором возможно регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения за счет мягкой механической характеристики двигателя, для них характерны повышенная термическая стойкость в переходных процессах, практическое отсутствие пульсаций вращающего момента.

Однако всех этих преимуществ на практике оказалось недостаточно для широкого применения двигателей с массивным ротором из-за низких значений КПД и коэффициента мощности в номинальном режиме. Еще в 1928 году И.С. Брук указывал, что асинхронная машина с массивным ротором была бы идеальной, если бы удалось улучшить ее КПД при номинальной нагрузке [2]. Эффективность асинхронных машин с массивным ротором невелика из-за относительно высокого номинального скольжения, связанного с повышенными значениями параметров вторичной цепи машины — активного и индуктивного сопротивления ротора. Большое сопротивление ротора приводит к увеличению джоулевых и добавочных потерь, вызванных высшими гармониками поля на поверхности ротора. В результате номинальная мощность двигателей с массивным ротором при тех же габаритах, что и у обычных, ниже на 25–35 % при более низком КПД [2].

Эти особенности обусловили специальные области применения асинхронных двигателей с массивным ротором, например в качестве высокооборотных машин, для которых проблема прочности менее актуальна, чем для машин с короткозамкнутыми роторами или синхронных. Поскольку $\cos\varphi$ при пуске у них выше, чем у машин с короткозамкнутым ротором (особенно у двигателей малой и средней мощности), то применение таких машин выгодно при повторно-кратковременных режимах работы. Этот тип машин применяется в электроприводах судовых

грузоподъемных и швартовых механизмов, в электроприводах с тяжелыми условиями пуска (компрессоры, сепараторы, центрифуги), в системах автоматики, управления, ориентации и наведения, где необходим широкий диапазон регулирования частоты вращения, в гироскопах, аппаратах звукозаписи, в позиционных электроприводах (запорная аппаратура, дистанционное включение автоматических выключателей).

Различные варианты погружного асинхронного двигателя с массивным ротором для нефтяных скважин (в коррозионно- и термостойком исполнении), который предназначен для подключения к станции управления с частотным преобразователем и должен обеспечивать режимы работы 12/18 кВт, 750/1500 В, 3000/6000 мин⁻¹, представлены в [3].

В отечественной практике известен опыт изготовления массивных роторов асинхронных машин малой и средней мощности на основе сплавов никель — медь, алюминий — железо, железо — никель, железо — медь с легирующими добавками. Каждый из вариантов материала ротора имеет свои достоинства и недостатки. Исходя из экономических критериев на практике для изготовления машин используются в основном сплавы СМ-20 (20 % меди), СМ-25 (25 % меди), СМ-60 (60 % меди) [2].

Цель исследования — оценка влияния и выбор варианта конструктивного исполнения материала ротора, обеспечивающих наилучшие показатели эффективности асинхронного двигателя.

В работе использованы два метода расчета электромагнитного поля ротора: аналитический расчет поля ротора, развернутого в плоскость, и расчет двухмерного плоскопараллельного поля ротора численным методом [4].

На первом этапе расчета по методике, изложенной в [2], предварительно определяют эквивалентные параметры ротора. Из уравнений электромагнитного поля Максвелла для проводящей среды находят напряженности электрического и магнитного полей в массиве ротора и вектор Пойтинга. Активную и реактивную, передаваемую в ротор через воздушный зазор, мощности, находим интегрированием вектора Пойтинга по внешней поверхности ротора. Полученные мощности соответствуют определенному току ротора и скольжению. При предварительном расчете эквивалентных сопротивлений



ротора учитывается зависимость магнитной проницаемости материала ротора μ_r только от тока ротора, т. е. используется зависимость магнитной проницаемости μ_r от скольжения при заданной геометрии ротора. В действительности магнитная проницаемость материала ротора сложным образом зависит от многих факторов, в том числе от тока ротора, скольжения, магнитной индукции основного магнитного поля, геометрических размеров ротора. Она изменяется как во времени, так и в пространстве, различна на разных участках ротора. Окончательный учет этих факторов выполнен численным методом, изложенным в [4].

Исходными данными для моделирования методом конечных элементов служат предварительно определенные значения тока статора, номинальное скольжение, геометрические размеры двигателя, кривые намагничивания $B = f(H)$ и удельные сопротивления материалов статора и ротора. Геометрические данные асинхронного двигателя: длина сердечника — 1100 мм, диаметр ротора — 60,2 мм, число фаз — 3, число полюсов — 2, число пазов статора — 24, число витков на фазу — 48.

В результате численных исследований плоскостного электромагнитного поля найдены распределения векторного магнитного потенциала, магнитной индукции, плотности наведенных вихревых токов в массивном роторе, а также расчетная магнитная проницаемость материала ротора в поперечном сечении магнитопровода. По полученным данным рассчитаны величины потерь в теле ротора и электромагнитный момент, приложенный к ротору. Для постро-

ения механической характеристики расчет проводился последовательно при различных значениях тока статора и скольжения, задаваемого в модели приложенной частотой вращения.

Распределение векторного магнитного потенциала, расчетной магнитной проницаемости материала ротора в поперечном сечении магнитопровода для тока статора 15 А и скольжения 0,025 приведены на рис. 1.

Для выбора оптимального решения по исполнению двигателя с точки зрения получения наибольших КПД и коэффициента мощности $\cos \varphi$ исследованы три варианта конструкций ротора и проведены материаловедческие исследования вариантов с различными материалами ротора.

Влияние материала ротора на показатели эффективности асинхронного двигателя с массивным ротором

В качестве материалов массивного ротора выбраны три: сталь 3, железомедный сплав СМ20 (содержание меди — 20 %, удельное электрическое сопротивление — $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и железомедный сплав СМ25 (содержание меди — 25 %, удельное электрическое сопротивление — $1,14 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), чьи характеристики намагничивания приведены в [2]. Результаты расчетов показателей эффективности двигателя с различными материалами массивного ротора приведены в 1–3 строках табл. 1. Результаты расчета показывают, что из рассмотренных вариантов наиболее перспективным для массивного ротора материалом является железомедный сплав СМ25 [3]. КПД асинхронного

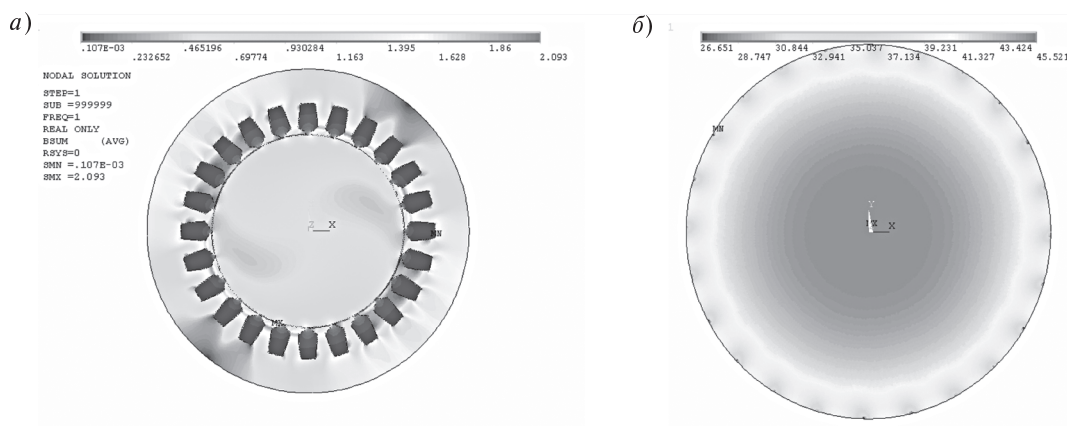


Рис. 1. Распределение векторного магнитного потенциала:
а — индукция в поперечном сечении магнитопровода;
б — расчетная магнитная проницаемость материала ротора

двигателя с массивным ротором из железо-медных сплавов увеличивается на 27 % относительно КПД асинхронного двигателя с железным ротором, при этом на 21 % снижается ток статора при номинальной мощности.

Влияние конструкции массивного ротора на показатели эффективности асинхронного двигателя

Сравнение гладкого и шлицованного массивных роторов. Из публикаций [5, 6] известно, что наличие определенного расчетного количества и размера шлицов в массивном роторе асинхронного двигателя улучшает его параметры.

Численное моделирование асинхронных двигателей с гладким массивным ротором и шлицованным массивным ротором показало, что

наличие шлицов на роторе позволяет повысить КПД двигателя и $\cos \varphi$ примерно на 10–11 %.

Расчетные показатели эффективности приведены в первой и четвертой строках табл. 1. На рис. 2 для иллюстрации показаны распределения плотности тока, наведенного в массивном роторе полем статора, для моделей массивного и шлицованного ротора.

Сравнение гладкого и двухслойного массивных роторов. Улучшение параметров и характеристик двигателя с массивным ротором может быть получено при переходе на двухслойную конструкцию ротора и применении новых, в том числе наноструктурированных, металлов и сплавов для внешнего кольца ротора.

На этапе выбора материала для массивного ротора было установлено, что предпочтителен

Таблица 1

Показатели эффективности асинхронных двигателей при различных вариантах выполнения ротора

Ротор	Мощность, Вт	Скольжение, s	Ток, А	КПД	$\cos \varphi$
Массивный, Fe	12012	0,19	22,6	0,599	0,687
Массивный, Fe–Cu-20	11854	0,061	17,4	0,765	0,686
Массивный Fe–Cu-25	12209	0,058	17,8	0,766	0,688
Шлицованный	11690	0,05	17,8	0,664	0,760
Двухслойный. Толщина слоя Fe–Cu-25 $H = 11$ мм	12651	0,039	15,1	0,791	0,814

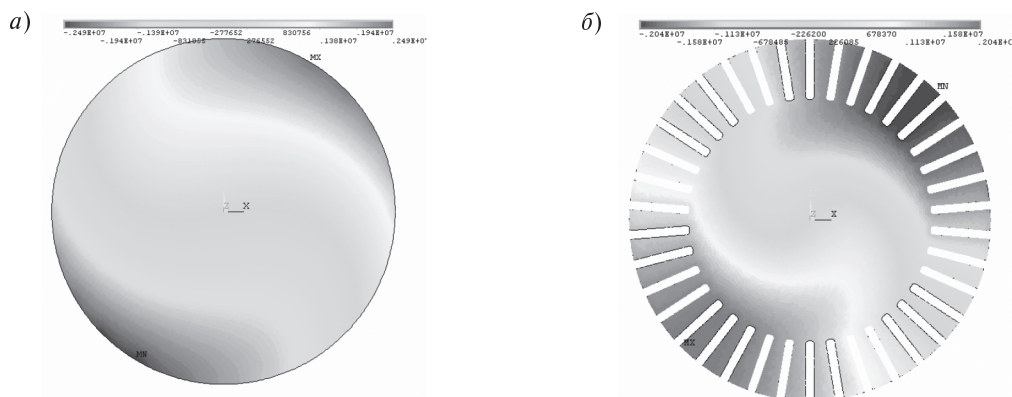


Рис. 2. Распределение плотности тока, наведенного в массивном роторе полем статора, для моделей гладкого (а) и шлицованного (б) роторов в двигателе мощностью 12 кВт



железо-медный сплав СМ25. Именно этот сплав выбран для расчета двигателя с двухслойным ротором.

Результаты расчета электромагнитного поля, полученные на моделях асинхронных двигателей с гладким массивным ротором и двухслойным ротором, демонстрируют улучшение показателей эффективности в варианте ротора, состоящего из двух слоев: внутренний слой — сталь, внешний слой — железо-медный сплав СМ25 толщиной, соответствующей глубине проникновения поля в массив ротора ($H = 11$ мм), которая рассчитана по методике, изложенной в [2].

Результаты численных исследований представлены в третьей и пятой строках табл. 1

Результаты расчета показывают, что в варианте конструкции двухслойного ротора КПД возрастает на 3 %, $\cos\varphi$ увеличивается до значения 0,791, при этом уменьшаются ток и скольжение двигателя.

Аналогичные расчеты были выполнены и для модели асинхронного двигателя с гладким массивным и двухслойным роторами (мощность — 3150 кВт, частота вращения — 500 мин^{-1} , номинальное напряжение — 6000 В; внешний диаметр статора — 1070 мм, внутренний диаметр статора — 860 мм, активная длина — 2100 мм, число полюсов — 12, число фаз — 6, число пазов на полюс и фазу — 1, соединение обмотки — «звезда» [7]).

Расчетные данные для машин с гладким массивным и двухслойным роторами на основе железо-медного сплава СМ25 представлены в табл. 2.

Установлено, что двухслойная конструкция ротора наиболее сильно влияет на $\cos\varphi$. Для двигателя с массивным ротором из сплава СМ-25 при скольжении $s = 0,2$ будет $\cos\varphi = 0,5$.

При замене гладкого массивного ротора двухслойным $\cos\varphi$ повышается значительно с 0,5

до 0,753. По расчетным данным существенное увеличение $\cos\varphi$ двигателя с двухслойным ротором наблюдается в диапазоне скольжений 0—0,3. При больших скольжениях изменение коэффициента мощности менее значительно. КПД двигателя с двухслойным ротором возрастает до 78 %.

По результатам численного моделирования получена зависимость полезной мощности асинхронного двигателя с массивным двухслойным ротором от скольжения. На рис. 3 сопоставлены результаты двухмерного моделирования и аналитического расчета.

Влияние материала двухслойного массивного ротора на показатели эффективности асинхронного двигателя

На примере расчета модели асинхронного двигателя мощностью 3150 кВт с двухслойным ротором исследовано влияние характеристик материалов слоев такого ротора на показатели эффективности двигателя. На рис. 4 показано распределение плотности токов, наведенных полем статора в массивном двухслойном роторе, для двигателей мощностью 12 и 3150 кВт.

Численное моделирование асинхронного двигателя с массивным двухслойным ротором на основе железо-медных сплавов СМ-20 или СМ-25 показало (табл. 3), что пусковые токи двигателя невелики, однако КПД и коэффициент мощности в номинальном режиме не превосходят соответственно 78 % и 0,7. Моделирование при различных значениях удельного электрического сопротивления подтвердило возможность увеличить КПД до 86 %. Удельное электрическое сопротивление материала при этом должно быть на уровне $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. снижено более чем в два раза при сохранении магнитных свойств, характерных для сплава СМ-25.

Таблица 2

**Расчетные характеристики асинхронных двигателей
с гладким массивным и двухслойным роторами**

Тип ротора	Мощность кВт	Скольжение	Ток статора, А	КПД	$\cos \varphi$
Массивный	2364	0,20	181	0,727	0,500
Двухслойный	3155	0,155	154	0,784	0,753
Двухслойный 2D-FEA,	3254	0,155	164	0,780	0,707

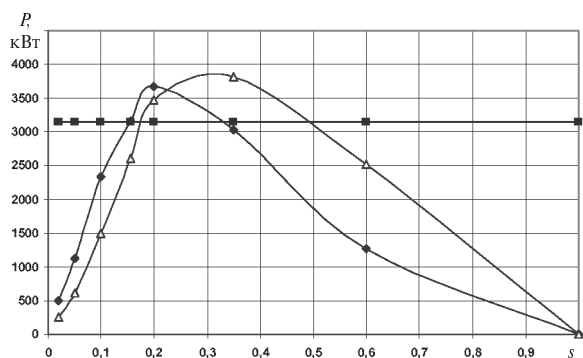


Рис. 3. Расчетные зависимости полезной мощности асинхронного двигателя с массивным двухслойным ротором от скольжения, полученные аналитически (1) и численным методом (2)

Проведенные аналитическими и численными методами исследования, направленные на повышения эффективности асинхронных двигателей за счет выбора материалов с различными характеристиками и вариантов конструкции ротора, позволили выявить предпочтительные материалы для массивного ротора.

В исследованных вариантах материалов ротора на модели асинхронного двигателя мощностью 12 кВт подтверждено, что наиболее эффективным является железомедный сплав СМ25, применение которого позволяет повысить КПД на 27–28 % по сравнению с исходным железным ротором.

В исследованных вариантах конструкции ротора (массивный, шлицованный, двухслойный роторы) наилучшие показатели эффективности достигнуты для асинхронного двигателя

с двухслойным ротором. Установлено, что двухслойная конструкция ротора наиболее сильно влияет на $\cos\phi$. В вариантах конструкций двухслойного ротора асинхронного двигателя мощностью 12 и 3150 кВт возрастает соответственно на 3 и 7 %, $\cos\phi$ достигает соответственно величин 0,791 и 0,753. По расчетным данным существенное увеличение $\cos\phi$ двигателя с двухслойным ротором наблюдается в диапазоне скольжений 0–0,3.

Наличие шлицов на роторе позволяет повысить КПД и $\cos\phi$ двигателя с массивным ротором примерно на 10–11 %.

Моделирование при различных значениях удельного электрического сопротивления асинхронного двигателя с двухслойным ротором мощностью 3150 кВт подтвердило возможность увеличить его КПД с 78 до 86 %. Перспективы повышения КПД связаны с возможностями влияния на удельное электрическое сопротивление сплавов при сохранении магнитных характеристик.

4. Изменение величины удельного электрического сопротивления может быть достигнуто путем введения в структуру материала наночастиц серебра, алюминия [8]. Интересные данные по влиянию на величину электропроводности получены при анализе соотношения электропроводных примесей в сплаве олова, серебра и меди [9].

При добавлении примеси меди электропроводность незначительно увеличивается, примесь серебра приводит к большему возрастанию электропроводности. Обе примеси — меди и серебра — приводят к уменьшению электропроводности, так как нарушается структурная симметрия

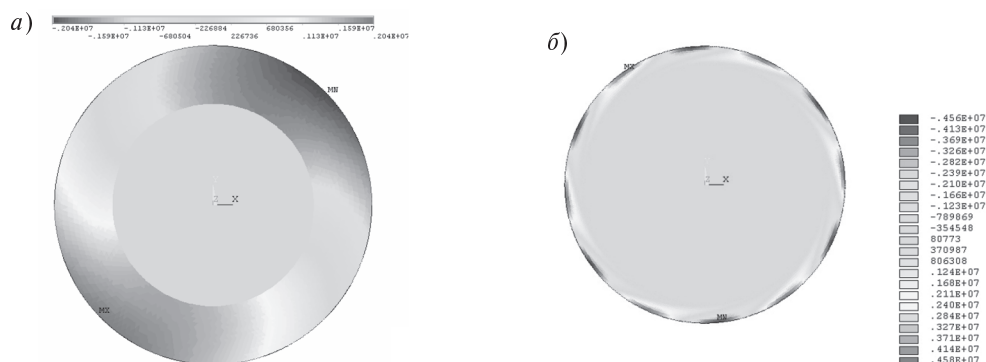


Рис. 4. Распределение плотности токов, наведенных полем статора в массивном двухслойном роторе асинхронного двигателя мощностью 12 (а) и 3150 (б) кВт

Таблица 3

Параметры двигателей при разных характеристиках материала ротора

Удельное электрическое сопротивление ротора ρ , 10^7 Ом·м	Скольжение s	Мощность полная, кВт	КПД	$\cos \phi$	Ток статора I , А	Мощность на валу, кВт
0,5	0,07	3787	0,863	0,748	143,7	3251
2	0,2	3632	0,748	0,780	148,6	2812
1,14	0,155	4089	0,784	0,752	153,9	3155

расплава. Увеличение электропроводности при легировании может быть объяснено увеличением электронной плотности.

В ЗАО НПП «Высокодисперсные металлические порошки» (г. Екатеринбург) получены новые покрытия с субмикронными порошками меди и ее сплавов, основанные на наноструктурных превращениях поверхностных слоев стали. Выделяющиеся атомы меди обладают повышен-

ной энергией, вследствие чего активно взаимодействуют с металлом-подложкой, встраиваясь в его поверхностные слои. Происходит микромодифицирование поверхности металла и образование наноструктурного покрытия, обладающего необычным свойством, ценным для высокооборотных электрических машин, — сочетанием высокой твердости с повышенной пластичностью [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветохин, В.И. К вопросу о создании и развитии будущего подводного электроснабжения при освоении континентального шельфа и мирового океана [Текст] / В.И. Ветохин // Электротехника.— 2010. № 8.— С. 15–21.
2. Могильников, В. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение [Текст] / В. Могильников, А. Олейников, А. Стрельников.— М.: Энергоатомиздат, 1983.— 120 с.
3. Danilevich, J.B. Design Considerations of Submersible Unprotected Solid-Rotor Induction Motor [Текст] / J.B. Danilevich, V.N. Antipov, I.Yu. Kruchinina, Y.Ph. Khozikov // Proceedings ICEM 2008. XVII International Conference on Electrical Machines.— Paper ID 940. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR.— ISBN: 978-1-4244-1736-0.— Vilamoura, Portugal, 6th-9th September 2008.
4. Данилевич, Я.Б. Электромагнитное поле асинхронной машины с массивным нанокompозитным ротором [Текст] / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Известия РАН. Энергетика.— 2007. № 2.— С. 26–36.
5. Шенфер, К.И. Асинхронные машины [Текст] / К.И. Шенфер. Москва, Ленинград: Государственное издательство, 1929.— Т. 3.— 458 с.
6. Rajagopalkan, P.K. Effects of Axial Slits on the Performance of Induction Machines with Solid Iron Rotors [Текст] / P.K. Rajagopalkan, M.V. Balarama // IEEE Transactions on power apparatus and systems. VOL.PAS-88, NO11.— November 1969.— P. 1695–1709.
7. Danilevich, J.B. Determination of parameters by means of finite element analysis in two-ply solid-rotor 3150 kW induction motor [Текст] / J.B. Danilevich, V.N. Antipov, I.Yu. Kruchinina [и др.] // Proceedings of ISEF 2009— XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering Arras, France.— September 10-12, 2009.— P. 87–88.
8. Данилевич, Я.Б. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий [Текст] / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина [и др.] // Электротехника.— 2010.— № 9.— С. 2–9.
9. Мудрый, С.И. Структура и электрофизические свойства сплавов Sn, Sn0.962Ag0.038, Sn0.987Cu0.013 и Sn0.949Ag0.038Cu0.013 [Текст] / С.И. Мудрый, В.М. Склярчук, Ю.О. Плевачук, И.И. Штаблавый // Неорганические материалы.— 2008. Т. 44, № 2.— С. 171–175.
10. Фришберг, И.В. Субмикронные порошки меди и медных сплавов: получение, свойства, возможности использования [Текст] / И.В. Фришберг, Л.В. Золотухина // Сб. тез. Второй Всеросс. конф. по наноматериалам «НАНО 2007»/ Применение наноматериалов в практике.— Новосибирск, 2007.— С. 257.

АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ МЕГАПОЛИСОВ

Развитие системных аварий в условиях мегаполисов, для которых характерны перекрестные связи сетей разных классов напряжения, сопровождается глубоким снижением напряжения в сети при неизменной частоте в начальной стадии аварийного процесса. Характерной причиной такой аварии является ослабление связи энергорайона мегаполиса с ЕЭС и возникающий при этом дефицит реактивной мощности. Неизменность частоты в начальной стадии аварии не позволяет задействовать противоаварийные автоматики, пуск которых осуществляется по факту снижения частоты (АЧР, ЧДА и др.), и тем самым предотвратить дальнейшее развитие аварии. Глубокое снижение напряжения может привести к возникновению лавины напряжения, связанной с опрокидыванием асинхронных двигателей, нарушением устойчивости параллельной работы и остановом электростанций.

Как указано в отчете по расследованию московской аварии 25 мая 2005 года [1], одной из ее причин был «возникший в сложившихся схемно-режимных условиях и при существующем составе генерирующего оборудования ТЭС недостаток реактивной мощности, приведший к снижению напряжения в южной части Московской энергосистемы». В этом же отчете при обсуждении первоочередных мероприятий, направленных на недопущение аварий, подобных московской, отмечено: «Обеспечить оснащение Московской энергосистемы автоматическими устройствами разгрузки электрической сети при снижении напряжения и перегрузках линий электропередачи на основе специальной автоматики отключения нагрузки по унифицированной модели, в том числе с воздействием на потребителей, присоединенных к устройствам АЧР».

Внедрение автоматики ограничения снижения напряжения (АОСН), не требующее значительных материальных затрат, делает эту автоматику весьма привлекательным способом повышения надежности электроснабжения ме-

гаполисов. В настоящей работе рассмотрены некоторые принципы построения АОСН для энергосистем мегаполисов.

Общие требования к АОСН. Ввиду отсутствия подробных нормативных документов по организации принципов построения АОСН требования к этой автоматике целесообразно построить по аналогии со стандартом [2], регламентирующим автоматическое ограничение снижения частоты (АОСЧ).

Устройства АОСН должны устанавливаться на тех же подстанциях и станциях энергосистемы мегаполиса, где установлены устройства АОСЧ. Как показано в [2], объемы нагрузки, необходимые для подведения под АОСН с целью введения режима напряжения в допустимую область, для крупных энергорайонов мегаполисов составляют 20–40 % общего электропотребления района. Указанные значения ниже объема нагрузки (60 %), подводимой под АЧР в соответствии со стандартом [3], и, следовательно, достаточны для эффективного действия АОСН.

В локальных автоматиках, действующих по факту снижения напряжения, целесообразно реализовать следующие три уровня:

первый уровень — автоматический ввод резерва реактивной мощности (АВРРМ) при снижении напряжения ниже допустимого значения (аналогично АЧВР);

второй уровень — отключение нагрузки очередями (аналогично АЧР) с последующим ее автоматическим включением (НАПВ) при нормализации режима напряжения (аналогично ЧАПВ);

третий уровень — ввод в действие делительной автоматики на станциях при неэффективности действия автоматик первого и второго уровней и глубоком снижении напряжения, угрожающем лавиной напряжения (аналогично ЧДА).

Очевидно, что автоматика первого уровня должна обеспечить АВРРМ за счет увеличения ее генерации синхронными генераторами, компен-

саторами, конденсаторными батареями и иными источниками. Автоматика этого уровня в настоящей статье не рассматривается.

Алгоритм работы АОСН по отключению нагрузки. При разработке алгоритмов работы АОСН следует принимать во внимание следующее:

диапазон работы АОСН, ограниченный значениями минимально допустимого рабочего напряжения $U_{\min \text{ доп}} = 0,82$ о.е. и критического напряжения $U_{\text{кр}} = 0,7$ о.е. [4];

рекомендации [5] о целесообразности выполнения АОСН очередями с разными выдержками времени;

требования [6] по минимизации объема отключаемой нагрузки;

возможность отключения нагрузки без выдержки времени или выделения станции на изолированный район при угрозе лавины напряжения.

Для оценки количества очередей АОСН следует учитывать погрешности измерительных трансформаторов напряжения (ТВ). В соответствии с классами точности применяемых в энергосистемах $TV(0,5; 1; 3)$ можно принять величину шага между очередями $0,005-0,03$ о.е. Следовательно, в принятом диапазоне работы АОСН можно было бы выделить до 25 (в общем случае n) очередей АОСН. Однако вследствие наличия колебательной составляющей напряжения (рис. 2), обуславливающей дополнительную

погрешность измерения, целесообразно ограничиться количеством очередей 3–5.

Схема размещения АОСН на шинах подстанции приведена на рис. 1, а. При снижении напряжения U блок АОСН формирует управляющие воздействия (УВ), например на пять ($n = 5$) очередей отключаемой нагрузки (выключатели Q_i). Принципиальная функциональная схема блока АОСН, предлагаемая к выполнению на микропроцессорной базе, показана на рис. 1, б. Уставки U_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) реле минимального напряжения ($U <$) уменьшаются по мере возрастания номера очереди АОСН. На выходе каждого реле формируются два одинаковых сигнала — x_1 и x_2 . Сигнал x_2 инвертируется, образуя сигнал x_3 . Сигналы x_1 и x_3 с выдержками времени t_i и t'_i формируют УВ на отключение или включение (НАПВ) выключателей Q_i .

Наименьшая уставка по времени t_i принимается для n -й очереди АОСН, имеющей наименьшую уставку по напряжению. Уставка по времени отстраивается от действия устройств релейной защиты и сетевой автоматики. Остальные уставки t_i увеличиваются по мере уменьшения индекса очереди АОСН, обеспечивая очередность отключения нагрузки.

В частности, если аварийное возмущение вызвало снижение напряжения до величины $0,74$ о.е., то придут в действие реле минимального напряжения 3-й, 2-й и 1-й очередей. Через время t_3

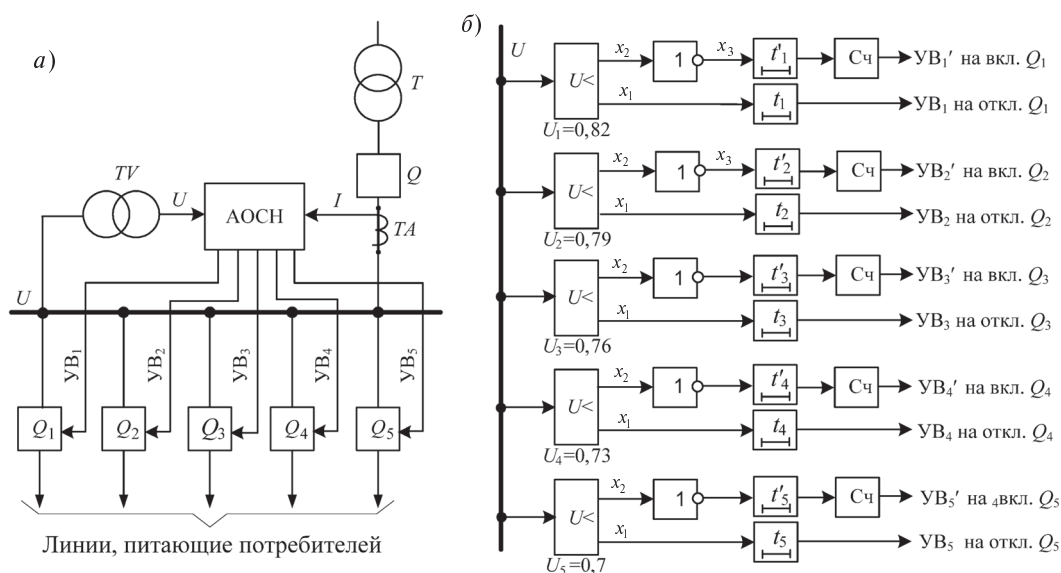


Рис. 1. Принципиальная схема размещения АОСН на подстанции (а) и функциональная схема блока АОСН с очередями отключаемой нагрузки (б)

отключится выключатель Q_3 , через время $t_2 > t_3$ отключится выключатель Q_2 и, наконец, через время $t_1 > t_2$ отключится выключатель Q_1 . Однако, если после отключения выключателя Q_2 напряжение сети U станет больше 0,82 о. е., то отключение выключателя Q_1 не произойдет.

Проведенные расчеты показали высокую эффективность очередности действия АОСН на отключение нагрузки района, подведенной под АЧР. В качестве иллюстрации на рис. 2 показаны изменения напряжения в сетях 110 и 220 кВ одного из районов энергосистемы Санкт-Петербурга при ослаблении его связи с ЕЭС. Рис. 2, а, выполненный в соответствии с исследованиями [2], иллюстрирует изменения напряжений при отключении нагрузки одной ступенью и восстановлении напряжения практически до номинального значения.

Зависимости, приведенные на рис. 2, б, получены для случая деления отключаемой нагрузки на пять очередей, приблизительно равных по мощности. Видно, что после отработки трех очередей ($i = 4; 3; 2$) напряжения сетей 110 и 220 кВ вошли в допустимую область — $U > 0,82$ о. е., а очередность действия АОСН позволила уменьшить объем отключаемой нагрузки на 40 % по сравнению со случаем, приведенным на рис. 2, а.

Уставки по времени t'_i , обеспечивающие выдержку времени при формировании УВ на включение выключателей Q_i , увеличиваются по мере уменьшения индекса очереди АОСН. Эти уставки должны быть на 2–3 порядка больше соответствующих уставок t_i , что обеспечит включение потребителей при стабилизации режима напряжения в энергосистеме.

Для предотвращения процесса неоднократного включения — отключения i -й очереди АОСН следует предусмотреть счетчики (Сч) допустимого числа коммутаций (рис. 1.б).

Алгоритм работы АОСН по предотвращению лавины напряжения. В соответствии с нормативными документами [4–7] для предотвращения лавины напряжения устройства АОСН должны контролировать величину напряжения и изменение величины производной dQ/dU .

Расчеты процессов при лавине напряжения в сетях 110 кВ, выполненные в [8], показали, что лавина напряжения распространяется на большую часть нагрузки за время 0,1–2 с, что подчеркивает важность требования к быстродействию АОСН при угрозе лавины напряжения.

Характерная особенность режима, предшествующего лавине напряжения, — это снижение напряжения во всех трех фазах ниже минимально допустимого $U_{\min \text{ доп}}$ и изменение знака производной dQ/dU . Однако при трехфазном коротком замыкании (КЗ) снижение напряжения симметрично во всех фазах, а изменение знака производной dQ/dU имеет место при любом КЗ, когда напряжение уменьшается, а ток, имеющий реактивный характер, увеличивается. Поэтому в действии АОСН следует предусмотреть контроль симметрии режима и блокировку работы автоматики при трехфазных КЗ, которая может быть выполнена, например, следующими способами:

по факту начальной кратковременной (5–10 мс) несимметрии токов и напряжений даже при симметричных КЗ (как это используется в дистанционных защитах для предотвращения

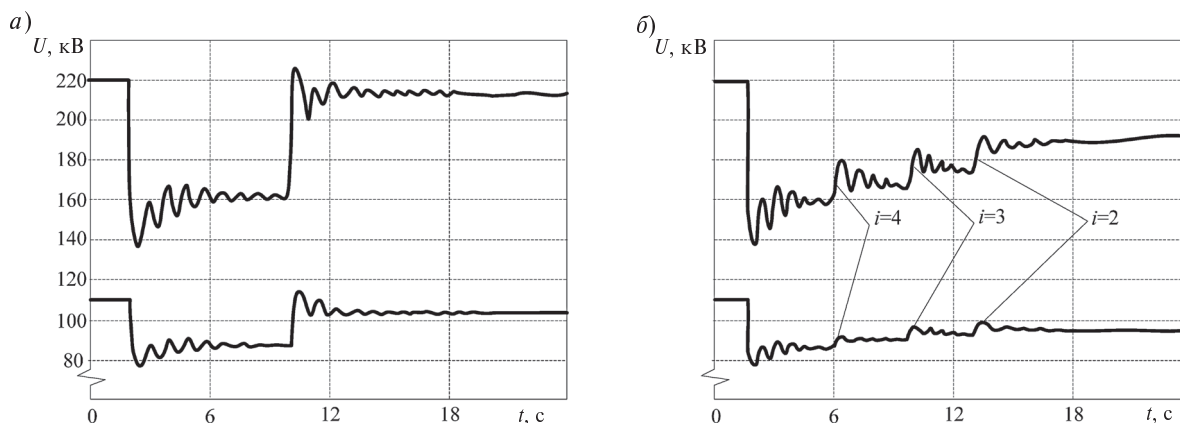


Рис. 2. Изменение напряжений в энергорайоне при действии АОСН:
а — одной очередью; б — несколькими очередями

неправильных действий защит при качаниях); такая блокировка предлагается в [8];

по факту резкого увеличения тока при КЗ.

Использование первого способа блокировки, видимо, нецелесообразно для сетей с изолированной нейтралью, которые длительно могут работать в несимметричном режиме замыкания фазы на землю. Поскольку резкое увеличение тока имеет место при любых КЗ, при которых действие АОСН должно блокироваться, авторами было отдано предпочтение второму способу.

Функциональная схема блока АОСН, формирующего УВ на отключение нагрузки без выдержки времени, приведена на рис. 3. Блок содержит четыре канала, каждый из которых формирует свой импульс (0 или 1).

В первом канале устройство Y отслеживает симметрию напряжений фаз. В симметричном режиме на выходе формируется сигнал 1, в несимметричных режимах — сигнал 0.

Во втором канале измерительный орган — реле минимального напряжения $U<$ — осуществляет контроль снижения напряжения. При нормальном напряжении на выходе реле формируется сигнал 0. При снижении напряжения ниже уставки $U_{\min \text{ доп}}$ на выходе реле формируется сигнал 1.

В третьем канале формируется сигнал, пропорциональный Q (произведение тока I_a на напряжение U_{bc}). Далее устройство дифференцирования D и определитель знака сигнала Sign формируют сигнал 1 при отрицательном знаке производной dQ/dU или сигнал 0 при положительном ее знаке.

Четвертый канал фиксирует наличие трехфазного КЗ на шинах или отходящих к нагрузкам линиях. Ток I на входе к шинам подстанции (рис. 1, а) подается непосредственно на устройство сравнения (компаратор K). Туда же через устройство задержки $I(t)$ подается этот же ток. Время задержки t , устанавливаемое больше времени срабатывания релейной защиты, позволяет сохранить параметры режима, предшествующего этому КЗ. При отсутствии КЗ сигналы, поступающие на компаратор K , будут одинаковыми, и на его выходе будет формироваться сигнал 1. При возникновении КЗ и до момента его отключения релейной защитой сигналы, поступающие на компаратор K , будут разными, и на его выходе будет формироваться сигнал 0, блокирующий действие автоматики. После отключения

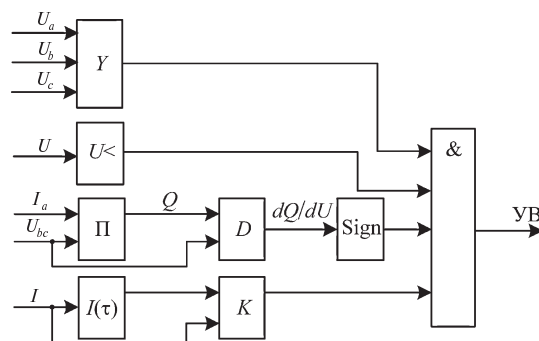


Рис. 3. Функциональная схема блока отключения нагрузки (выделения станции) при лавине напряжения

КЗ релейной защитой через время t на выходе компаратора вновь будет сигнал 1.

Устройство логического умножения $\&$ при четырех единичных сигналах на входе формирует УВ на отключение нагрузки без выдержки времени. Объем отключаемой нагрузки для конкретной подстанции принимается в результате предварительных расчетов возможных аварийных ситуаций.

При восстановлении режима напряжения повторное включение очередей нагрузки на подстанции будет осуществляться первым блоком АОСН (рис. 1, б) с выдержками времени t_i' .

Алгоритм работы АОСН по выделению станции. Для мегаполиса характерными электростанциями являются ТЭЦ, с шин генераторного напряжения которых получают питание собственные нужды (СН) и близлежащие потребители. Связь с системой осуществляется через повышающие трансформаторы T .

Принципиальная схема размещения АОСН на ТЭЦ показана на рис. 4. Поскольку количество линий, отходящих к потребителям 6–10 кВ, может быть достаточно большим, сбор информации по реактивной мощности осуществляется с генераторов G и связей с системой C .

Очевидно, что реактивная мощность, потребляемая суммарной нагрузкой и СН на генераторном напряжении, составит $Q_{H\Sigma} = Q_{G\Sigma} - Q_{C\Sigma}$, где $Q_{G\Sigma}$ — суммарная генерируемая реактивная мощность; $Q_{C\Sigma}$ — суммарная реактивная мощность, передаваемая в систему C .

Функциональная схема блока АОСН, формирующего УВ на выделение станции (отключение выключателей Q_c) при угрозе лавины напряжения, аналогична схеме, приведенной на

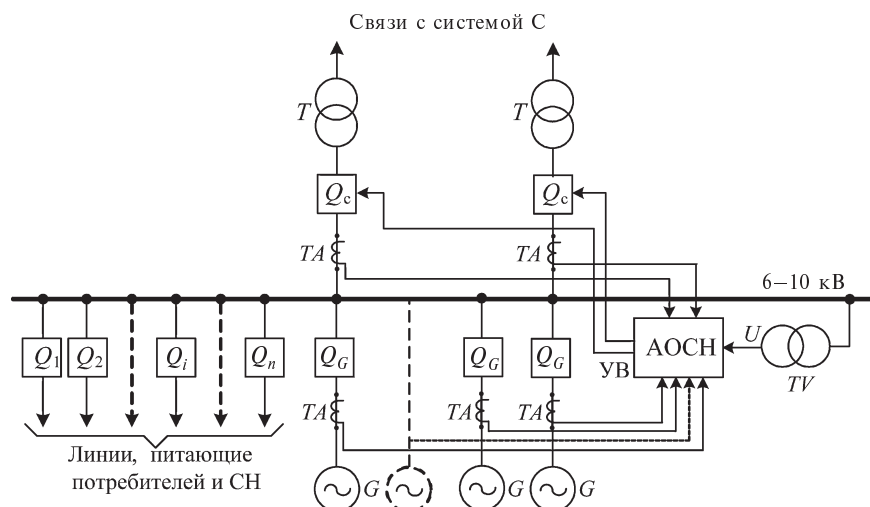


Рис. 4. Принципиальная схема размещения АОСН на ТЭЦ

рис. 3. Отличие лишь в том, что по каналу Q передается сигнал, пропорциональный мощности $Q_{H\Sigma}$, а контроль отсутствия в сети трехфазного КЗ осуществляется по величине тока на выводах генераторов.

Выводы:

1. Для повышения надежности энергосистем мегаполисов и предотвращения развития аварий, сопровождающихся в начальной стадии глубоким снижением напряжения, целесообразно широкое внедрение локальных автоматов, работающих по факту снижения напряжения (АОСН) и не требующих значительных материальных затрат.

2. Ввиду отсутствия подробных нормативных документов по организации принципов построения АОСН требования к этой автоматике целесообразно строить по аналогии со стандартом, регламентирующим автоматическое ограничение снижения частоты (АОСЧ), и реализовать три уровня АОСН:

первый уровень — автоматический ввод резерва реактивной мощности;

второй уровень — отключение нагрузки очередями (аналогично АЧР) с последующим ее включением при нормализации режима напряжения (аналогично ЧАПВ);

третий уровень — ввод делительной автоматики на станциях при напряжении, обуславливающем лавину напряжения (аналогично ЧДА).

3. Разработаны алгоритмы и принципиальные функциональные схемы микропроцессорного устройства АОСН второго и третьего уровней, рекомендуемого для установки в энергосистеме мегаполиса. В устройствах АОСН второго уровня предусмотрена очередность действия по отключению нагрузки, позволяющая при введении режима напряжения в допустимую область уменьшить объем отключаемой нагрузки по сравнению со случаем ее отключения одной ступенью. При разработке устройства АОСН третьего уровня обоснована и предусмотрена блокировка работы автоматики при КЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по расследованию аварии в ЕЭС России, произошедшей 25.05.2005 [Текст] / РАО «ЕЭС России» — М., 2005.

2. **Артемьев, М.С.** Разработка мероприятий по локализации аварий энергосистем, связанных с глубоким снижением напряжения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М.С. Артемьев. — СПб., 2011.

3. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка) [Текст]: Стандарт ОАО «СО ЕЭС» / РАО ЕЭС России. — М., 2009.

4. Методические указания по устойчивости энергосистем [Текст]. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.



5. РД 34.35.113. Руководящие указания по противоаварийной автоматике энергосистем (основные положения) [Текст] / ВНИИЭ, Энергосеть-проект, ЦДУ ЕЭС СССР, НИИПТ.— М.— СПб., 1986.

6. СТО 59012820.29.240.001—2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования [Текст]:

Стандарт ОАО «СО ЕЭС» / ОАО «СО ЕЭС».— М., 2011.

7. Инструкция по предотвращению развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части Единой энергетической системы России [Текст] / РАО «ЕЭС РОССИИ», ОАО «СО ЕЭС».— М., 2006.

8. Черновец, А.К. Расчет переходных процессов при лавине напряжения в сетях 35—110 кВ [Текст] / А.К. Черновец, С.В. Кузнецов, В.Ф. Александров // Электрические станции.— 1985. № 10.

УДК 621.315.17

Ю.В. Соловьев, Г.Н. Самарин

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ОБОРУДОВАНИЯ ВЛ 6–35 кВ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ПРИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

Анализ состояния и опыт эксплуатации воздушных линий (ВЛ) 6–35 кВ показывают нарастающую тенденцию к переходу от традиционных технических решений к инновационным с применением новых технологий и материалов в конструкциях оборудования. Ранние разработки и решения в области оценки технического состояния не всегда могут учесть особенности функционирования современного оборудования в условиях длительной эксплуатации. Широкое внедрение ВЛ 6–35 кВ с оборудованием на полимерной основе, в частности с изолированными проводами, отсутствие полноценного опыта эксплуатации, нормативной базы, неизученность условий и механизмов зарождения и развития дефектов в оборудовании при комплексном воздействии эксплуатационных факторов вносят дополнительные трудности в эксплуатацию распределительных сетей в России, что и стало предпосылкой для проведения широкомасштабных исследований, о некоторых результатах которых уже сообщалось ранее [1]. В продолжение этого в рамках данной статьи предлагаются результаты анализа условий развития дефектов в полимерных конструкциях оборудования ВЛ 6–35 кВ с изолирован-

ными проводами при воздействии различных по природе эксплуатационных факторов.

Анализ раннего зарубежного опыта эксплуатации ВЛ 6–35 кВ с изолированными проводами [2] выявил значительное число повреждений проводов вплоть до их обрыва вследствие превышения предела тяжения при ветровых нагрузках в результате вибрации. Проведенные исследования на моделях позволили установить связь между характером изменения аэродинамического сопротивления изолированных проводов и их тяжениями в условиях ветровых нагрузок [1]. Анализ полученных зависимостей обосновал важность корректного выбора рабочих тяжений изолированных проводов для обеспечения максимальных виброрассеяний за счет снижения изгибной жесткости конструкции провода, которая зависит от свойств материалов токопроводящей жилы и защитной оболочки [1]. Исследование аэродинамики изолированных проводов показало, что их идеально круглая форма сечения, площадь которого больше по сравнению с традиционными проводами (за счет наличия защитной оболочки), приводит к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления до 1,8. В результате изолированный провод ис-

пытывает перегрузки до 90g ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения), а частота вибраций достигает уровня 70 Гц. За счет внутреннего демпфирования вследствие трения между проволоками токопроводящей жилы вибрация провода будет снижена. Однако по мере истирания поверхностей (фреттинг-коррозия) алюминиевых проволок сталеалюминевых проводов с защитной оболочкой будет происходить увеличение внутренних зазоров между проволоками, в результате чего эффективность внутреннего демпфирования снизится. Побочный эффект от фреттинг-коррозии будет заключаться в удалении поверхностной пленки оксида алюминия. В результате будет происходить локальная питтинг-коррозия алюминия, приводящая к снижению ресурсных показателей проводов в разы. Динамические знакопеременные нагрузки на провода дополнительно создают условия для образования дефектов в защитной оболочке. Напряженно-деформированное состояние полимерного материала защитной оболочки возникает в локальных областях перенапряжения, окружающих неоднородности и дефекты структуры, с образованием трещин и последующим нарушением целостности защитной оболочки. Это создает дополнительные предпосылки для возникновения коррозии токопроводящей жилы.

Эффект «круглой формы» сечения изолированного провода создает предпосылки для увеличения динамических нагрузок на провода в результате гололедообразования (при сложившемся мнении производителей о том, что гололед на изолированных проводах не образуется). Отложение гололеда на изолированных проводах способствует началу интенсивной синхронизации частоты отрыва вихрей с одной из собственных частот колебаний провода. Важно отметить, что эффект «круглой формы» сечения проводов до сих пор не учтен в существующих методиках оценки величины допустимых механических нагрузок на провода [3].

Таким образом, гололедно-ветровые нагрузки приводят к снижению механической прочности изолированных проводов, изменению свойств материалов конструкций токопроводящей жилы и защитной оболочки, образованию трещин, коррозии. Разработка моделей дефектов для оценки ресурсных показателей изолированных проводов в этих условиях достаточно актуальна.

Предложена модель, которая, опираясь на элементы обобщенной структурно-кинетической теории разрушения полимеров, описывает характер и динамику изменения свойств дефекта в зависимости от структурных свойств и превращений в материале защитной оболочки провода. При построении модели использовано универсальное соотношение для определения скорости роста трещины разрушения в общих условиях механического нагружения полимерного материала [4]:

$$\begin{aligned} \dot{a}(l, \sigma^*, T) = \\ = \begin{cases} 2\lambda v_0 \exp\left[-\frac{U - V_a \sigma_0^*}{kT(l, t)}\right] \times \\ \quad \times \operatorname{sh}\left[\frac{V_a}{kT(l, t)}(\sigma^* - \sigma_0^*)\right], \sigma_0 \leq \sigma \leq \sigma_k; \\ \lambda v_0 \exp\left[-\frac{U - V_a \sigma^*}{kT(l, t)}\right], \sigma_0 < \sigma < \sigma_k; \\ 0,38 \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \sigma \geq \sigma_k, \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

где σ_0 — безопасное напряжение; σ — текущее напряжение; σ_k — критическое напряжение разрыва; λ — удлинение связи; v_0 — частота тепловых колебаний кинетических единиц, участвующих в разрыве связей; U — высота потенциального барьера; V_a — флуктуационный объем; σ_0^* — термофлуктуационный порог разрушения; k — постоянная Больцмана; $T(l, t)$ — абсолютная температура в области вершины трещины; σ^* — локальное напряжение; E — модуль Юнга; ρ — плотность материала.

Универсальность соотношения (1) дает возможность использовать его для описания динамики роста дефекта в полимерной конструкции защитной оболочки провода при любой конфигурации трещины и ее расположения в материале.

Анализ механизма развития трещины при нагружении полимерной защитной оболочки с учетом двух стадий процесса накопления повреждений позволил определить ресурсный показатель конструкции как сумму времен процессов разрыва связей на флуктуационной и атермической стадиях в полном интервале напряжений от безопасного до критического $[\sigma_0; \sigma_k]$ [4]:

$$\tau = \tau_{\phi} + \tau_k = \frac{2l_0 f_0 \exp\left(-\frac{q}{k}\right)}{\lambda v_0 \alpha \sigma} \exp\left(\frac{U_0 - V_a \beta \sigma}{kT}\right) + \times \left[1 - \exp\left(-\alpha \sigma \left(\sqrt{\frac{l}{l_0}} - 1\right)\right) \right]. \quad (3)$$

$$+ 2,63L \sqrt{\frac{\rho}{E}} \left(1 - \frac{l_k}{L}\right);$$

$$\alpha = \frac{V_a \beta}{\chi T}; \quad \beta = \chi \sqrt{\frac{l_0}{\lambda}}; \quad \chi = (0,79; 0,71);$$

$$f_0 = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp[-2n\alpha(\sigma - \sigma_0)], \quad (2)$$

где β — коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины, соответствующий начальной ее длине l_0 ; n — номер связи разрыва. Из соотношений (1) и (2) следуют зависимости для оценки предельных параметров дефектов — начальной длины микротрещины и относительной

критической длины трещины: $\sqrt{\frac{l_k}{l_0}} = \frac{(U_0 - qT)}{V_a \beta \sigma}$;

$l_0 = \chi^{-2} \lambda \beta^2$. Переход к относительным единицам позволил установить связь между ресурсным показателем полимерной конструкции защитной оболочки провода и динамическими свойствами дефектов (рис. 1):

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \sqrt{\frac{l}{l_0}} \exp\left[-\alpha \sigma \left(\sqrt{\frac{l}{l_0}} - 1\right)\right] + \left(\frac{1}{\alpha \sigma}\right) \times$$

Полученные соотношения обосновывают следующую зависимость ресурсного показателя полимерной конструкции от характеристик начальной стадии роста трещины разрушения:

$\tau_{\phi} = \frac{2l_0}{\alpha \sigma \vartheta_0}$, где $\vartheta_0 = \lambda v_0 \exp\left(-\frac{U}{kT} + \alpha \sigma\right)$ — на-

чальная скорость трещины. Полученная зависимость справедлива и для случаев нагружения, когда механизм разрушения остается термофлуктуационным и имеют место факторы, усложняющие характер процесса разрушения (влияние окружающей среды, неизотермические условия нагружения, циклическая механическая нагрузка и т. д.). Исследования циклических механических нагрузок при гололедно-ветровых воздействиях на провода внесли в модель ряд уточнений:

режим нагружения не меняет в корне термофлуктуационной природы процесса разрушения;

энергетический барьер при циклическом нагружении вследствие более высоких концентраций напряжений снижается в большей степени, чем при статических нагрузках;

на динамику развития дефектов и ресурсные показатели существенно влияют релаксационные процессы и локальные разогревы.

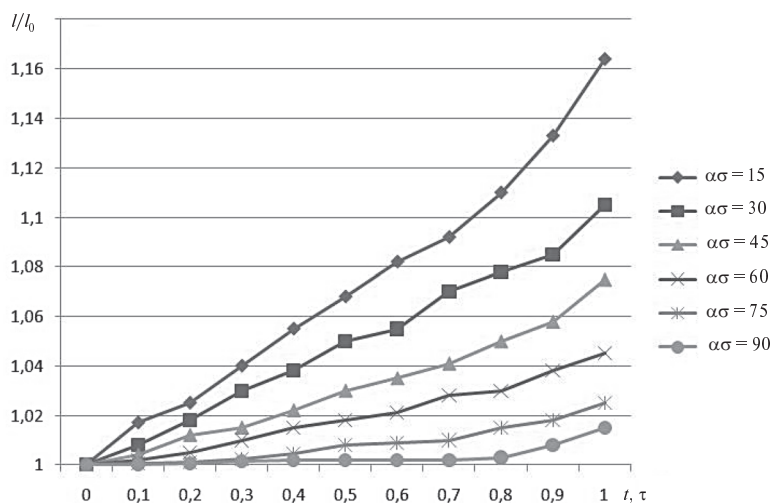


Рис. 1. Зависимость динамических свойств дефектов для полимерной конструкции защитной оболочки провода при механических нагрузках, количественно характеризующихся безразмерным показателем $\alpha\sigma$

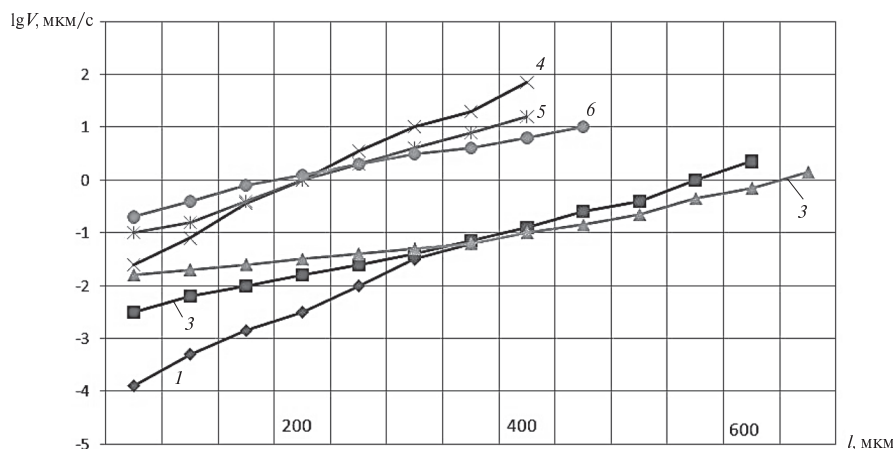


Рис. 2. Динамические свойства дефекта при условии статического растяжения при температуре 20 (1), 50 (2), 70 °С (3) и циклического нагружения (4–6) при тех же температурах

Принятые уточнения в модели позволили выявить самоускоренный характер роста трещины со временем для различных температур и частот циклического нагружения (рис. 2).

Анализ предложенной модели дал возможность обосновать предположение, что простой пересчет на основе классических представлений о природе накопления повреждений не всегда позволяет корректно рассчитать ресурсные показатели при циклических нагрузках. Принятые уточнения в модели значительно снижают погрешность при расчете ресурсных показателей полимерных конструкций в условиях циклических нагрузок. На основе соотношения для оценки динамических свойств дефектов в защитной оболочке провода при воздействии циклических механических нагрузок получена

расчетная зависимость ресурсного показателя полимерной конструкции защитной оболочки провода (рис. 3).

Проведено исследование на моделях изменения динамических свойств дефектов и ресурсных показателей полимерных конструкций защитной оболочки провода при комбинированном воздействии механических и температурных нагрузок. Анализ термонапряженного состояния защитной оболочки показал, что принципы описания механизмов, принятые за основу в моделях при механических воздействиях, соблюдаются и при комбинированных механических и температурных нагрузках. Получены соотношения для определения скорости роста трещины и ресурсных показателей применительно к случаям установившегося и переходного теплового состояния.

В статье проведен анализ условий зарождения и развития дефектов в полимерных конструкциях оборудования ВЛ 6–35 кВ с изолированными проводами, учитывающий воздействие гололедно-ветровых нагрузок. Исходя из конструктивных особенностей и физики изменения технического состояния изолированных проводов при климатических воздействиях обоснованы предпосылки образования дефектных структур в полимерных конструкциях и материалах защитных оболочек изолированных проводов. На основе построенных адекватных моделей дефектов предложено математическое описание динамики их роста.

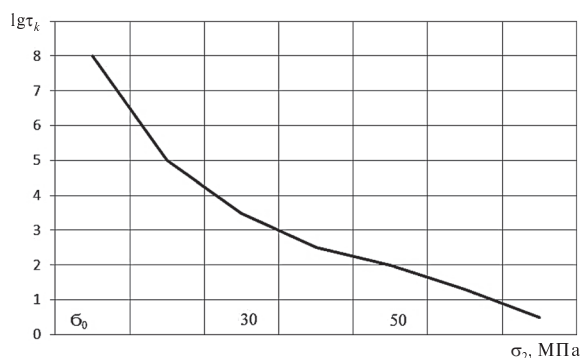


Рис. 3. Изменение ресурсного показателя защитной оболочки провода (сшитый полиэтилен) при циклическом нагружении провода



Обоснованы ресурсные модели, позволяющие проводить оценку ресурсных показателей исследуемых конструкций и прогнозировать их техническое состояние в условиях эксплуатации. Практи-

ческая реализация предложенных моделей позволяет повысить эффективность эксплуатации ВЛ 6–35 кВ с изолированными проводами и, в конечном итоге, надежность электроснабжения потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев, Ю.В. Анализ изменения аэродинамических и прочностных свойств изолированных проводов линий электропередачи в условиях эксплуатационных нагрузок [Текст] / Ю.В. Соловьев, А.И. Таджикибаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 3.— С. 9–14.

2. Wareing, J.B. In-depth study into the use of CC

[Текст] / P.A. Chetwood, A.S. Ward.— EATL Report 4687, September 1998.

3. CIGRÉ Technical Brochure.— TB273.— 2005. June.

4. Баргенов, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров [Текст] / Г.М. Баргенов.— М.: Химия, 1984.— С. 280.

УДК 621.317.785.016.25

*Я.Э. Шклярский, Ю.Е. Бунтеев,
А.К. Радковский, В.А. Кузнецов*

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

При оплате электроэнергии предприятием учитывается как активная, так и реактивная составляющая энергии, при этом необходимо их точное измерение.

Все чаще в электрических сетях предприятий возникают высшие гармоники напряжения и тока, вызванные наличием нелинейной нагрузки, что в свою очередь приводит к таким проблемам, как нарушение правильной работы приборов и оборудования, сокращение сроков их службы, а так же, что особенно важно, к неправильному учету реактивной энергии приборами, входящими в системы автоматизированного контроля и учета электроэнергии.

К источникам высших гармоник на промышленных предприятиях следует отнести и преобразователи частоты, применяющиеся в управлении электроприводами, которые могут составлять значительную долю в общей нагрузке.

Сейчас на смену электродинамическим счетчикам пришли электронные, имеющие ряд преимуществ: повышенный класс точности измерений, возможность многотарифного учета, дистанционную передачу данных измерения и др.

Работа электронных счетчиков основана на реализации «измерительного» уравнения, заложенного в его микропроцессор, при заданной конфигурации присоединения прибора к сети.

Современный рынок приборов предлагает несколько типов электронных счетчиков, в которых применяются различные виды выражений для расчета реактивной мощности. Стоит уточнить, что при синусоидальных напряжениях и токах результаты вычисления по всем этим выражениям эквивалентны и (при одних и тех же рабочих условиях) дают равные показания.

При наличии высших гармоник в питающей сети показания счетчиков реактивной энергии разных типов могут быть различны, что ведет к увеличению или снижению затрат на оплату электроэнергии предприятием. Поэтому изучение вопроса совершенствования этих счетчиков и их сравнительный анализ при наличии гармонических искажений в сети весьма актуален.

Данной теме посвящен ряд публикаций, включающих результаты экспериментальных исследований разных типов счетчиков [1–3].

Однако экспериментальные исследования не могут дать полное представление о закономерностях изменения погрешностей измерений.

Для решения этой задачи необходимо оценить расхождение показаний разных типов счетчиков при различном составе гармоник в токе и напряжении, включая учет разности фаз между ними на фиксированных гармониках.

В статье рассматриваются три наиболее распространенных типа счетчиков реактивной энергии, отличающихся «измерительными» уравнениями. Общий принцип измерения реактивной энергии приведен на рис. 1. В зависимости от типа счетчиков в блок-схеме изменяется блок «вычисление».

Первый тип счетчика реализует математическое выражение реактивной мощности, имеющее вид

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i \left(t + \frac{T}{4} \right) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ [U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots] \times \right.$$

$$\times [I_1 \sin(\omega t + 90^\circ) + I_2 \sin(2\omega t + 180^\circ) +$$

$$+ I_3 \sin(3\omega t + 270^\circ) + \dots] \Big\} dt =$$

$$= U_1 I_1 \sin \varphi_1 - U_2 I_2 \cos \varphi_2 - U_3 I_3 \sin \varphi_3 +$$

$$+ U_4 I_4 \sin \varphi_4 = Q_1 - P_2 - Q_3 + P_4 + \dots, \quad (1)$$

где $u(t)$, $i(t)$ — мгновенные значения напряжения и тока; T — период первой гармоники; U_i , I_i — амплитудные значения напряжения и тока для i -той гармоники; ω — частота первой гармоники; t — текущее время; Q_k , P_j — реактивная и активная мощности соответственно k -й и j -й гармоник; φ_i — разность фаз между напряжением и током на i -й гармонике.

В этом случае производится сдвиг времени на четверть периода для тока $-i \left(t + \frac{T}{4} \right)$.

В блоке «Вычисление» определяется численное значение при помощи математической формулы реактивной мощности; кроме того, для первого типа счетчиков реализуется сдвиг фазы напряжения или тока на 90° .

Для *второго типа счетчика* математическое выражение для расчета реактивной мощности имеет вид

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \left(- \int u(t) i(t) dt \right) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \omega \int_0^T (-U_1 \sin \omega t - U_2 \sin 2\omega t - U_3 \sin 3\omega t - \dots) \times$$

$$\times (I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) +$$

$$+ I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots) dt dt =$$

$$= U_1 I_1 \sin \varphi_1 + \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{2} + \dots =$$

$$= Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \dots \quad (2)$$

Для *третьего типа счетчиков* реализуется следующее математическое выражение:

$$Q = \left\{ \sum_0^T \left[\frac{nT}{\omega} \int_0^T i_n(t) \left(\int u_n(\tau) d\tau \right) dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \left\{ \sum_1^\infty \left[\frac{nT}{\omega} \int_0^T I_n(\omega t) \left(\int U_n(\omega t + \varphi) dt \right) dt \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} =$$

$$= (Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где n — номер соответствующей гармоники тока и напряжения.



Рис. 1. Экспериментальная блок-схема измерения реактивной энергии путем аналого-цифрового преобразования величин напряжения и тока и последующей реализации математических формул реактивной мощности и энергии

Таблица 1

Экспериментальные данные о гармониках напряжения и тока на входе частотно-управляемого асинхронного двигателя

Номер гармоники	Напряжение, U_a		Ток, I_a		Фазовый сдвиг между током и напряжением φ , град
	Амплитуда	Фаза, град	Амплитуда	Фаза, град	
1	532,99	38,01	71,269	−31,52	69,53
5	61,66	−0,82	15,447	−2,25	1,43
7	38,72	60,74	7,129	−10,38	71,12

На основе приведенных уравнений в дальнейшем производились расчеты показаний приборов учета реактивной энергии (в форме реактивной мощности).

Для получения реальной картины искажений, возникающих при работе частотно-управляемых приводов, были использованы данные экспериментальных исследований асинхронного двигателя, проведенных авторами совместно со специалистами ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии».

Полученные результаты, представленные в табл. 1, были приняты за исходные.

Для определения закономерности изменения показаний разных типов счетчиков в зависимости от изменения гармонического состава тока и напряжения было принято, что зависимости будут строится при следующих условиях:

величины первой гармоники тока и напряжения остаются неизменными и равными исходным; изменяются поочередно произведение U_5I_5 при постоянном произведении U_7I_7 либо

наоборот. При этом разность фаз между током и напряжением остается неизменной;

при постоянстве действующих значений всех гармонических составляющих тока и напряжения поочередно меняется в пределах от 0 до 90° угол сдвига фаз между напряжением и током сначала пятой гармоники, затем седьмой.

За базисные величины приняты: $Q_6 = = 335000 \text{ ВАр}$, $U_{6i}I_{6i} = 2000 \text{ ВА}$. Для примера на рис. 2 приведены зависимости реактивной энергии от угла сдвига фазы на пятой гармонике.

Погрешность для всех четырех вышеприведенных зависимостей определялась по выражению

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{x_i - x_j}{x_j}, \tag{4}$$

где x_i — большее из сравниваемых показаний, x_j — меньшее из сравниваемых показаний.

Для примера на рис. 3 приведены зависимости погрешностей от угла сдвига фаз между током и напряжением на пятой гармонике для трех типов счетчиков.

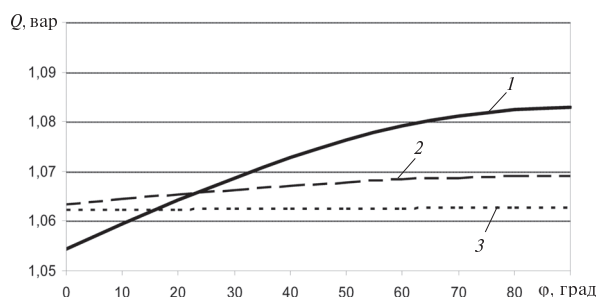


Рис. 2. Зависимость показаний счетчиков трех типов (1, 2, 3) при изменении разности фаз между напряжением и током на пятой гармонике

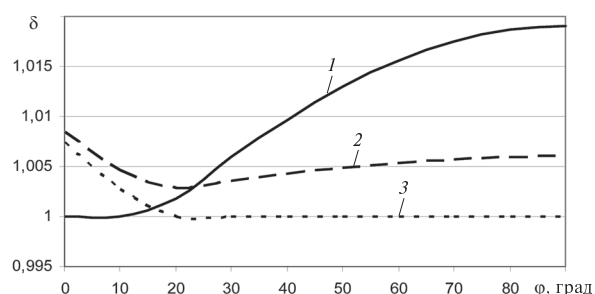


Рис. 3. Зависимость погрешностей для трех типов счетчиков (1, 2, 3) от угла сдвига фаз между током и напряжением на пятой гармонике

Таблица 2

**Расчетные значения погрешностей
трех типов счетчиков реактивной энергии (мощности)
от угла сдвига фаз на 5-й и 7-й гармониках**

Тип счетчика	Максимальная погрешность, %, при изменении			
	$U_5 I_5$	$U_7 I_7$	φ_5	φ_7
1-й	—	—	1,9	0,07
2-й	0,84	6,36	0,84	0,84
3-й	0,75	5,69	0,74	0,72

Максимальные значения рассчитанных погрешностей в процентах представлены в табл. 2.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

выявлено, что наличие гармонических искажений в токе и напряжении питающей сети значительно сказывается на показаниях счетчиков

реактивной энергии и зависит как от амплитуд различных гармоник тока и напряжения, так и от угла сдвига фаз;

определено, что относительная погрешность измерения различными типами счетчиков при определенном соотношении гармоник и величине сдвига фаз между напряжением и током на исходной гармонике может значительно превышать погрешность самого прибора и достигать 6,35 %. Это существенный фактор, который следует учитывать при оплате за электроэнергию;

определено, что наибольшее влияние на погрешность измерения имеют амплитуды гармоник (более 6 %). Разность фаз приводит к ошибке до 2 %;

выполненные теоретические исследования подтверждают ряд экспериментальных данных, полученные в реальных условиях нагрузки. Однако теоретические исследования показали, что погрешность может достигать и больших значений, чем это было установлено при эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Barbaro, P.V.** Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems / P.V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // XVIII IMECO World congress Metrology for a Sustainable Development. 17–22 September, 2006.— Rio de Janeiro, Brazil.

2. **Barbaro, P.V.** A Novel Approach Based on Non-active Power for the Identification of Disturbing Loads

in Power Systems / P.V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // IEEE Transactions on Power Delivery.— 2007. Vol. 22. Issue 3.— P. 1782–1789.

3. **Агунов, М.В.** Новый подход к измерению электрической мощности [Текст] / М.В. Агунов, А.В. Агунов, Н.М. Вербова // Промышленная энергетика.— 2004. № 2.

УДК 621.525:088.8

А.В. Власов

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СРЕДНЕЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

Постоянные магниты — неотъемлемая часть практически всех технических систем. Их изготавливают сотни фирм как в России, так и за рубежом. Спрос на постоянные магниты растет из года в год. Изготавливаются тысячи типоразмеров и форм постоянных магнитов. Однако всем им присущ один маркетинговый недостаток: нет параметров напряженности магнитного поля не только вокруг магнита, но и в его рабо-

чем зазоре. И это, кстати, вполне объяснимо: сами фирмы-изготовители не имеют ни методик расчета, ни технологий, нормирующих параметры окружающего магнит поля. Отсюда и получается, что изготовленный постоянный магнит является «вещью в себе».

Задача получения картины магнитного поля вокруг постоянного магнита и в его рабочих зазорах весьма актуальна.



Рассмотрим, как рассчитать напряженность магнитного поля постоянного магнита на средней линии.

На рис. 1 изображен электромагнит, содержащий обмотку и сердечник с зазором. Обмотка и сердечник — цилиндрической формы. Диаметр сердечника — d , зазор в сердечнике имеет величину δ . Длина средней линии сердечника — $l_{\text{ср}}$. Напряженность магнитного поля в зазоре сердечника определяется по формуле [1]

$$H_{\delta} = \frac{1}{l_{\text{ср}}} \left(-\frac{2F_{\text{Т}}}{\left(\frac{dG_{\text{м}\delta}}{d\delta} \right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{ср}}$ — длина средней линии сердечника, м; $F_{\text{Т}}$ — тяговое усилие электромагнита, в Н, в зазоре δ на пробный ферромагнитный зонд диаметром d ; $G_{\text{м}\delta}$ — магнитная проводимость зазора δ сердечника, Гн; $\frac{dG_{\text{м}\delta}}{d\delta}$ — производная магнитной проводимости зазора по его длине, $\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Для случая $\frac{\delta}{d} < 0,2$ магнитная проводимость зазора $G_{\text{м}\delta}$ сердечника и ее производная $\frac{dG_{\text{м}\delta}}{d\delta}$ могут быть найдены из выражений [1]

$$G_{\text{м}\delta} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}; \quad (2)$$

$$\frac{dG_{\text{м}\delta}}{d\delta} = -\mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta^2}, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянная.

Если в схеме рис. 1 положить, что зазор δ велик (в предельном случае — когда магнитный сердечник находится только внутри обмотки высотой h_0 — зазор будет равен $\delta = l_{\text{ср}} - h_0$), получим

$$G_{\text{м}\delta} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4(l_{\text{ср}} - h_0)}. \quad (4)$$

Тогда

$$\frac{dG_{\text{м}\delta}}{d\delta} = \frac{dG_{\text{м}\delta}}{d(l_{\text{ср}} - h_0)} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4(l_{\text{ср}} - h_0)^2}. \quad (5)$$

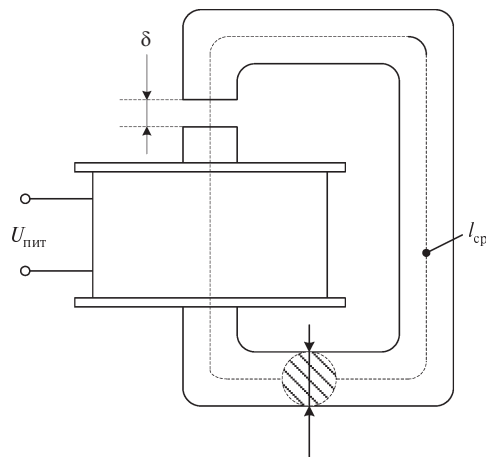


Рис. 1. Средняя линия замкнутого электромагнита

Из [2] находим

$$F_{\text{Т}} = -\frac{\chi S B^2}{2\mu_0 \mu}, \quad (6)$$

где χ — магнитная восприимчивость материала, из которого выполнен пробный зонд при определении тягового усилия (безразмерная величина [2]: $\chi = \mu - 1$); S — площадь поперечного сечения магнитного зазора, м^2 ; B — магнитная индукция в сердечнике, Тл; μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника магнитопровода. Таким образом можно утверждать, что тяговое усилие электромагнита (усилие отрыва пробного зонда) пропорционально площади зонда. Это означает, что если зонд имеет площадь, равную площади поперечного сечения зазора, величину $F_{\text{Т}}$ определяют по формуле (4). Если площадь поперечного сечения зонда S_3 меньше площади поперечного сечения электромагнита S , то формула (4) модифицируется:

$$F_{\text{Т}} = -\frac{\chi S B^2}{2\mu_0 \mu} \frac{S}{S_3} = \chi \frac{S^2 B^2}{2\mu_0 \mu S_3}, \quad (7)$$

причем $S_3 \leq S$. Это первый вопрос, на который должны дать ответ расчеты.

Второй вопрос — как спадает напряженность магнитного поля на заданном расстоянии от источника (полюса).

Формула (1) определяет напряженность магнитного поля у полюса, то есть фактически у источника (стока) магнитного поля. При наличии ферромагнитного сердечника (см. рис. 1) искомая напряженность поля сохранялась бы по

всей длине средней линии магнитопровода. Если же взять случай (рис. 2), когда внутри обмотки находится лишь стержневой ферромагнитный сердечник, то магнитная восприимчивость χ по длине средней линии l_{cp} будет различной, например в случае, когда сердечник — из ферромагнитного материала, а остальная часть контура средней линии — воздух или другая среда (магнитная жидкость в упругой оболочке). В любом случае будет наблюдаться изменение χ по длине средней линии l_{cp} . Максимальная напряженность магнитного поля H_{max} будет у полюсов N и S .

Минимальная напряженность магнитного поля H_{min} будет на линии $I-I$ середины обмотки электромагнита. Величина H_{max} может быть определена по формуле (1). Что касается текущего значения H , то для оценки надо использовать специальные известные соотношения. Одно из таких оценочных соотношений дано в [2]:

$$H = H_{max} e^{-ax^2}, \quad (8)$$

где a — коэффициент, определяемый из экспериментов; x — расстояние текущей точки от полюса по средней линии l_{cp} , причем удаление x от любого полюса не должно превышать половины длины средней магнитной линии:

$$x \leq \frac{l_{cp}}{2}. \quad (9)$$

Методика такова. Из формулы (1) будем иметь

$$F_T = \frac{H_{\delta}^2 l_{cp}^2}{2} \left(\frac{dG_{M\delta}}{d\delta} \right). \quad (10)$$

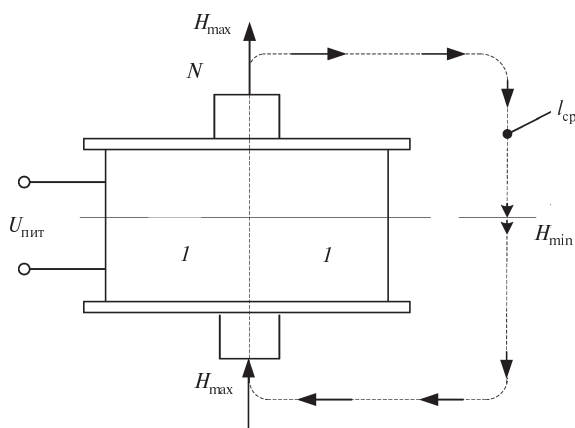


Рис. 2. Средняя линия разомкнутого электромагнита

Берем две характерные точки: полюс N с максимальной напряженностью магнитного поля $H_{\delta} = H_{max}$ и точку на срединной линии $I-I$ (см.

рис. 2), где $x = \frac{l_{cp}}{2}$ и вектор напряженности магнитного поля H_{min} минимален. Для этих двух точек составим отношение для тяговых усилий по уравнению (10):

$$\frac{F_{Tmax}}{F_{Tmin}} = \frac{H_{max}^2}{H_{min}^2}. \quad (11)$$

Отсюда находим минимальную напряженность магнитного поля на средней линии

$$H_{min} = H_{max} \left(\frac{F_{Tmin}}{F_{Tmax}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Итак, для определения H_{min} надо экспериментально измерить F_{Tmax} на полюсе электромагнита и F_{Tmin} на пересечении линии $I-I$ со средней линией магнитного поля. После этого можно переходить к уравнению (6) для определения коэффициента a :

$$e^{-a \frac{l_{cp}^2}{4}} = \frac{H_{min}}{H_{max}}, \quad (13)$$

откуда определим

$$a = \frac{4}{l_{cp}^2} \ln \left(\frac{H_{min}}{H_{max}} \right). \quad (14)$$

Таким образом, методика оценки ясна. Можно переходить к конкретным примерам.

Рассмотрим постоянный кольцевой магнит (рис. 3). Необходимо определить распределение вектора напряженности магнитного поля по срединной линии l_{cp} . Магнит изготовлен из ферромагнетика: D, d, Z — соответственно внешний и внутренний диаметры, толщина магнита. Про магнит кроме этих данных ничего не известно. Задача состоит в том, чтобы оценить $H_{\delta} = H_{max}$ и H_{min} . Вышеизложенное позволяет предложить следующую методику:

1. Изготавливается пробный зонд из стали в виде монеты диаметром $D_3 = \frac{D-d}{2}$ и толщиной $Z_3 = 0,2Z$ (см. рис. 3).

2. Определяется длина средней магнитной линии l_{cp} (рис. 4).

3. На немагнитный диск устанавливается пробный зонд и фиксируется строго по кольцу магнита.

4. С помощью динамометра определяется усилие отрыва, H , пробного зонда от магнита — $F_{пз}$.

5. Определяется тяговое усилие магнита на полюсе по формуле

$$F_T = F_{пз} \frac{S_M}{S_{пз}} = F_{пз} \frac{D^2 - d^2}{(D - d)^2}. \quad (15)$$

6. Определяется максимальная напряженность магнитного поля на полюсе магнита по формуле (1)

$$H_\delta = H_{max} = \frac{1}{l_{cp}} \left(- \frac{2F_T}{\left(\frac{dG_{M\delta}}{d\delta} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{l_{cp} - Z}{l_{cp}} \left(- \frac{8F_{пз}}{\mu_0 \pi (D - d)^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

7. Определяется минимальное тяговое усилие поля магнита на пробный зонд на линии $I-I$ (рис. 4).

В непосредственной близости к линии $I-I$ магнитное поле однородно, поэтому, строго говоря, тяговое усилие на линии $I-I$ для пробного зонда равно нулю (ни полюс N , ни полюс S в силу равноудаленности от пробного зонда на линии $I-I$ силовых предпочтений не имеют). Поэтому пробный зонд фиксируется строго по оси магнита и по линии $I-I$. Далее пробный зонд смещается в любую сторону по линии l_{cp} к любому полюсу на 1–2 мм и определяется усилие, с которым пробный зонд будет притягиваться к близрасположенному полюсу. Усилие притяжения опять определяется с помощью динамометра. Получается значение минимального тягового усилия для пробного зонда $F_{пз min}$.

8. Определяется минимальное тяговое усилие поля магнита на линии $I-I$ (рис. 4) по формуле

$$F_{T min} = F_{пз min} \frac{(D - d)^2}{(D^2 - d^2)}. \quad (17)$$

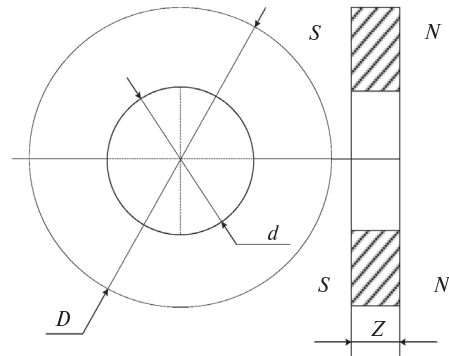


Рис. 3. Кольцевой торцевой магнит

9. Определяется минимальная напряженность магнитного поля магнита на линии $I-I$ по формуле

$$H_{min} = H_{max} \left(\frac{F_{T min}}{F_{T max}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

10. Определяется коэффициент a по формуле

$$a = \frac{4}{l_{cp}^2} \ln \left(\frac{H_{min}}{H_{max}} \right). \quad (19)$$

11. Напряженность магнитного поля в любой точке средней линии магнитного поля магнита может быть определена по формуле

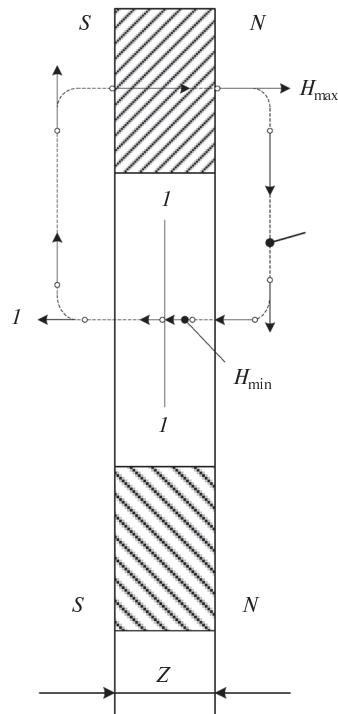


Рис. 4. Средняя линия кольцевого торцевого магнита

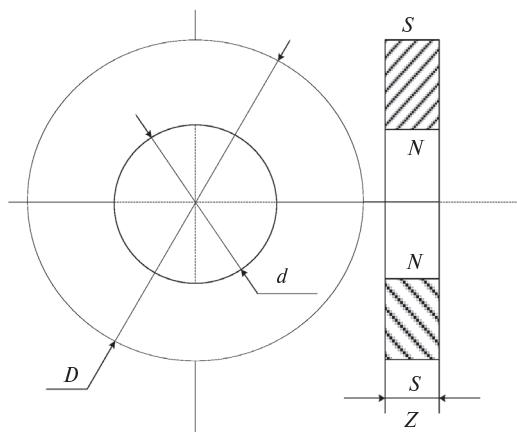


Рис. 5. Кольцевой радиальный магнит

$$H_x = H_{\max} e^{-ax^2}, \quad (20)$$

где $x \leq \frac{l_{\text{cp}}}{2}$ — расстояние от полюса до текущей точки.

Задача решена.

Теперь рассмотрим случай, когда полюса магнита расположены иначе (рис. 5, 6). Особенность здесь состоит в том, что, во-первых, площади полюсов S_N и S_S — разные. И, во вто-

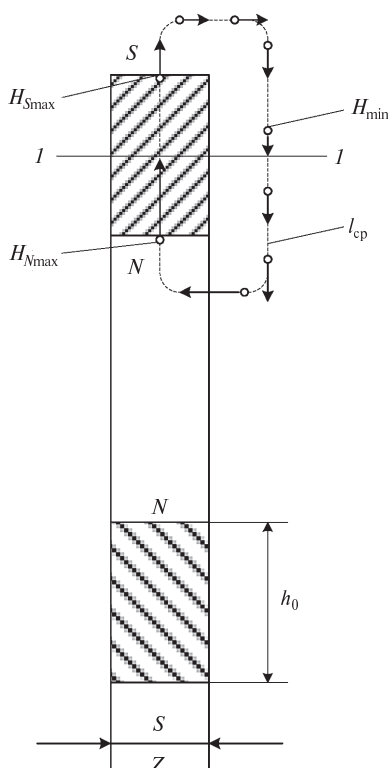


Рис. 6. Средняя линия кольцевого радиального магнита

рых, полюса криволинейные. В случае полюсовки, как на рис. 5, 6, $S_N < S_S$. Отсюда и другая методика определения напряженностей магнитного поля и полюсов и в каждой точке l_{cp} .

Исходя из вышеизложенного методика будет такова:

1. Изготавливается пробный зонд из стали в виде прямоугольного бруска размером $Z \times 0,2 Z \times 0,2 Z \times \frac{1}{36} \pi D$ (см. рис. 5, 6).

2. Определяется длина средней магнитной линии l_{cp} (см. рис. 6).

3. На внешний полюс S устанавливается пробный зонд и фиксируется строго по размеру Z магнита.

4. С помощью динамометра определяется усилие отрыва пробного зонда от магнита $F_{\text{пз}}$, Н.

5. Определяется тяговое усилие магнита на полюсе S по формуле

$$F_{\text{тS}} = F_{\text{пз}} \frac{S_S}{S_{\text{пз}}} = \frac{\pi D Z}{Z \frac{1}{36} \pi D} = 36 F_{\text{пз}}. \quad (21)$$

6. Определяется максимальная напряженность магнитного поля на полюсе S магнита по формуле (1)

$$H_{S\max} = \frac{1}{l_{\text{cp}}} \left(-\frac{2F_{\text{тS}}}{\left(\frac{dG_{\text{мδ}}}{d\delta} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{l_{\text{cp}} - h_0}{l_{\text{cp}}} \left(-\frac{2F_{\text{тS}}}{\mu_0 \pi D Z} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

7. Определяется тяговое усилие магнита на полюсе N по формуле

$$F_{\text{тN}} = F_{\text{тS}} \frac{S_S}{S_N} = 36 F_{\text{пз}} \frac{D}{d}. \quad (23)$$

8. Определяется максимальная напряженность магнитного поля на полюсе N магнита по формуле

$$H_{N\max} = \frac{1}{l_{\text{cp}}} \left(-\frac{2F_{\text{тN}}}{\left(\frac{dG_{\text{мδ}}}{d\delta} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} =$$



$$= \frac{l_{cp} - h_0}{l_{cp}} \left(-\frac{2F_{TN}}{\mu_0 \pi d Z} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (24)$$

9. Определяется минимальное тяговое усилие поля магнита на линии $I-I$ на пробный зонд $F_{пз I-I}$ (см. рис. 6). Тяговое усилие определяется путем смещения пробного зонда от линии $I-I$ к полюсу S .

10. Определяется минимальное значение напряженности магнитного поля на средней линии по сечению $I-I$ по формуле

$$\frac{F_{пз S}}{F_{пз I-I}} = \frac{H_{пз S}^2}{H_{пз I-I}^2} = \frac{H_{Smax}^2}{H_{пз I-I}^2}, \quad (25)$$

откуда

$$H_{пз I-I} = H_{Smax} \left(\frac{F_{пз I-I}}{F_{пз S}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (26)$$

11. Определяется коэффициент a по формуле

$$a = \left| \frac{4}{l_{cp}^2} \ln \left(\frac{H_{пз I-I}}{H_{пз S}} \right) \right|. \quad (27)$$

12. Напряженность магнитного поля в любой точке средней линии l_{cp} от полюса S до линии $I-I$ находится по формуле

$$H_x = H_{Smax} e^{-ax^2}, \quad (28)$$

где $x \leq \frac{l_{cp}}{2}$ — расстояние от полюса S до текущей точки.

13. Напряженность магнитного поля в любой точке средней линии l_{cp} от полюса N до линии $I-I$ определяется по формуле

$$H_x = H_{Nmax} e^{-ax^2}, \quad (29)$$

где $x \leq \frac{l_{cp}}{2}$ — расстояние от полюса N до текущей точки. Задача решена.

Разработанная методика расчета напряженности магнитного поля на средней линии магнита может быть положена в основу инженерных методов расчета и синтеза различных устройств с постоянными магнитами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хазаров, К.И. Проектирование электромагнитных устройств авиационной автоматики [Текст] / К.И. Хазаров. — М.: МАИ, 1993. — 256 с.
2. Иродов, И.Е. Основные законы электромагнетизма [Текст]: учебное пособие / И.Е. Иродов. М.: Высшая школа, 1991. — 288 с.
3. Чалый, А.М. От идеи к производству: моделирование физических процессов в условиях реальных конструкций [Текст] / А.М. Чалый // Современные проблемы электрофизики и электрогид-

родинамики жидкостей: Сб. докл. IX Междунаучной конф. 22–26 июня 2009 г. СПб., 2009.

4. Ромаданов, В.М. Моделирование работы измерительных трансформаторов тока с учетом нелинейных свойств стали и потерь в сердечнике [Текст] / В.М. Ромаданов, М.А. Павлейно // Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей. Сб. докл. IX Междунаучной конф. 22–26 июня 2009 г. — СПб., 2009. — С. 272–275.

УДК 621.3.08

Я.Э. Шклярский, А.В. Круглов, А.Я. Шклярский

УЧЕТ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСКАЖЕНИЯМИ

Эффективность использования электроэнергии зависит от корректного определения затрат на ее использование и генерацию. Причем существенным фактором в этом отношении яв-

ляется разделение затрат на генерацию и передачу электроэнергии.

В условиях дефицита и увеличения стоимости энергоресурсов, роста объемов производства

и инфраструктуры городов все более актуальной становится проблема энергосбережения и, в частности, экономии электроэнергии. Большинство электрических установок наряду с активной мощностью потребляют и реактивную, которая расходуется на создание электромагнитных полей и не идет на совершение полезной работы потребителями. Наличие реактивной мощности снижает качество электроэнергии, приводит к таким явлениям, как дополнительные потери электроэнергии, перегрев проводов, перегрузка подстанций, необходимость завышения мощности трансформаторов и сечения кабелей, просадки напряжения в электросети, увеличение оплаты за электроэнергию.

Оплата за электроэнергию, как правило, осуществляется с учетом активной и реактивной составляющих. До недавнего времени для измерения энергии наиболее широко применялись электродинамические счетчики энергии. На смену им пришли электронные счетчики. К достоинствам последних относятся высокая стабильность, точность, расширенный набор измерительных функций, а также возможность передачи данных при дистанционных измерениях.

Как правило, действие электромеханических счетчиков для измерения реактивной энергии основано на использовании счетчика активной энергии и устройства для сдвига фазы напряжения на 90° . В трехфазных системах измерение реактивной энергии осуществляется на основе соответствующего подсоединения токовых выводов и выводов напряжения в счетчиках активной энергии.

Действие же электронных счетчиков основано на реализации «измерительного» уравнения, введенного в его микропроцессор, при заданной конфигурации присоединения прибора к сети.

Устоявшаяся практика оплаты основана на показаниях счетчиков, причем независимо от их типа. В режимах работы электрической сети с синусоидальными токами и напряжениями их показания отличаются только точностью в зависимости от класса, причем последнее время предпочтение отдается электронным счетчикам. Таким образом, традиционные методы измерения активной и реактивной мощности в синусоидальных режимах удовлетворяют как потребителей, так и поставщиков электроэнергии. Проблемы начинаются при измерении мощности в сети, где как в напряжении, так и в токе, содержатся высшие гармоники. Активная мощ-

ность соответствует той энергии, которая потребляется нагрузкой с учетом всех гармоник, и описывается известным выражением

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t u(t)i(t) dt,$$

где $p = u(t)i(t)$ — мгновенная мощность; $u(t)$ и $i(t)$ — соответственно мгновенные значения напряжения и тока.

Другое дело — реактивная мощность. До сих пор понятие реактивной мощности в несинусоидальных периодических режимах четко не определено. При этом общепринятое определение реактивной мощности теряет смысл, поскольку оно дано только для одной, но любого порядка гармоники.

В дальнейшем речь будет идти о симметричной трехфазной системе. В синусоидальном режиме удобно пользоваться искусственными понятиями полной (S) и реактивной (Q) мощности. Величину Q , несмотря на отсутствие физического смысла, можно измерить. Тогда величина S удобна для определения тока нагрузки и коэффициента мощности:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}; \quad K_{\text{мощн}} = \frac{P}{S}.$$

При наличии высших гармоник картина кардинально меняется. Допустим, мы получили значения реактивной мощности на каждой из гармоник: $Q_1 = P_1 \tan \phi_1$; $Q_2 = P_2 \tan \phi_2$ и т. д. В этом случае действующее значение тока определяется согласно выражению

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \frac{1}{\sqrt{3} \prod_{i=1}^{\infty} U_i} \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^{\infty} U_j \right) P_j^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^{\infty} U_j^2 Q_i^2 \right)}, \quad (1)$$

где U_i и U_j — напряжение i -й и j -й гармоник; P_i и Q_i — соответственно активная и реактивная мощность i -й гармоники.

Выражение (1) никак нельзя связать с общепринятым выражением

$$I = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{\infty} P_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{\infty} Q_i \right)^2}}{3U_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение сети.



Выражение (2) даст неправильное значение действующего значения тока. Значит, использовать понятие реактивной мощности как сумму ее значений на каждой гармонике бессмысленно, оно не несет никакой информации. Об этом неоднократно говорилось в ряде публикаций [1, 3]. Ниже предлагается обоснованный вариант учета электроэнергии и ее оплаты при наличии высших гармоник в электрической сети.

Известны счетчики реактивной энергии разных типов [1]:

электромеханические счетчики, определяющие мощность практически только основных гармоник напряжений и токов исходя из выражения $Q_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin \varphi_1$, где Q_1 , U_1 , I_1 , φ_1 — соответственно реактивная мощность, напряжение, ток и сдвиг фаз на первой гармонике;

электронные счетчики, определяющие мощность по выражению

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i \left(t - \frac{T}{4} \right) dt;$$

электронные счетчики, работающие соответственно выражению

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \omega_1 \left(-i(t) \int_0^t u(t) dt \right) dt;$$

электронные счетчики, определяющие реактивную мощность как

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Отметим, что при использовании любого из упомянутых выше счетчиков оплата производится не за затраченную поставщиком электроэнергию (кроме первого полупериода), а за ее передачу.

За что платит потребитель при получении электроэнергии от поставщика?

Синусоидальный ток, являясь носителем энергии, можно представить как сумму активной и реактивной составляющих:

$$\dot{I} = I_a + jI_p,$$

где I_a — активная, а I_p — реактивная составляющие тока.

При условии постоянства напряжения для

трехфазной сети $I_a = \frac{P}{\sqrt{3}U}$; $I_p = \frac{Q}{\sqrt{3}U}$, или

$$I_a = \frac{S}{\sqrt{3}U} \cos \varphi; \quad I_p = \frac{S}{\sqrt{3}U} \sin \varphi.$$

С другой стороны, если левую и правую части выражения

$$P + jQ = \dot{S} \quad (3)$$

разделить на величину $\sqrt{3}U$ (которая в данном случае — просто постоянный коэффициент), то

$$\frac{\dot{S}}{\sqrt{3}U} = \frac{S}{\sqrt{3}U} \cos \varphi + j \frac{S}{\sqrt{3}U} \sin \varphi = I_a + jI_p.$$

Таким образом, при оплате первой составляющей в выражении (3) оплачивается активная мощность в масштабе активной составляющей полного тока. При этом может быть учтен класс точности приборов и погрешность, вызываемая изменением напряжения. Последняя не может превышать $\pm 5\%$.

Вторая составляющая в (3) — реактивная мощность, которая прямо пропорциональна реактивной составляющей полного тока.

При наличии реактивной мощности и при ее изменении полный ток меняется не прямо пропорционально реактивной мощности, а значи-

тельно меньше, так как $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$. Прямо пропорционально реактивной мощности ток меняется только в маловероятном случае — чисто реактивной нагрузки.

Если оплата активной мощности прямо пропорциональна связана с затратами на выработку электроэнергии, то с чем связана оплата за реактивную энергию? Затраты могут быть связаны только с ее передачей. Эти затраты возрастают значительно в меньшей степени, чем рост реактивной мощности. Все это касается установившегося синусоидального режима.

Перейдем к несинусоидальному режиму. Активная мощность определяется выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = P_1 + P_2 + \dots + P_\infty.$$

Отсюда следует, что активная мощность, а значит, и электроэнергия определяются суммой составляющих всех гармоник. Ее определяет счетчик любой системы. Подчеркнем, что и в этом случае все соответствует физике процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии.

Очевидно, что полная мощность, определяемая по выражению

$$S_1 = UI = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_\infty^2} \times$$

$$\times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_\infty^2}, \quad (4)$$

и полная мощность $S_{II} = \sqrt{P^2 + Q^2}$ — не совпадают. Об этом написано достаточно статей [2, 3]. Причем величина Q может быть определена любым из счетчиков реактивной электроэнергии. Но какую информацию несет эта величина? Общий ток в линии, пользуясь величиной Q , определить невозможно, так же как и добавку реактивной, или (лучше говорить) неактивной составляющей, тока. Очевидно, что ток в этом случае следует определять только по выражению (1).

Вычислять величину S_{II} только для того, чтобы сравнить с ранее сосчитанной величиной S_I и определить так называемую мощность искажения $T = \sqrt{S_I^2 - P^2 - Q^2}$ не имеет смысла, так как T несет только качественную информацию о наличии высших гармоник. Количественную же информацию, а не только качественную, несут коэффициенты несинусоидальности по току и напряжению, а также их спектры. Однако из сказанного следует, что все искусственно вводимые коэффициенты, содержащие мощность искажения, или подразумевающие ее токи не несут полезной информации. К ним относятся:

коэффициент сдвига

$$K_{сдв} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}};$$

коэффициент искажения

$$K_{иск} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}};$$

коэффициент гармоник

$$K_{гarm} = \frac{T}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{K_{иск}}\right)^2 - 1}.$$

Единственно реально используемым коэффициентом следует признать коэффициент мощности

$$K_{мощн} = \frac{P}{S_I},$$

причем величина S_I должна определяться по выражению (4). Этот коэффициент характеризуется как в синусоидальном, так и любом режиме неиспользованный резерв активной мощности.

Как же можно увеличить $K_{мощн}$? Очевидно, что если величина $S_I^2 - P^2$ равна нулю, то в этом случае отсутствуют и высшие гармоники и реактивная мощность. Также очевидно, что если скомпенсировать реактивную мощность на каждой из гармоник в отдельности, эта величина станет равной нулю.

По всей видимости, эту задачу просто так не решить, и можно предположить, что при наличии высших гармоник не удастся получить коэффициент мощности равным единице, кроме случая применения дорогих активных фильтров.

Поскольку реактивная мощность не имеет физического смысла, то и пользоваться этой величиной при оплате в несинусоидальном режиме, вероятно, некорректно.

Исходя из сказанного можно предложить два варианта оплаты за электроэнергию:

первый вариант — оплату производить по частям — за активную энергию и полный ток. Оплата за активную энергию не вызывает сомнения и соответствует общепринятой практике и физике процесса передачи энергии. Оплата за полный ток (1) позволит учесть затраты на передачу полной мощности по линии электропередачи. Для реализации этого варианта должны быть использованы счетчики активной энергии и интегральный счетчик тока, показания которого

должны определяться выражением $\int_0^t i dt$;

второй вариант — оплату производить аналогично оплате в синусоидальном режиме. В этом случае определяется полная мощность по выражению (4) и вычисляется неактивная мощность

$$M = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Тогда составляющая тока, не относящаяся к активной мощности, будет соответствовать неактивной мощности M . Отсюда и вариант оплаты за электроэнергию — за активную и неактивную энергии. Этот вариант соответствует оплате за активную и реактивную электроэнергию в синусоидальном режиме.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арсенко, Р.** Выбор счетчиков для коммерческого измерения электроэнергии на нагрузках, генерирующих гармоники [Текст] / Р. Арсенко, М.В. Хьюз // 11 международная конференция «Гармоники и качество электроснабжения». — США, Лейк Плейсид. 12–15 сентября 2004 г.

2. **Агунов, М.В.** Новый подход к измерению электрической мощности [Текст] / М.В. Агунов,

А.В. Агунов // Промышленная энергетик. — 2004. № 2. — С. 30–33.

3. **Филипски, П.С.** Оценка работы счетчиков реактивной энергии при наличии искажений высокими гармониками [Текст] / П.С. Филипски, П.В. Лабadis // IEEE. Энергосбережение. — 1992. Т. 7. № 4. — С. 1793–1799.

УДК 621.313

И.З. Богуславский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ В ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКЕ МОЩНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПОСРЕДСТВОМ ЗАМКНУТОЙ АКТИВНОЙ ЦЕПНОЙ СХЕМЫ

Постановка задачи

Задачи исследования процессов в демпферных обмотках мощных явнополюсных и неявнополюсных генераторов (дизельных, гидрогенераторов, турбогенераторов), а также в демпферных обмотках мощных явнополюсных и неявнополюсных двигателей (для привода размоных агрегатов, компрессоров, вентиляторов и др. с пуском от сети или при длительной работе с преобразователем частоты) сформулированы требованиями современной практики их эксплуатации. Демпферная обмотка участвует как в кратковременных переходных режимах машины, так и в длительных асинхронных.

Для исследования кратковременных переходных режимов в этих машинах можно принять следующее допущение: в таких режимах достаточно учитывать лишь первую гармонику МДС токов демпферной обмотки, индуцированных первой гармоникой результирующего потока взаимодукции (поток в зазоре). Эта гармоника МДС вращается в ту же сторону, что и ротор; ей может быть поставлена в соответствие [1] симметричная короткозамкнутая многофазная обмотка, в которой токи по стержням распределены по гармоническому закону. Амплитуда токов во всех стержнях этой обмотки одинакова. То же справедливо и для амплитуды токов всех участков короткозамыкающих колец между стержнями

[1]. Такую обмотку (с числом фаз m_ϕ) нетрудно преобразовать и представить в виде двухфазной ($m_\phi = 2$), оси которой ортогональны. Из анализа осциллограмм токов и напряжений обмоток статора и возбуждения в кратковременных переходных режимах следует, что с достаточной для практики точностью такое представление демпферной обмотки справедливо. Длительность этих режимов (наброс нагрузки, короткие замыкания в сети или на зажимах машины и др.) определяется практически постоянными времени затухания обмоток; в соответствии со значениями этих постоянных выставляется и время срабатывания защит.

Однако при создании мощных современных синхронных машин необходимо учесть возможность их эксплуатации в более длительных режимах: асинхронных (при работе в нелинейной сети с преобразователем частоты [2–5], при возникновении несимметрии токов в обмотке статора, при прямом пуске [1, 2] и др.). Например: режимы работы генератора или двигателя в нелинейной сети не ограничены во времени; при возникновении несимметрии токов статора защита от токов обратной последовательности срабатывает с выдержкой времени $\Delta t = 8–10$ с; длительность пуска от сети мощного двигателя может составлять $\Delta t = 20–50$ с. Процесс роста температуры в элементах демпферной обмотки

в течение таких периодов времени Δt с достаточной для практики точностью принято считать адиабатическим; средний перегрев $\Delta\Theta_{\text{ср}}$ ограничивается [2] обычно для массива медной клетки значениями $\Delta\Theta_{\text{ср}} < 150-180^\circ\text{C}$. Однако в пределах этого среднего значения $\Delta\Theta_{\text{ср}}$ температуры отдельных стержней значительно различаются: токи в стержнях не распределены по гармоническому закону [5–7]. В результате возможны повреждения демпферной обмотки из-за различной по величине тепловой деформации отдельных стержней; они особенно часты при тяжелых пусках двигателей с механизмами на валу, отличающимися значительными электрохимическими постоянными времени $T_{\text{эл}} > 3$ с. Примерами таких повреждений являются, например, обрывы стержней в пазу или на выходе из паза, нарушение контакта на стыке стержень — короткозамыкающее кольцо и др.

Таким образом, обеспечение надежной работы машин в асинхронных режимах привело к необходимости исследования токов и их распределения в демпферной обмотке: предположение о гармоническом их распределении по стержням [1] для этих режимов недостаточно. Исходя из результатов этих исследований можно определить допустимую мощность машины (например, с учетом спектра высших временных гармоник при наличии в сети преобразователей частоты), а также и допустимую длительность эксплуатации в этих режимах.

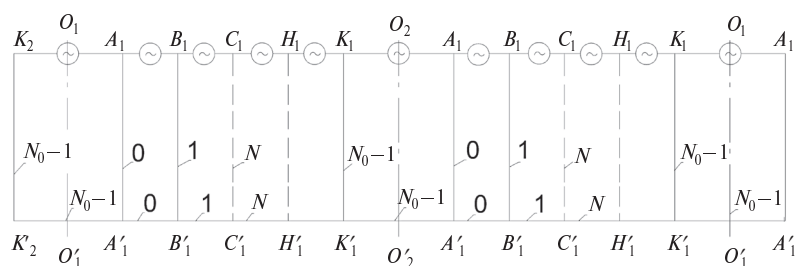
Для исследования токов в демпферных обмотках машин различных типов при их работе в таких режимах рассмотрим сначала общую задачу. Предложим математическую модель демпферной обмотки синхронных машин (явнополюсных и неявнополюсных, в том числе турбодвигателей и генераторов) с учетом особенностей их конструкции. Эти особенности конструкции изложены в четвертом разделе статьи.

В качестве такой модели используем [4] замкнутую активную цепную схему (см. рис.). Из решения соответствующих уравнений следует распределение токов в ее продольных и поперечных элементах [5–7]. Обобщение результатов этого решения позволяет определить токи в стержнях и участках короткозамыкающих колец демпферных обмоток синхронных машин в различных асинхронных режимах. Гармоники МДС этих токов и токов обмотки статора входят в систему уравнений магнитосвязанных контуров [5], определяющих асинхронные режимы, перечисленные выше.

Особенности замкнутой цепной схемы для моделирования токов в демпферных обмотках

Сопротивления элементов схемы. Они имеют следующие особенности: сопротивления ее поперечных элементов (см. рис.) $A_1A'_1$, $B_1B'_1$, ..., $K_1K'_1$ и соответственно $A_2A'_2$, $B_2B'_2$, ..., $K_2K'_2$ одинаковы и равны Z_B ; сопротивления ее продольных элементов A_1B_1 , B_1C_1 , ..., H_1K_1 и $A'_1B'_1$, $B'_1C'_1$, ..., $H'_1K'_1$, а также соответственно A_2B_2 , B_2C_2 , ..., H_2K_2 и $A'_2B'_2$, $B'_2C'_2$, ..., $H'_2K'_2$ одинаковы и равны Z_R . Таким образом, мы имеем в цепной схеме две симметричные группы элементов: одна ограничена поперечными элементами $A_1A'_1$ и $K_1K'_1$, а вторая — поперечными элементами $A_2A'_2$ и $K_2K'_2$. Между этими двумя симметричными группами в схеме имеются четыре продольных элемента: K_1A_2 , $K'_1A'_2$ и соответственно K_2A_1 , $K'_2A'_1$. Их сопротивления тоже одинаковы и равны Z_F . Отметим, что в общем случае $Z_F \neq Z_R \neq Z_B$. Такую несимметричную цепную схему назовем регулярной.

Обозначим порядковые номера поперечных элементов первой симметричной группы этой



Замкнутая активная регулярная цепная схема



схемы так: $N = 0, 1, 2, \dots, N-1, N, \dots, N_0-1$. Таким образом, предполагается, что группа содержит $N_0 > 1$ поперечных элементов и $2 \cdot (N_0 - 1)$ продольных. Каждому продольному элементу, заключенному между двумя поперечными с номерами $N+1$ и N , присвоим номер N , а контур, заключенный между этими элементами, обозначим $(N+1, N)$. Всего в каждой симметричной группе содержится N_0 таких контуров.

ЭДС в звеньях схемы. Замкнутая цепная схема (см. рис.) является активной: в каждом ее контуре содержатся ЭДС. Они имеют следующие особенности: ЭДС в каждой симметричной группе из N_0 контуров равны по амплитуде, но отличаются по фазе, причем фаза этих ЭДС изменяется от номера N по линейному закону.

Обозначим ЭДС контуров первой группы теми же индексами, что и сами контуры, но с верхним индексом «С». Например, ЭДС контура $(1, 0)$ имеет вид $E_{1,0}^C$, а контура $(N+1, N)$ соответственно $E_{N+1,N}^C$. С учетом этих обозначений имеем

$$E_{N+1,N}^C = E_M \exp[j(\omega t - \varphi_N)] = E_M \exp[j(-kN)],$$

где

$$E_M = E_M \exp[j(\omega t - \varphi_0)], \quad \varphi_N = \varphi_0 + kN. \quad (1)$$

Из соотношений (1) следует физический смысл коэффициента k :

$$k = \varphi_{N,N+1} - \varphi_N = \Delta\varphi. \quad (2)$$

Здесь E_M — комплексная амплитуда ЭДС контура; E_M — ее величина (модуль); ω — круговая частота тока; t — время; φ_0 — начальный фазовый угол. Из соотношения (2) получаем: коэффициент k в (1) характеризует угол сдвига фаз $\Delta\varphi$ между ЭДС соседних контуров цепной схемы: $k = \text{idem}$. В этом состоит одна из особенностей рассматриваемого вида регулярных схем: ЭДС контуров симметричной группы изменяется в зависимости от номера продольного элемента N по гармоническому закону. Например, для контуров первой группы имеем:

$$E_{1,0}^C = E_M \exp(j0) \text{ — ЭДС контура } (1, 0);$$

.....

$$E_{5,4}^C = E_M \exp[j(-\Delta\varphi 4)] \text{ — ЭДС контура } (5, 4);$$

.....

$$E_{N+3,N+2}^C = E_M \exp[j(-\Delta\varphi(N+2))] \text{ — ЭДС контура } (N+3, N+2). \quad (3)$$

Определим теперь положение оси отсчета углов φ для ЭДС второй симметричной группы. Мы уже установили, что фазовый сдвиг ЭДС контуров в обеих группах с симметричными элементами равен $\Delta\varphi$.

Рассмотрим предварительно контур $K_2 A_1 A'_1 K'_2 K_2$ между обеими группами. Примем, что ЭДС этого контура имеет фазовый угол $\varphi_0 = 0$, фазовый сдвиг $\Delta\varphi = 0$ (начало отсчета углов). Тогда ЭДС этого контура имеет вид

$$E_{K_2 A_1 A'_1 K'_2 K_2}^C = E_F \exp(j0),$$

где $E_F = E_F \exp(j\omega t)$; здесь E_F — амплитуда ЭДС E_F .

Примем также, что ЭДС второго контура $K_1 A_2 A'_2 K'_1 K_1$ между обеими группами имеет вид (см. рис.): $E_{K_1 A_2 A'_2 K'_1 K_1}^C = E_F \exp(-\pi)$, т. е. сдвинута по фазе относительно ЭДС $E_{K_2 A_1 A'_1 K'_2 K_2}$ на угол π : $E_{K_2 A_1 A'_1 K'_2 K_2} = -E_{K_1 A_2 A'_2 K'_1 K_1}$. Следовательно, в пределах первой симметричной группы угол φ изменяется в диапазоне $0 \leq \varphi \leq \pi$, а в пределах второй группы — $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$. Например, для ЭДС контура $(N+3, N+2)$ второй симметричной группы имеем

$$E_{N+3,N+2}^C = E_M \exp[j(-\Delta\varphi(N+2) - \pi)] = -E_{N+3,N+2}^C. \quad (1')$$

Из этих выражений определяется начальный фазовый угол для ЭДС контуров обеих симметричных групп

$$\varphi_0 = 0,5[\pi - \Delta\varphi(N_0 - 2)]. \quad (4)$$

Приведенные соотношения — основа математической модели для исследования токов в элементах демпферных обмоток мощных синхронных машин в виде замкнутой активной регулярной цепной схемы.

Исследование распределения токов в элементах цепной схемы

Уравнения для токов в элементах цепной схемы. Исходными при исследовании этих токов являются (см. рис.):

полные сопротивления продольных элементов Z_R и поперечных элементов Z_B ;

ЭДС в каждом звене цепной схемы $E_{N+1,N}$.

Выделим контур $(N + 2, N + 1)$ в первой симметричной группе элементов (при $0 \leq \varphi \leq \pi$) и запишем для него второе уравнение Кирхгофа [4]:

$$\begin{aligned} & [J(N + 2) - J(N + 1)]Z_B - \\ & - 2I(N + 1)Z_R = E_{N+2, N+1}^C, \end{aligned} \quad (5)$$

где J, I — комплексные амплитуды токов соответственно в поперечных и продольных элементах этой группы, а ЭДС $E_{N+2, N+1}^C$ — согласно (3) в виде

$$\begin{aligned} E_{N+2, N+1}^C &= E_M \exp[-j\Delta\varphi(N + 1)] = \\ &= E_M \exp(-j\Delta\varphi) \exp(-j\Delta\varphi N), \end{aligned} \quad (6)$$

где E_M соответствует (1).

С учетом первого закона Кирхгофа [4] после преобразования (5) получаем

$$\begin{aligned} I[N + 2] - (2 + \sigma)I[N + 1] + I[N + 0] &= \\ &= \frac{1}{Z_B} E_M \exp(-j\Delta\varphi) \exp(-j\Delta\varphi N), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma = 2 \frac{Z_R}{Z_B}$.

Решение разностного уравнения (7) представим в виде двух слагаемых [8]:

$$I_N^C = I'_N + I''_N. \quad (8)$$

Первое слагаемое в (8) вычисляется из однородного разностного уравнения [8]

$$I[N + 2] - (2 + \sigma)I[N + 1] + I[N + 0] = 0. \quad (9)$$

Отметим, что оно соответствует распределению токов в пассивной цепной схеме. Решение этого уравнения [4–8] имеет вид

$$I'_N = C_1 a_1^N + C_2 a_2^N, \quad (9')$$

где C_1, C_2 — постоянные, определяемые граничными условиями для данной группы элементов. Эти условия формулируются с учетом конкретных особенностей структуры активной цепной схемы. Величины a_1 и a_2 определяются из решения характеристического уравнения второй степени [8], которое соответствует (9):

$$a_{1,2} = \frac{2 + \sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\sigma}}{2}.$$

Проведем анализ некоторых особенностей решения (9') разностного уравнения (9). Примем

для определенности, что знак плюс в уравнении для $a_{1,2}$ относится к величине a_1 , а знак минус — к величине a_2 , так что $|a_2| < |a_1|$, причем $|a_1| > 1$, а $|a_2| < 1$. Представим обе эти комплексные величины следующим образом:

$$a_1 = |a_1| \exp(j\psi_1); \quad a_2 = |a_2| \exp(j\psi_2);$$

здесь ψ_1, ψ_2 — фазовые углы ($\psi_1 \neq \psi_2$).

Тогда выражение для тока I'_N можно представить в виде

$$I'_N = C_1 |a_1|^N \exp(jN\psi_1) + C_2 |a_2|^N \exp(jN\psi_2).$$

Следовательно, в этом уравнении два слагаемых тока I'_N по-разному изменяют свои амплитуды и фазы с изменением номера N элементов контура. У первого слагаемого с ростом номера N амплитуда увеличивается, у второго слагаемого она с ростом N уменьшается; у обоих слагаемых тока I'_N с ростом номера N изменяются и фазы, однако закон их изменения различен ($\psi_1 \neq \psi_2$).

Соотношения между постоянными C_1 и C_2 определяют различные возможные варианты зависимости тока I'_N в продольных элементах от номера контура N .

Второе слагаемое I''_N в (8) является частным решением уравнения (7).

Представим это частное решение в виде

$$I''_N = \frac{E_M}{Z_B K_B} \exp(-j\Delta\varphi N). \quad (10)$$

Здесь сомножитель K_B — коэффициент пропорциональности, подлежащий определению [8].

После преобразований получаем из (7), (10)

$$\begin{aligned} K_B &= [1 - (2 + \sigma) \exp(-j\Delta\varphi) + \exp(-j2\Delta\varphi)] \times \\ &\times \exp(j\Delta\varphi). \end{aligned} \quad (11)$$

В результате выражение для токов в продольных элементах первой группы цепной схемы (при $0 \leq \varphi \leq \pi$) получаем в виде трех компонент:

$$\begin{aligned} I_N^C &= I'_N + I''_N = \\ &= C_1 a_1^N + C_2 a_2^N + \frac{E_M}{Z_B K_B} \exp[j(-\Delta\varphi N)]. \end{aligned} \quad (12)$$

(Ток в (12) для $I_{(N)}^C$ и ток в (13) для $J_{(N)}^C$ этой симметричной группы элементов здесь и далее



снабжен индексом «С», а токи в тех же элементах второй группы — индексом «Ю»).

Выражение для токов в поперечных элементах первой группы также содержит три компоненты:

$$J_N^C = C_1 a_1^{N-1} (a_1 - 1) + C_2 a_2^{N-1} (a_2 - 1) + \frac{E_M}{Z_B K_B} [1 - \exp(j\Delta\varphi)] \exp[j(-\Delta\varphi N)]. \quad (13)$$

В практических расчетах иногда удобно представить третье слагаемое в (12), (13) иначе. Для этого преобразуем в (13) сомножитель $D = 1 - \exp(j\Delta\varphi) = \exp(j0,5\Delta\varphi) [-2j \sin(0,5\Delta\varphi)]$. В последнем выражении для D первый сомножитель определяет фазовый сдвиг, а второй — амплитуду величины D .

С учетом этого преобразования выражение для распределения токов в поперечных элементах этой группы примет вид

$$J_N^C = C_1 (1 - a_2) a_1^N + C_2 (1 - a_1) a_2^{N-1} + \frac{E_M}{Z_B K_B} [-2j \sin(0,5\Delta\varphi)] \times \exp(j0,5\Delta\varphi) \exp[j(-\Delta\varphi N)]. \quad (13')$$

Перейдем к определению токов во второй симметричной группе (при $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$). Исходя из (1') можно было бы предположить, что токи в продольных элементах второй группы соответственно равны по амплитуде и противоположны по знаку токам первой, то есть сдвинуты во времени на угол $\varphi = \pi$. Такое же предположение может быть сформулировано и для токов в поперечных элементах обеих групп. Эти предположения очевидны для последней из трех компонент токов в уравнениях (12)–(15). Однако для первых двух компонент токов в уравнениях (12)–(15), которые изменяются от номера N по аperiодическому закону, а не по гармоническому, это предположение требует доказательства: необходимо установить, что для второй симметричной группы (при $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$) эти компоненты не имеют дополнительных фазовых сдвигов относительно гармонической компоненты.

Уравнение для токов в продольных элементах второй группы (при $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$) аналогично (12) с учетом (1'):

$$I_N^{\text{Ю}} = C_1' a_1^N + C_2' a_2^N - \frac{E_M}{Z_B K_B} \exp[j(-\Delta\varphi N)], \quad (14)$$

а для токов в поперечных элементах этой группы — аналогично (13):

$$J_N^{\text{Ю}} = C_1' (1 - a_2) a_1^N + C_2' (1 - a_1) a_2^{N-1} - \frac{E_M}{Z_B K_B} [1 - \exp(j\Delta\varphi)] \exp[j(-\Delta\varphi N)], \quad (15)$$

где C_1' , C_2' — постоянные, определяемые граничными условиями для второй группы элементов.

Полученные уравнения (12)–(15) устанавливают закон распределения токов в элементах замкнутой активной регулярной цепной схемы с точностью до четырех постоянных C_1 , C_2 , C_1' , C_2' .

Постоянные в уравнениях для токов в элементах цепной схемы. Для определения постоянных C_1 – C_2' воспользуемся уравнениями по обоим законам Кирхгофа, которые устанавливают связь между токами в элементах обеих симметричных групп цепной схемы.

Предварительно обозначим:

$$C_0 = \frac{E_M}{Z_B K_B}; \quad a_0 = \exp[j(-\Delta\varphi)]. \quad (16)$$

Эти обозначения облегчают контроль результатов при выполнении алгебраических преобразований: все три слагаемых для токов принимают в выражениях (12)–(15) единообразный вид. Отметим, что $C_0 = -C_0'$ в соответствии с (1').

Согласно первому закону Кирхгофа для токов в элементах обеих групп имеем (см. рис.)

$$I_{N_0-2}^C + J_{N_0-1}^C = I_0^{\text{Ю}} - J_0^{\text{Ю}}; \quad (17)$$

$$I_{N_0-2}^{\text{Ю}} + J_{N_0-1}^{\text{Ю}} = I_0^C - J_0^C. \quad (18)$$

Согласно второму закону Кирхгофа для ЭДС контуров $K_2 A_1 A_1' K_2' K_2$ и $K_1 A_2 A_2' K_1' K_1$ (рис. 1) получаем

$$(J_0^C - J_{N_0-1}^{\text{Ю}}) Z_B - 2I_{N_0-1}^{\text{Ю}} Z_F = E_{K_2 A_1 A_1' K_2' K_2}; \quad (19)$$

$$(J_0^{\text{Ю}} - J_{N_0-1}^C) Z_B - 2I_{N_0-1}^C Z_F = E_{K_1 A_2 A_2' K_1' K_1}. \quad (20)$$

Отметим, что согласно изложенному в первом разделе, имеет место соотношение: $E_{K_1 A_2 A_2' K_1' K_1} = -E_{K_2 A_1 A_1' K_2' K_2}$. Обозначим $E_{K_2 A_1 A_1' K_2' K_2} = E_F$.

Четыре уравнения, (17)–(20), образуют систему, неизвестными в которой являются четыре постоянные C_1 , C_2 , C_1' , C_2' . Учтем, что между токами в продольных и в поперечных элементах (см. рис.), входящих в уравнения системы, со-

гласно первому закону Кирхгофа справедливы соотношения

$$J_0^{\text{Ю}} = I_0^{\text{Ю}} - I_{(-1)}^{\text{Ю}}; \quad J_{N_0-1}^{\text{С}} = I_{N_0-1}^{\text{С}} - I_{N_0-2}^{\text{С}}. \quad (21)$$

После алгебраических преобразований уравнений этой системы с учетом соотношений для токов (21) получаем ее в виде

$$\begin{aligned} C_1 D + C_2 E + C'_1 A + C'_2 B &= \Pi_1; \\ C_1 A + C_2 B + C'_1 D + C'_2 E &= -\Pi_1; \\ C_1 F + C_2 G + C'_1 H + C'_2 K &= \Pi_2; \\ C_1 H + C_2 K + C'_1 F + C'_2 G &= -\Pi_2. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь коэффициенты в левой части уравнений системы: $A = Z_B(1 - a_2)$; $B = Z_B(1 - a_1)$; $D = Z_B a_1^{N_0-2}(1 - a_1) - 2a_1^{N_0-1} Z_F$; $E = Z_B a_2^{N_0-2}(1 - a_2) - 2a_2^{N_0-1} Z_F$; $F = a_1^{N_0-1}$; $G = a_2^{N_0-1}$; $H = -a_2$; $K = -a_1$.

Правые части уравнений системы:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= -E_F + C_0 Z_B(1 - a_0^{-1}) + \\ &+ C_0 [Z_B a_0^{N_0-2}(a_0 - 1) + 2Z_F a_0^{N_0-1}]; \\ \Pi_2 &= -C_0(a_0^{N_0-1} + a_0^{-1}). \end{aligned}$$

Найдем неизвестные C_1, C_2, C'_1, C'_2 этой системы:

$$\begin{aligned} C_1 &= D_1/D_0; \quad C_2 = D_2/D_0; \quad C'_1 = D'_1/D_0; \\ C'_2 &= D'_2/D_0. \end{aligned}$$

Здесь D_0 — определитель системы; D_1, D_2, D'_1, D'_2 — ее дополнения. Из несложных алгебраических преобразований следует $D_1 + D'_1 = 0$; $D_2 + D'_2 = 0$.

Анализ системы (22) показывает, что при значениях полных сопротивлений $Z_B \neq 0, Z_F \neq 0, Z_R \neq 0$ ее определитель $D_0 \neq 0$. Поэтому в этой системе коэффициенты при неизвестных удовлетворяют соотношениям

$$C_1 = -C'_1; \quad C_2 = -C'_2. \quad (23)$$

В результате получаем $J_N^{\text{Ю}} = -J_N^{\text{С}}; I_N^{\text{Ю}} = -I_N^{\text{С}}$, так что для определения коэффициентов C_1 и C_2 достаточно решить систему уравнений лишь второго порядка

$$\begin{aligned} C_1(D - A) + C_2(E - B) &= \Pi_1; \\ C_1(F - H) + C_2(G - K) &= \Pi_2. \end{aligned}$$

Постоянные C_1 и C_2 получаем в виде

$$C_1 = D_3/D_0; \quad C_2 = D_4/D_0. \quad (24)$$

Здесь, как и прежде, D_0 — определитель системы, D_3, D_4 — ее дополнения:

$$\begin{aligned} D_0 &= 2(a_1 - a_2) + a_1^{N_0}(a_2 - 2 - \sigma') - \\ &- a_2^{N_0}(a_1 - 2 - \sigma') + a_1^{N_0-1} - a_2^{N_0-1}; \\ D_3 &= \left(\frac{-E_F}{Z_B} + C_0 K_{\sigma 0} \right) (a_2^{N_0-1} + a_1) + \\ &+ C_0 \{ \exp[-j\Delta\varphi(N_0 - 1)] + \exp(j\Delta\varphi) \} K_{\sigma 2}; \\ K_{\sigma 0} &= 1 + (2 + \sigma') \exp[-j\Delta\varphi(N_0 - 1)] - \\ &- \exp[-j\Delta\varphi(N_0 - 2)]; \\ \sigma' &= 2 \frac{Z_F}{Z_B}; \quad K_{\sigma 2} = a_2^{N_0-2} - (2 + \sigma') a_2^{N_0-1} - 1. \end{aligned} \quad (25)$$

При замене в D_3 величин a_1 на a_2 и соответственно a_2 на a_1 получается значение $(-D_4)$; используя его нетрудно вычислить C_2 по (24).

Пример расчета. Проверка результатов

Найдем распределение токов в элементах замкнутой регулярной активной цепной схемы (см. рис.) при следующих исходных данных: $N_0 = 5$; $Z_B = 1,1 \exp(j85,048)$; $2Z_R = 0,50667 \times \exp(j87,06)$; $\Delta\varphi = 31,5$; φ_0 соответственно (4); $2Z_F = 1,0133 \exp(j87,06)$; $E_F = -j13,423 \exp(j0)$; $E_M = -j8,0265 \exp(j(-58,53))$.

Результаты расчета представлены в таблице.

В таблице амплитуда тока в поперечном элементе с номером $N = 2$ минимальна; она принята за 100 %. Из таблицы следует, что токи в продольных элементах этой замкнутой цепной схемы практически удовлетворяют соотношению $I_{N=-1}^{\text{С}} = -I_{N=4}^{\text{С}} = I_{N=4}^{\text{Ю}}$; это соответствует полученным соотношениям (23) и, следовательно, является проверкой расчетных выражений (12)–(15), (24), (25).

Из таблицы также следует, что распределение токов в поперечных элементах отличается от гармонического: $|J_N^{\text{С}}| \neq \text{const}$; $\Delta\alpha_N \neq \text{const}$. То же справедливо и для токов в продольных элементах: $|I_N^{\text{С}}| \neq \text{const}$; $\Delta\beta_N \neq \text{const}$. Ток в среднем

Распределение токов в элементах активной цепной схемы

Номер варианта, N	$J_N^C = J_N^C \exp(ja_N)$	$I_N^C = I_N^C \exp(j\beta_N)$
-1	—	$1,75 \exp(j3,661)$
0	$1,08 \exp(-j109,68)$	$1,73 \exp(-j35,38)$
1	$1,01 \exp(-j143,7)$	$1,77 \exp(j(-69,58))$
2	$1,0 \exp(j179,9)$	$1,76 \exp(-j102,65)$
3	$1,08 \exp(j142,94)$	$1,73 \exp(-j137,27)$
4	$1,31 \exp(j109,32)$	$1,75 \exp(-j176,34)$

поперечном элементе ($N = 2$) минимален (см. табл.), а ток в крайних ($N = 0$ и $N = 4$) — максимален.

Исследования распределения токов в элементах цепной схемы по (12)–(15), (24), (25) при различных значениях полных сопротивлений Z_F , Z_B , Z_R подтверждают, что степень «отклонения» от гармонического закона распределения этих токов связана с влиянием двух апериодических компонент в уравнениях (12), (13). Амплитуды и фазы этих компонент определяются соотношением активных и индуктивных составляющих в полных сопротивлениях Z_F , Z_B , Z_R .

Применение получения результатов к анализу режимов работы демпферных обмоток мощных синхронных машин

Особенности конструкции демпферных обмоток [1, 2].

В мощных явнополюсных машинах стержни демпферной обмотки укладываются в полукрытые пазы на полюсах и соединяются параллельно с помощью короткозамыкающих колец (сегментов), расположенных с обоих торцов ротора.

В неявнополюсных машинах роль стержней выполняют пазовые клинья и зубцы массивного ротора, а роль короткозамыкающих колец — массив бочки ротора в зоне бандажных колец. Для турбодвигателей эти клинья для обеспечения теплового и электрического контактов с зубцами выполняются из двух половин — их забивают в пазы с обоих торцов ротора. Обычно обе половины различаются по удельному сопротивлению. В современных конструкциях мощных турбогенераторов под дюралевые клинья укладывают медные полосы, а в зоне бандажных ко-

лец располагают медные листы, гальванически соединяющие параллельно эти полосы в пазах; как и массив бочки ротора, они играют роль короткозамыкающих колец.

ЭДС и токи в элементах демпферных обмоток. ЭДС в звеньях цепной схемы моделируют ЭДС, которые индуктируются в контурах демпферных обмоток результирующими полями взаимной индукции в зазоре машины.

Токам J_N в поперечных элементах цепной схемы соответствуют токи в стержнях демпферной обмотки, а токи в продольных элементах $I_{(N)}$ — токам в участках короткозамыкающего кольца (в сегментах).

Используя значения тока J_N в стержнях, трудно получить ступенчатую кривую распределения его МДС и поля $b_{\text{рот}}(x, t, m)$ в зазоре [1, 5]. Результаты ее разложения в гармонический ряд удобно представить в виде двух компонент поля, которые отличаются амплитудами и фазовыми углами.

В результате исследований сделаны выводы:

Из анализа полученных расчетных выражений (12)–(15) и (24), (25) для токов в элементах регулярной активной замкнутой цепной схемы следует, что эти токи содержат три компоненты, из которых две изменяются в зависимости от номера N по апериодическому закону (9'), а третья изменяется в зависимости от номера N по гармоническому закону (10).

Степень «отклонения» от гармонического закона распределения токов ($|J_N^C| \neq \text{const}$; $\Delta\alpha(N) \neq \text{const}$; $|I_N^C| \neq \text{const}$; $\Delta\beta(N) \neq \text{const}$) связана с влиянием этих двух апериодических ком-

понент; их амплитуды и фазы определяются соотношением активных и индуктивных составляющих в полных сопротивлениях Z_F, Z_B, Z_R .

Уравнения для токов в элементах замкнутой активной регулярной цепной схемы моделируют процессы распределения токов в демп-

ферных обмотках синхронных машин: для явнополюсных машин — в стержнях и участках кольца (сегментах), для неявнополюсных машин — в элементах конструкции зубцовой зоны ротора — пазовых клиньях, зубцах ротора из массивной стали и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов.— М.— СПб.: Питер, 2006.— Том 1— 319 с., том 2— 346 с.
2. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред. Копылова И.П. М.: Энергия. 1980.— 495 с.
3. **Глебов, И.А.** Научно-технические проблемы крупного турбогенераторостроения [Текст] / И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич.— Л.: Наука. 1990.— 350 с.
4. **Демирчян, К.С.** Теоретические основы электротехники [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.— СПб.: Питер, 2004.— Том 1— 462 с., том 2— 575 с., том 3— 376 с.
5. **Богуславский, И.З.** Генераторы и двигатели переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами [Текст]: монография / И.З. Богуславский.— СПб.: Изд-во СПбГПУ.— 2006. Т. 1.— 390 с., Т. 2.— 130 с.
6. **Демирчян, К.С.** Токи в стержнях различного сопротивления демпферной обмотки мощного тихоходного двигателя [Текст] / К.С. Демирчян, И.З. Богуславский // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1980.— № 2.
7. **Boguslawsky, I.Z.** Stationaere Stromverteilung in unregelmassigen und unsymmetrischen kurzgeschlossenen Laeuferwicklungen von Wechselstrommaschinen [Текст] / I.Z. Boguslawsky, K.S. Demirtschian // Archiv fuer Elektrotechnik.— 1992. Vol. 75, № 6.— Springer Verlag, Berlin.
8. **Корн, Г.** Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн // Пер. с англ.— М.: Наука. 1970.— 720 с.

УДК 621.31

И. Гонсалес

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И РАСЧЕТ ЕЕ РЕЖИМОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Решение проблемы повышения эффективности работы электрических сетей в последнее время осложняется в связи со все более увеличивающейся долей нелинейной нагрузки, применяемой на предприятиях горно-добывающего комплекса. Появились новые задачи, которые необходимо решать применительно к условиям искажения формы напряжения и тока в электрических сетях. Одна из таких задач — выбор методов расчета режимов работы сетей, которые бы позволили получить результаты более корректные по отношению к реальным значениям показателей, характеризующих работу сети. Очевидно, что перед тем, как выбрать метод расчета, необходимо смоделировать элект-

рическую сеть с нагрузкой. Причем все элементы модели должны быть представлены с учетом их реакции на напряжения и токи высших гармоник. Таким образом, поставленная задача делится на две части: моделирование электрической сети и непосредственно выбор метода ее расчета.

Основные элементы электрической сети предприятия с нагрузкой — это линии электропередачи (воздушные или кабельные), трансформаторы, двигатели, реакторы и генераторы.

При наличии только первой основной гармоники активное R_v и реактивное X_v сопротивления элементов системы электроснабжения являются величинами постоянными.

При возникновении высших гармоник согласно различным исследованиям [1, 2] активные сопротивления можно представить в следующих формах:

$$R_v = R_1 (1 + A v^B), \tag{1}$$

где A и B — численные коэффициенты (0,5 и 1,5 соответственно); v — номер гармоники; R_1 — активное сопротивление на первой гармонике;

$$R_v = R_{1B} v^{R_{exp}}, \tag{2}$$

где R_{exp} — коэффициент, определяемый экспериментально;

$$R_v = R_{1B} \left(\frac{1 + \Phi BT v^2}{1 + \Phi BT} \right); \tag{3}$$

ΦBT — фактор вихревых токов; R_{1B} — сопротивление вихревым токам на первой гармонике.

Что касается реактивных сопротивлений, то их зависимость от гармоник номера должна быть принята стандартной.

Следует отметить, что для определения значения активного сопротивления проводника, по которому протекает рабочий ток, применяются выражения (1) и (2). Дополнительное сопротивление от вихревых токов, зависящее от частоты в соответствии с выражением (3), при определенных условиях должно быть суммировано с сопротивлением при рабочем токе.

Предлагаемые выражения для активных сопротивлений были получены в результате экспериментальных исследований [1], причем значения ΦBT — только для трансформаторов

Таблица 1

Экспериментально найденные коэффициенты для расчета активных сопротивлений элементов сети

Элементы сети	R_{exp}	ΦBT
Трансформатор	0,5–1,0	1,0–3,0
Система	0,0–0,8	—
Генератор	0,3–0,6	—
Линия / кабель	0,5	—
Реактор	0,5–1,0	0,8–3,0
Двигатель	0,2–0,4	—

и реакторов на стальном сердечнике. Значения R_{exp} и ΦBT приведены в табл. 1.

Таким образом, для модели электрической сети в зависимости от гармонического состава напряжения и тока можно выбрать различные варианты представления элементов. Установлено, что второй и третий варианты дают наиболее точные результаты.

На рис. 1 и 2 приведены графики зависимостей R_v от частоты при различных значениях R_{exp} и ΦBT .

Из полученных зависимостей следует, что неучет высших гармоник может привести к значительной погрешности в определении активных сопротивлений элементов электрической сети. Это следует иметь в виду при расчете режимов работы сети, в которой присутствуют искажения напряжения и тока.

Электрические сети предприятий горно-добывающего комплекса отличаются чрезвычайно высокой разветвленностью, количество узлов

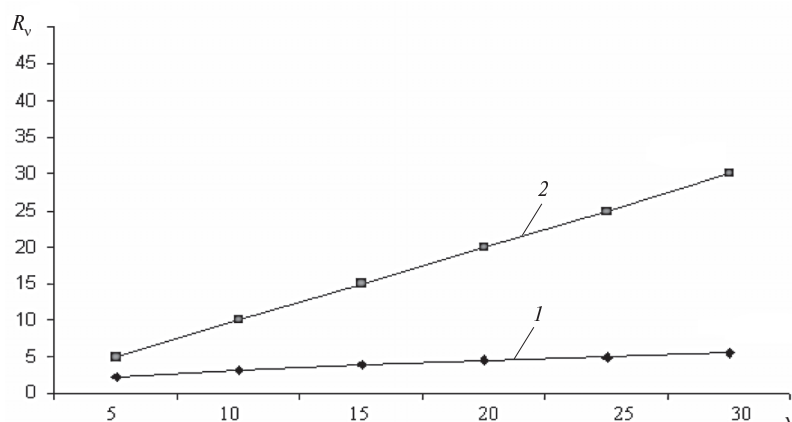


Рис. 1. График зависимости коэффициента R_v от частоты при различных значениях R_{exp} (1 — 0,5; 2 — 1)

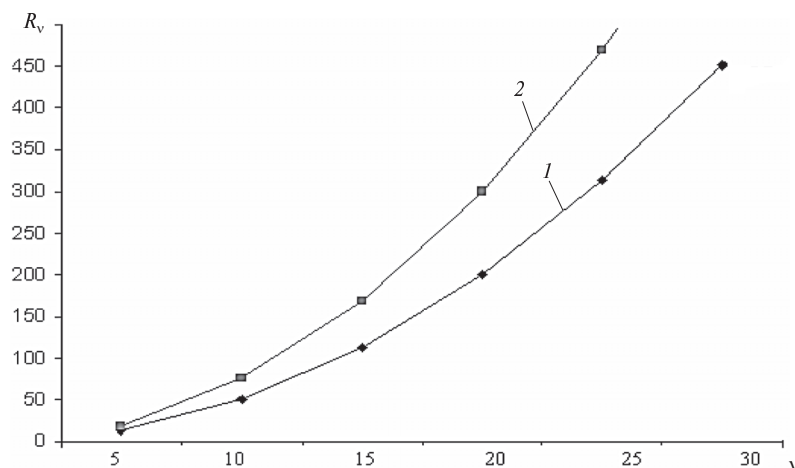


Рис. 2. График зависимости коэффициента R_v от частоты при различных ФВТ (1 — 1; 2 — 3)

на разных уровнях напряжений может достигать нескольких сотен. Стандартные программы, разработанные в среде MATLAB, не способны рассчитать режимы работы сети с большим количеством узлов. Поэтому следует выбирать наиболее рациональный метод, позволяющий получить результат с заданной точностью. В условиях Кубы покупка современных программ в этой области ограничена. Отсюда — необходимость разработки собственных программ расчета сложных электрических сетей, одна из которых описана ниже.

Среди известных инструментов расчета электрических сетей наиболее распространены методы Гаусса — Зейделя, Ньютона — Рафсона и программа «Easy Power».

Все эти методы предполагают решение системы уравнений вида

$$YU = I, \quad (4)$$

где Y , U , I — матрицы соответственно проводимостей, напряжений и токов ветвей схемы замещения сети в комплексном виде.

Метод Гаусса — Зейделя характеризуется тем, что система решается даже при начальных значениях U и I , далеких от реальных значений. Отсюда, как следствие, медленное схождение процесса вычислений. В этом случае применяют фактор ускорения, что является главным преимуществом метода.

Метод Ньютона — Рафсона широко известен своей надежностью и быстрой сходимостью. Однако некоторые специалисты (среди них —

Сайнс [3]) утверждают, что при этом решение не может сходиться, если значения начальных условий недостаточно близки к реальным.

По мнению некоторых авторов [4], программное обеспечение «Easy Power» имеет лучшие характеристики по сравнению с предыдущими методами. Однако пользоваться им невозможно из-за недоступности в научно-техническом обиходе Кубы. Исходя из сказанного выше в работе был выбран и запрограммирован автором метод Гаусса — Зейделя (программа DYCSSE).

Результаты расчетов, полученные по программе DYCSSE, сравнивались с результатами расчета по другим программам. Исходные расчетные схемы, приведенные в литературе, были одинаковыми.

На первом этапе был выполнен расчет при наличии только первой гармоники в напряжении и токе сети для примера, приведенного в [1] и рассчитанного по программе «Easy Power».

Результаты расчетов, полученных двумя методами, представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, результаты, полученные по программе DYCSSE, имеют хорошую и достаточную сходимость.

На втором этапе был произведен расчет с учетом высших гармоник. Результаты расчета напряжений по двум методам приведены в табл. 3.

Наибольшая погрешность при сравнении составила 2,8 %. Отсюда можно сделать вывод, что метод Гаусса — Зейделя, реализованный в виде программного продукта DYCSSE, может применяться для расчета как сетей, содержащих только основную гармонику, так и для сетей

Таблица 2

Сравнение результатов на примере Easy Power и DYCSE

Номер узла		Easy Power		DYCSE		Разница в расчетах	
Вход	Выход	P, МВт	Q, Мвар	P, МВт	Q, Мвар	ΔP, МВт	Δ Q, Мвар
01	03	−2,667	0,649	−2,667	0,642	0	0,005
	100	2,667	−0,648	2,667	−0,642	0	0,006
02	04	5,572	−0,368	5,570	−0,360	0,002	0,008
	100	−5,571	0,368	−5,570	0,360	0,001	0,008
03	01	2,669	−0,608	2,669	−0,602	0	0,006
	05	2,217	1,341	2,217	1,341	0	0
	06	3,014	1,853	3,017	1,853	0,003	0
	09	1,828	1,192	1,831	1,193	0,003	0,001
	26	0,769	0,500	0,770	0,500	0,001	0
	50	−10,503	−4,277	−10,504	−4,286	0,001	0,009
04	G2	8,000	5,138	8,000	5,131	0	0,007
	02	−5,562	0,534	−5,560	0,526	0,002	0,008
	07	2,081	1,423	2,084	1,421	0,003	0,002
	08	6,364	0,004	6,364	0,004	0	0
	15	2,664	1,647	2,664	1,647	0	0
	24	2,445	1,530	2,448	1,532	0,003	0,002
05	03	−2,217	−1,340	−2,217	−1,341	0	0,001
	39	1,246	0,775	1,246	0,776	0	0,001
	49	0,971	0,565	0,971	0,565	0	0
06	03	−3,017	−1,852	−3,016	−1,852	0,001	0
	11	0,354	0,206	0,354	0,206	0	0
	19	2,662	1,646	2,662	1,646	0	0
07	16	0,425	0,304	0,425	0,304	0	0
	27	1,663	1,119	1,659	1,118	0,004	0,001
08	04	−6,360	0,000	−6,361	0,000	0,001	0

Таблица 3

Номер гармоник	Номер узла											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Напряжения, рассчитанные по программе «Easy Power», кВ												
1	115,00	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	2,40	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
5	0,073	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,015	0,005	0,004	0,005	0,011	0,011
7	0,056	0,061	0,061	0,062	0,062	0,062	0,012	0,004	0,003	0,004	0,008	0,008
11	0,024	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,005	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
13	0,029	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,006	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
17	0,025	0,027	0,027	0,027	0,028	0,027	0,005	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004
19	0,023	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,005	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003
КНИ, %	0,092	0,832	0,834	0,836	0,839	0,836	0,924	1,505	1,130	1,505	3,226	3,226

Окончание табл. 2

Номер гармоник	Номер узла											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Напряжения, рассчитанные по программе DYCSE, кВ												
1	115,00	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	2,40	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
5	0,075	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,015	0,005	0,003	0,005	0,010	0,010
7	0,057	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062	0,012	0,003	0,002	0,003	0,007	0,007
11	0,024	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,005	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
13	0,029	0,031	0,061	0,061	0,061	0,061	0,006	0,001	0,001	0,001	0,004	0,004
17	0,025	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,005	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
19	0,023	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,004	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003
КНИ, %	0,09	0,83	0,85	0,85	0,85	0,85	0,93	1,53	1,14	1,53	3,08	3,08

с нелинейными искажениями. Таким образом, доказана достаточная близость результатов, полученных по программе DYCSE и по программам, широко применяемым для расчета сложных сетей. Дальнейшее использование программы

DYCSE с учетом коэффициентов, приведенных в табл. 1, также даст возможность получить достаточно точные результаты, а применение вышеуказанных коэффициентов позволит получить расчетные величины, близкие к реальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Inelec, I.L.** The graphical solution for power system analysis [Текст] / I.L. Inelec.— USA.— 2006.— 230 p.
2. IEEE. Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis [Текст].— USA.— 1997.— 118 p.
3. **Sainz, S.L.** Formulation of the harmonic load flow [Текст] / S.L. Sainz // IEEE Transaction on Power Systems.— 1995. Vol 13, № 1.— P. 123—135.
4. **Garcia, P.** Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method [Текст] / P. Garcia, J. Pereira, C. Sandoval, M. Vender, N. Martins // IEEE Transaction on Power Systems.— 2000. Vol. 5. № 1.— P. 98—105.

УДК 621.311.1

Д.А. Устинов, Ю.В. Коновалов,
И.Г. Плотников, А.В. Турышева

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Наиболее полное представление об энергопотреблении можно получить при изучении фактических графиков электрических нагрузок (ГЭН)*. В результате экспериментальных исследе-

дований, проведенных на подстанциях нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) ОАО «Татнефть», были получены суточные графики электрических нагрузок. По полученным данным были построены профили графиков нагрузок отдельных подстанций и определены профили усредненных графиков нагрузки НГДП в целом путем суммирования профилей графиков отдельных подстанций. Графики усредненных элект-

* **Абрамович, Б.Н.** Реконструкция систем коммерческого учета электропотребления нефтегазодобывающих предприятий [Текст] / Б.Н. Абрамович, А.В. Сираев // Матер. 7-й Международной конф. «Новые идеи в науках о земле».— М., 2005.

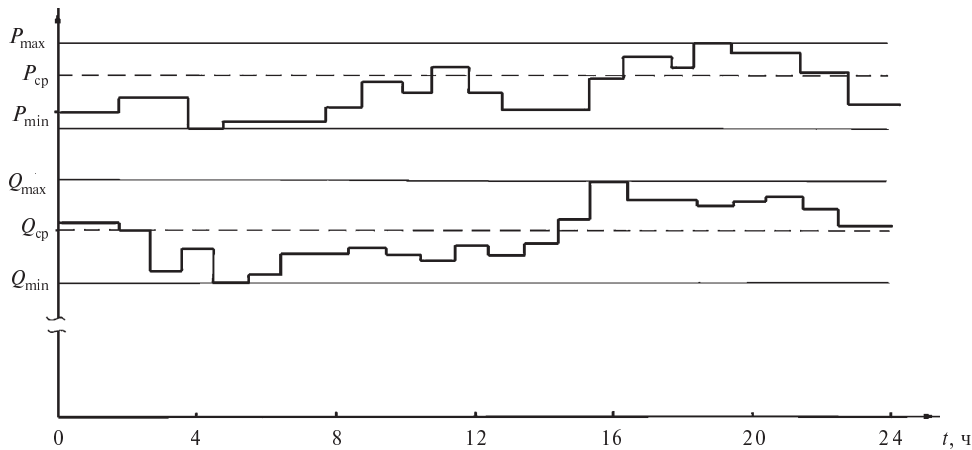


Рис. 1. Усредненные графики электрических нагрузок нефтепромысловых распределительных подстанций ОАО «Татнефть»

рических нагрузок нефтепромысловых распределительных подстанций ОАО «Татнефть» представлены на рис. 1. Гистограммы графиков средних значений на интервалах замеров активной и реактивной мощности Y_j и соответствующие им статистические частоты приведены на рис. 2.

Большинство технологических установок на НГДП работает круглосуточно с равномерной или периодически изменяющейся нагрузкой. Поэтому усредненный график узла нагрузки, формирующийся из индивидуальных периодических и непериодических графиков, удовлетворяет условию обобщенной периодичности. Взаимосвязь между его ординатами в разные моменты времени носит случайный, вероятностный характер. Случайность усредненного ГЭН обусловлена отсутствием между графиками детерминированных связей и технологической независимостью отдельных электроподстанций. Поэтому для изучения и прогнозирования характеристик ГЭН электроподстанций и узлов нагрузки следует использовать математический аппарат теории случайных процессов, наиболее полно отражающей вероятностный характер нагрузок.

Анализируя характер электропотребления по ГЭН, можно предположить, что электрические нагрузки нефтепромысловых потребителей имеют нормальный закон распределения с плотностью

$$F(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp \left[-\frac{(P_i - P_{cp})^2}{2\delta^2} \right],$$

где P_{cp} — математическое ожидание нагрузки,

P_i — случайное значение нагрузки, δ — среднеквадратическое отклонение (стандарт) нагрузки.

Для точного определения вида закона распределения необходимо получить статистический ряд и определить частоту выборки, чтобы оценить полученное распределение по выбранному критерию. В качестве такого критерия, позволяющего оценить расхождение между наблюдаемыми и ожидаемыми частотами, выбираем критерий

$$\chi^2 \text{ (критерий Пирсона): } \chi^2 = N \sum_{j=1}^k \left[\frac{(f_j - \Phi_j)^2}{\Phi_j} \right],$$

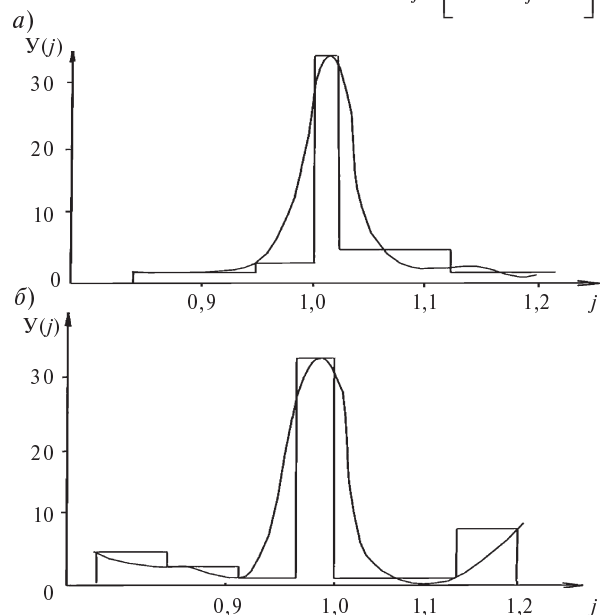


Рис. 2. Гистограмма значений Y_j и соответствующие им статистические частоты для графиков активной (а) и реактивной (б) мощности

где Φ_j — теоретическая частота, соответствующая интервалу (Π_j, Π_{j+1}) , $\Phi_j = \frac{B-A}{K} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} \times \exp \left[-\frac{(Y_j - P_{cp})^2}{2\delta^2} \right]$; $B = P_{max}$, $A = P_{min}$ — макси-

мальное и минимальное значения активной и реактивной мощности; $K = 1 + 3,3 \lg N$ — число интервалов всего диапазона изменения наблюдаемой величины (отрезок АВ); N — число членов ряда (объем выборки); Π_j , Π_{j+1} — левая и правая границы интервала, $j = 1, 2, \dots K$; Y_j — середина соответствующего интервала, определяемая по формуле:

$$Y_j = A - \frac{\Delta L}{2} + j\Delta L, \text{ где } \Delta L = -\frac{B-A}{K}.$$

Получив значение χ^2 путем обработки замеров, сделанных по более чем тремстам подстанциям предприятий, сравниваем его с табличным значением χ^2 . Вычисленное значение $\chi^2 = 4,67$ не превосходит табличное, которое равно 11,1. Это подтверждает то, что экспериментальные данные не противоречат гипотезе о принадлежности эмпирического распределения рассматриваемому нормальному закону. Проверка однородности дисперсии нагрузки с использованием критерия Кочрена ($G = 0,47 < G_{табл} = 0,633$) показала достаточность рассматриваемого объема выборки для оценки характеристик нормально распределенных случайных величин электрических нагрузок электроподстанций НГДП. Значение G для выборок одинакового объема опре-

делялось по формуле $G = \frac{D_{max}^2}{\sum_{i=1}^n D_i^2}$, где D_i —

дисперсия, D_{max} — максимальная дисперсия.

Классификация случайного процесса по виду вероятностного распределения ординат ГЭН позволяет определить средние вероятностные характеристики и построить математическую модель случайного процесса изменения нагрузки. Вероятностными характеристиками случайного процесса являются: среднее значение P_{cp} , дисперсия D , среднеквадратическое отклонение δ и коэффициент вариации нагрузки для каждо-

го рассматриваемого интервала времени t_i . Эти характеристики определяются по известным формулам:

$$P_{cp}(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(t_i);$$

$$D(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i(t_i) - P_{cp}(t_i)]^2;$$

$$\delta(t_i) = \sqrt{D(t_i)}; \quad K_{v_i} = \frac{\delta(t_i)}{P_{cp}(t_i)}.$$

Оценка диапазона изменения этих величин в экстремальных и нормальных зонах суточных ГЭН для предприятий нефтедобычи выражается следующими показателями:

средние значения нагрузки на подстанциях — от 1,0 МВт до 2,5 МВт;

средние значения нагрузки на подстанциях в часы максимальных нагрузок энергосистемы варьируют от 2 до 4 МВт;

коэффициенты вариации ГЭН находятся в пределах 0,05–0,25;

в экстремальных зонах суточного ГЭН величина коэффициента вариации может достигать значения 0,4.

Вероятностная взаимосвязь между значениями ординат в сечениях ГЭН определяется корреляционной функцией, связывающей значения ординат графиков $P_i(t)$ в моменты времени t_1 и $t_2 = t_1 + t$:

$$K(t_1, t_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_i(t_1) - P_{cp}(t_1)][P_i(t_2) - P_{cp}(t_2)].$$

Для оценки взаимосвязи между ординатами ГЭН, разделенными между собой интервалом t , были определены коэффициенты корреляции графика нагрузки $P_i(t_i)$:

$$r(t_i, t_2) = \frac{K(t_1, t_2)}{(n-1)\delta(t_i)\delta(t_2)}.$$

Значения коэффициентов корреляции в нормальных зонах суточных ГЭН оцениваются так:

Интервал между сечениями, мин.	Коэффициенты корреляции $r(\tau)$, мин.
30	0,9
60	0,64
90	0,47
120	0,31

В экстремальных зонах суточных ГЭН значения коэффициентов корреляции оцениваются показателями, приведенными в табл. 1.

Основываясь на результатах проведенных исследований на подстанциях НГДП, было установлено, что полученные корреляционные функции (КФ) чаще всего характеризуются экспонентой или имеют вид экспоненциально-косинусной КФ: $K(\tau) = De^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0\tau_0)$. Основные параметры этой функции: дисперсия D ; коэффициент затухания α и круговая частота ее колебаний ω_0 . Они определяются соотношениями

$\omega_0 = \frac{\pi}{2\tau_2}$; $\alpha = \frac{1}{\tau_1} \ln[\sqrt{2}r(\tau_1)]$; $\tau_1 = \frac{1}{2}\tau_2$; где ω — момент времени, когда корреляционная функция принимает нулевое значение; $r(\tau_1)$ — значение корреляционной функции при τ_1 . В практических расчетах используется нормированная корреляционная функция (НКФ) $R(\tau) = \frac{K(\tau)}{D}$, определяющая степень зависимости ординат случайного процесса $P_i(t_i)$, разделенных интервалом времени τ .

Анализ формы НКФ нефтепромысловых подстанций НГДП показывает, что она имеет монотонно убывающий характер. Колебательный процесс НКФ затухает довольно быстро: начальная часть КФ довольно пологая, при τ_1 значения НКФ составляют 0,6–0,8.

Особенностью корреляционной функции является то, что она позволяет определять вероятностные характеристики выбросов и провалов графика нагрузки. Вероятность превышения уровня заявленного максимума равна $E_y = 1 - \Phi(P_y)$, где $\Phi(P_y)$ — табличная интегральная функция нор-

Таблица 1

Коэффициенты корреляции в экстремальных зонах суточных графиков электрической нагрузки

Интервал между сечениями, мин	Значения коэффициента корреляции часы утреннего максимума	Значения коэффициента корреляции часы вечернего максимума
30	0,88	0,96
60	0,42	0,72
90	0,20	0,32
120	0,56	0,15

мального распределения; P_y — относительное значение уровня заявленного максимума:

$P_y = \frac{P_{зм} - P_{ср}}{\delta}$. Средняя частота выбросов

$\bar{\nu}_y = \frac{\delta_v}{\sqrt{2\pi}\delta} \phi(P_y)$, где δ_v — стандарт отклонения

скорости изменения процесса; $\phi(P_y)$ — табличная функция плотности нормального распределения.

После определения δ_v и $\bar{\nu}_y$ при известном времени наблюдения T определяют количество выбросов за время T — $N_y = \bar{\nu}_y T$ — и среднюю

длительность одного выброса (\bar{t}_y): $\bar{t}_y = \frac{T_y}{E_y}$;

суммарная длительность всех превышений за время наблюдения T составит $T_y = E_y T$.

Для графиков нагрузки промышленных подстанций при различных уровнях заявленного максимума ($P_{зм}$) выполнены вычисления при значениях $P_{ср} = 1$ и $\delta = 0,05$. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели выбросов нагрузки при различных значениях заявленного максимума активной потребляемой мощности

$P_{зм}$	$P_{зм} - P_{ср}$	P_y	$\phi(P_y)$	$\bar{\nu}_y$, 1/час	N_y	$\Phi(P_y)$	E_y	T_y , час
0,9	−0,1	−2	0,054	0,02	0,08	0,023	0,977	4,8
0,95	−0,05	−1	0,24	0,085	0,38	0,16	0,82	3,8
1,0	0	0	0,5	0,16	0,56	0,5	0,5	3,57
1,05	0,05	1	0,24	0,085	0,38	0,84	0,16	1,68
1,1	0,1	2	0,054	0,02	0,08	0,977	0,023	1,25
1,15	0,15	3	0,0045	0,0016	0,0064	0,498	0,002	1,15

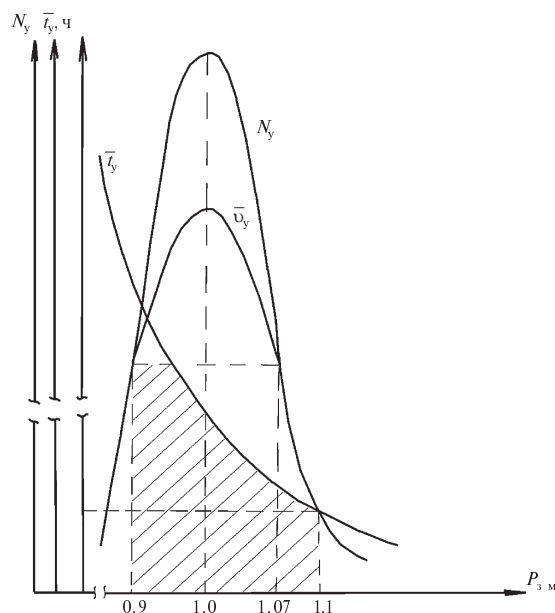


Рис. 3. Зависимости количества, средней длительности и средней частоты выбросов от значения заявленного максимума

Проведенные исследования показывают, что выбросы нагрузки выше заявленного максимума наблюдались на 20 % из обследованных под-

станций. В 10 % случаев заявленный максимум активной мощности меньше среднего значения мощности, что обуславливает появление выбросов нагрузки в часы экстремальных нагрузок энергосистемы с вероятностью 0,8–0,9. Частота выбросов при этом достигает $0,3 \text{ ч}^{-1}$, средняя длительность 1–2 часа.

По полученным данным были построены зависимости количества выбросов, их средней длительности и средней частоты от относительного уровня заявленного максимума (рис. 3):

$$N_y = f(P_{зм}), \quad \bar{t}_y = f(P_{зм}) \quad \text{и} \quad \bar{\nu}_y = f(P_{зм}).$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что наибольшее число выбросов наблюдается в диапазоне изменения нагрузки $(0,95–1,0)P_{зм}$. При этом средняя частота колеблется от 0,02 до $0,085 \text{ час}^{-1}$, а средняя длительность выбросов составляет 1,15–4,8 ч.

Для снижения $P_{зм}$ на предприятиях нефтедобычи актуальна задача более точного определения $P_{зм}$, разработка методов и алгоритмов управления нагрузкой с выделением потребителей-регуляторов при обеспечении бесконфликтности с технологическим процессом.

УДК 621.316.9

А.С. Карпов, И.В. Кравченко,
В.Н. Костин, Е.Н. Попков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЧАСТОТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ

Частотная делительная автоматика (ЧДА) применяется для сохранения в работе собственных нужд и предотвращения полного останова электростанций при отказе или недостаточной эффективности автоматического частотного ввода резерва, частотной (АЧР) и дополнительной (ДАР) автоматических разгрузок, а также для обеспечения питания отдельных групп потребителей, не допускающих перерывов электроснабжения [1]. Сохранение в работе части генераторов при действии ЧДА позволяет ускорить

восстановление электроснабжения потребителей в послеаварийном режиме.

Для обеспечения эффективности действия ЧДА при аварийном выделении какого-либо энергорайона мегаполиса необходима достоверная оценка следующей предшествующей выделению информации:

- о величине генерации электростанций района;
- величине нагрузки потенциально выделяемого района;
- объеме нагрузки, подведенной под АЧР;



схеме электрической сети района;
составе генерирующего оборудования.

Оценивать указанную информацию необходимо в темпе реального времени. Автоматизация этого процесса обеспечит принятие обоснованных решений по выбору направления действия ЧДА и соответственно повысит надежность энергосистемы мегаполиса.

В настоящее время сотрудниками Ленинградского РДУ (филиал ОАО «СО ЕЭС») и кафедрой электрических систем и сетей СПбГПУ планируется осуществить разработку программного комплекса (ПК) «Система контроля эффективности действия ЧДА» для мониторинга всех районов потенциального выделения при действии ЧДА в энергосистеме Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

В соответствии с требованиями [1] при отделении электростанции на примерно сбалансированную нагрузку предпочтительнее образование небольшого избытка генерируемой мощности, т. е. выполнение условия

$$P_{\Gamma} = P_{\text{нагр}} - P_{\text{АЧР}}, \quad (1)$$

где P_{Γ} — генерация электростанций, входящих в район потенциального выделения, до возникновения частотной аварии; $P_{\text{нагр}}$ — суммарная нагрузка района потенциального выделения до возникновения частотной аварии; $P_{\text{АЧР}}$ — суммарный объем нагрузки, подведенной под АЧР в районе потенциального выделения.

Следует отметить, что, несмотря на сохраняющуюся общую недостаточность наблюдаемости параметров режима работы энергосистемы, в условиях развивающегося рынка электроэнергии и мощности режим работы электростанций, состав генерирующего оборудования и текущая генерация каждого из генераторов станций в достаточной мере фиксируются средствами телеизмерений (ТИ) и передаются по выделенным каналам.

Таким образом, величина мощности генераторов, остающихся в работе в выделившемся районе после действия ЧДА, может использоваться в разрабатываемом ПК «Система контроля эффективности действия ЧДА» благодаря созданию интерфейса для одной из подпрограмм оперативно-информационного комплекса (ОИК).

Информация о схеме электрической сети района потенциального выделения может быть получена достаточно точно с помощью суще-

ствующей системы ТИ и имеющихся в распоряжении диспетчера программных средств, например ПК «Заявка».

Состав генерирующего оборудования определяет возможность изменения величины генерации после выделения энергорайона. В частности, для энергоагрегатов станций, не участвующих в общем первичном регулировании частоты, генерация в доаварийном и послеаварийном режимах не меняется $P_{\Gamma \text{ послеав}} = P_{\Gamma \text{ доав}}$, а для энергоагрегатов ТЭЦ с маневренными турбинами в соответствии с исследованиями [2] имеем $P_{\Gamma \text{ послеав}} \approx 1,15 P_{\Gamma \text{ доав}}$.

Определение текущей нагрузки района осуществляется с помощью ТИ перетоков мощности $P_{\text{св}}$ по элементам связи с энергосистемой района потенциального выделения:

$$P_{\text{нагр}}(t) = P_{\Gamma} \pm P_{\text{св}}, \quad (2)$$

Знак «плюс» в выражении (2) относится к районам с дефицитом генерируемой мощности, знак «минус» — к районам с избытком этой мощности.

С учетом незначительного изменения нагрузки внутри шага квантирования по времени (10 минут) получаемые данные вполне достаточны для объективной оценки величины нагрузки района.

Полученные данные по нагрузке будут экспортироваться из ОИК в ПК «Система контроля эффективности действия ЧДА».

С целью повышения достоверности информации о текущей нагрузке района потенциального выделения следует использовать данные контрольных замеров, осуществляемых не реже двух раз в год — в рабочий и выходной дни июня и декабря.

Непосредственное использование результатов контрольных замеров не гарантирует достаточной точности. Кроме того, в весенне-летний период проведения ремонтных работ на электроэнергетическом оборудовании схема и направление действия ЧДА может существенно изменяться. В этих условиях для выбора направления действия ЧДА, обеспечивающего ее эффективную работу, необходимо тщательно отслеживать текущее состояние схемы и проводить многочисленные расчеты по определению требуемого баланса генерации и потребления.

Поскольку в дни проведения замеров нагрузки определяется ежечасно, то для каждой под-

станции района в конкретный день измерений формируется массив значений нагрузок:

Час	$P_{\text{нагр } i}, \text{ МВт}$
1	$P_{\text{н1}}$
2	$P_{\text{н2}}$
3	$P_{\text{н23}}$
...	...
23	$P_{\text{н24}}$
24	$P_{\text{н24}}$

Для расчета нагрузки района в произвольный день месяца и час суток целесообразно использовать методы интерполяции функции $P_{\text{нагр}}(t) = f(\text{час, месяц})$ двух переменных. В частности, интерполяция сплайнами двух переменных широко используется для задания поверхностей в различных системах компьютерного моделирования.

Принимая во внимание, что результаты расчета текущей нагрузки подстанции будут использоваться в будущем, необходимо производить корректировку нагрузки с учетом ее естественного прироста, т. е. вводить соответствующий поправочный коэффициент.

Для проверки достоверности значений $P_{\text{нагр}}(t)$ целесообразно осуществить сравнение величины мощности нагрузки, полученной на основе ТИ, с результатами расчета, полученными интерполяцией контрольных замеров на текущий момент времени. В случае их существенного расхождения (более 10 %) необходимо проверить достоверность телеизмерений.

В отличие от нагрузки района выделения, сравнительно легко наблюдаемой с помощью средств ТИ, наблюдаемость нагрузки, подведенной под АЧР в операционной зоне диспетчерских центров, существенно ниже. Комплекты АЧР устанавливаются, как правило, на фидерах 6–10 кВ, количество которых на одной подстанции может достигать нескольких десятков. В условиях мегаполиса количество подстанций и комплектов АЧР, реализованных на этих подстанциях, входящих в зону действия ЧДА, может достигать сотни и более. Поэтому обеспечение наблюдаемости объема нагрузки, подведенной под АЧР, с помощью средств ТИ — весьма дорогостоящее мероприятие.

В этой связи для подстанций района выделения единственный метод определения величины $P_{\text{АЧР}}(t)$ текущего суммарного объема АЧР — расчет по данным контрольных замеров с последу-

ющей интерполяцией результатов на текущий момент времени.

Исходя из данных о текущей нагрузке района, $P_{\text{нагр}}(t)$, и текущей нагрузке, подведенной под АЧР, $P_{\text{АЧР}}(t)$, нетрудно определить величину оставшейся нагрузки в районе после действия ЧДА и на основании информации о текущей генерации, составе генерирующего оборудования, его типе и технических характеристиках сделать вывод о сбалансированности района, потенциально выделяемого действием ЧДА.

В дополнение к расчету баланса мощности необходимо осуществить контроль состояния элементов схемы района выделения, что достаточно легко реализуется существующими программными средствами, например ПК «Заявка».

Комплексный анализ состояния схемы и сбалансированности района потенциального выделения позволяет получить информацию о необходимости ввода/вывода ЧДА на текущий момент времени.

Ниже рассмотрены основные особенности построения ПК «Система контроля эффективности действия ЧДА» как программного продукта для энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Районы потенциального выделения. Энергосистема Санкт-Петербурга и Ленинградской области включает в себя следующие районы и электростанции потенциального выделения на изолированную работу действием ЧДА:

район «Севера», в том числе Выборгская ТЭЦ (ТЭЦ-17) и Северная ТЭЦ (ТЭЦ-21);

район «Юга», в том числе Василеостровская ТЭЦ (ТЭЦ-7), Первомайская ТЭЦ (ТЭЦ-14) и Автоовская ТЭЦ (ТЭЦ-15);

Центральная ТЭЦ (ЭС-2);

Правобережная ТЭЦ (ТЭЦ-5);

Волховская ГЭС (ГЭС-6);

Светогорская ГЭС (ГЭС-11);

Нарвская ГЭС (ГЭС-13);

Киришская ГРЭС;

Южная ТЭЦ (ТЭЦ-22);

Юго-Западная ТЭЦ.

Описание схемы энергорайона и исходных данных. Графическое описание и текущая корректировка электрических схем районов, которые потенциально могут быть выделены действием ЧДА, согласно требованиями [3] с целью унификации будут осуществляться в графическом



редакторе Microsoft Office Visio, использующем векторную графику. На схемах достаточно отражать только основное оборудование: генераторы электростанций; линии электропередач; трансформаторы; силовые выключатели.

Графические обозначения элементов схем должны соответствовать требованиям ЕСКД и стандарту [3]. В соответствии с этими документами все условные графические обозначения линий электропередачи, электрооборудования энергообъектов, а также электрические соединения между ними в соответствии с классом напряжения должны:

выделяться цветом согласно аддитивной цветовой модели *RGB* (см. таблицу);

иметь соответствующую толщину линий условных графических обозначений (см. таблицу).

В ПК «Система контроля эффективности действия ЧДА» предусматривается выделение элементов подстанций и участков сети, не находящихся под напряжением, одним цветом, а при заземлении этих элементов используется другой цвет, при выведении оборудования в ремонт — третий цвет.

Включенное/отключенное положение динамических элементов схемы (силовые выключатели) будет отображаться на электрической схеме индикацией в соответствии с указанной выше палитрой цветов для различных классов напряжения.

Массивы исходных данных о генерации в районах потенциального выделения и потоках активной и реактивной мощностей по линиям электропередач, трансформаторам и внешним

связям рассматриваемых районов будут формироваться на основе данных ТИ с настраиваемой периодичностью. Минимальную периодичность следует принять не более 1 мин.

Как было отмечено выше, массивы исходных данных о величинах нагрузки районов потенциального выделения формируются следующим образом:

расчетом сальдо между генерацией в рассматриваемых районах и потоками активной мощности по внешним связям (см. выражение (2));

на основе ежегодных контрольных замеров с последующей интерполяцией результатов на текущий момент времени.

В процессе сбора и обработки исходных данных должна быть предусмотрена система сравнения расчетных величин нагрузки обоими способами. В случае возникновения значительных отличий в полученных результатах (более 10 %) должна срабатывать система цветовой сигнализации.

Массив исходных данных о величинах нагрузки, подведенной под АЧР, формируется на основе ежегодных контрольных замеров с последующей интерполяцией результатов на текущий момент времени.

Основное содержание работ. Интерфейс пользователя ПК, который позволит в удобной форме осуществлять контроль эффективности действия ЧДА в режиме реального времени, должен включать в себя:

главное меню пользователя;

информационные файлы второго уровня.

Требования к графическим обозначениям элементов схем электрических систем

Напряжение, кВ	Цвет	Толщина линий, <i>pt</i>
750	темно-синий (0:0:168)	4,08
500	красный (213:0:0)	3,12
330	зеленый (0:170:0)	3,12
220	коричнево-зеленый (128:128:0)	2,16
110	голубой (0:153:255)	1,2
Ниже 110, генераторное напряжение	темно-серый (95:95:95)	0,72

П р и м е ч а н и е. В круглых скобках приведены числовые значения *Red*, *Green*, *Blue* — красной, зеленой и синей — цветовых спектральных составляющих соответствующего цвета

Главное меню должно обеспечивать:

световую сигнализацию об условиях эффективности работы ЧДА (световые сигналы: зеленый — условие эффективной работы ЧДА; желтый — режим частичного выполнения условий эффективности работы ЧДА; красный — условие необходимости вывода ЧДА из работы; фиолетовый — ЧДА выведена из работы);

доступ к информационным файлам второго уровня, отражающим топологию сети района потенциального выделения электростанций с графическим представлением данных;

возможность изменения направления действия ЧДА (введено/выведено).

Информационные файлы второго уровня для каждого из районов потенциального выделения должны содержать:

электрическую схему выделенного района с индикацией текущего состояния каждого элемента (рабочее/нерабочее) и указанием для каж-

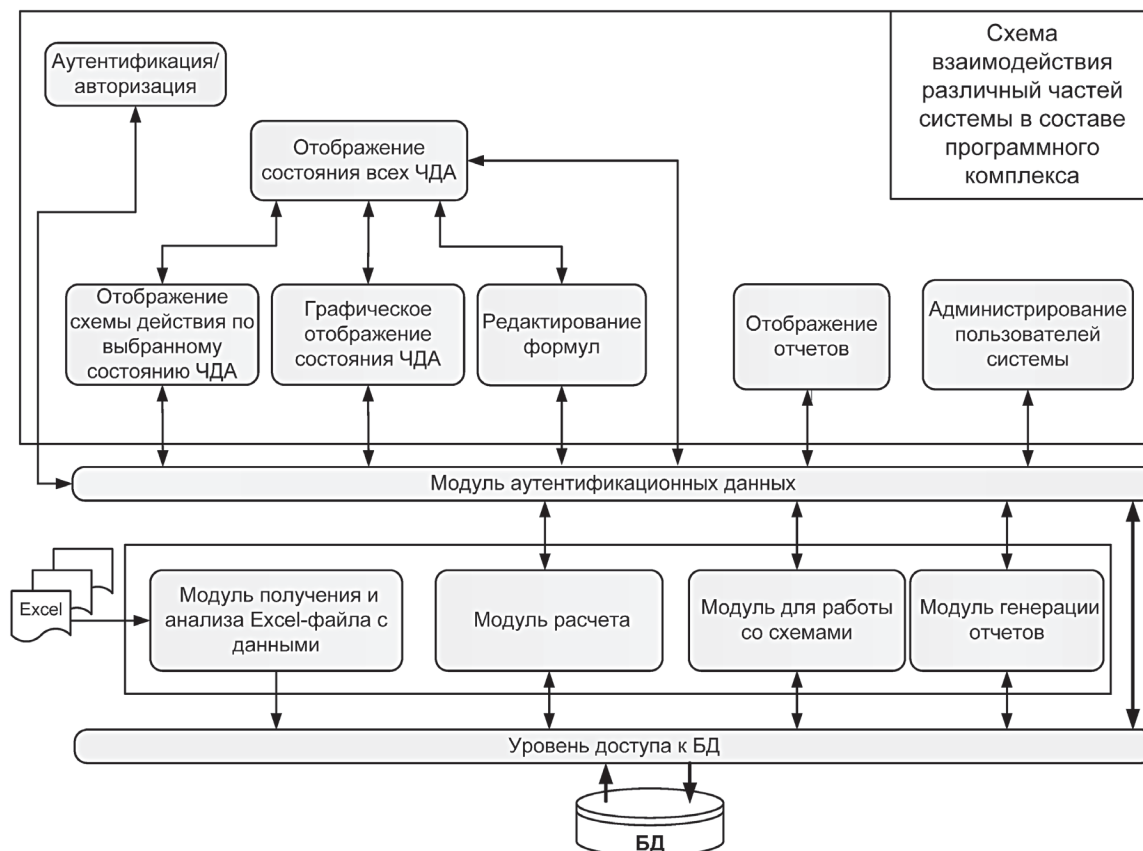
дого элемента текущих значений потоков активной и реактивной мощностей;

графическую информацию об изменении величины генерируемой мощности, величине мощности нагрузки и объеме нагрузки, подведенной под АЧР (вывод данных настраивается пользователем с минимальной периодичностью 1 мин);

графическое отображение временных интервалов, для которых обеспечиваются условия эффективного действия ЧДА.

Кроме того, ПК должен допускать возможность проводить для выделенного района в перспективном интервале времени до 2-х месяцев графический анализ величин генерируемой мощности, мощности нагрузки и объема нагрузки, подведенной под АЧР.

Требования к функционированию ПК. ПК должен разрабатываться как web-приложение, обеспечивать регулярную загрузку данных из ОИК с настраиваемой периодичностью, быть



Принципиальная схема взаимодействия между модулями ПК



совместимым с операционными системами и базами данных.

Серверная часть программного обеспечения развертывается на всех 32–64 разрядных серверных операционных системах Windows с предустановленным Internet Information Server и платформой NET 4.0: Windows Server 2003; Windows Server 2008, 2008 R2.

Для серверной части необходимо предусмотреть использование системы управления базами данных Microsoft SQL Server 2005–2008.

Для работы с клиентской частью может использоваться любая операционная система с установленным пакетом Silver Light 3 и выше.

Для совместимости с офисными средствами обмен данными должен выполняться с использованием табличного процессора Microsoft Excel различных версий.

Все отчеты должны сохраняться в форматах табличного Microsoft Excel или текстового Microsoft Word процессоров.

Для функционирования ПК необходимо обеспечить наличие в сети разделяемой файловой области на любом закрытом сервере, где будут располагаться исполняемые и конфигурационные файлы ПК и информационные файлы для загрузки в базу данных.

Для организации регулярной автоматической загрузки данных из ОИК в базу данных ПК должна быть обеспечена круглосуточная работа сервера приложений (под управлением любой серверной операционной системы Windows), на котором будет регулярно запускаться модуль передачи данных. Периодичность этого запуска должна быть настраиваемой в расчете на автоматический режим загрузки. Также должна присутствовать возможность ручного принудительного запуска загрузки данных из ОИК.

Для доступа к ПК с любого компьютера должно быть разработано web-приложение, которое устанавливается на компьютере (сервере), доступ к которому разрешен в локальной сети или через internet. На сервере устанавливается серверная часть приложения и база данных.

При этом у пользователей должен быть доступ к серверу, установлен браузер, через который они и будут работать. Пользователю выдается логин и пароль, посредством которых обеспечивается авторизация.

Принципиальная схема взаимодействия между различными частями (модули) комплекса представлена на рисунке.

Разработана концепция автоматизированной системы контроля эффективности действия ЧДА с оценкой текущей генерируемой мощности, мощности нагрузки и объема АЧР в районах потенциального выделения при действии ЧДА. Оценку текущих значений генерируемой мощности предполагается осуществлять средствами телеизмерений, оценку мощностей нагрузки и объема АЧР при отсутствии или недостаточности средств телеизмерений — путем интерполяции на текущий момент времени результатов ежегодных контрольных замеров нагрузки.

Сформулированы основные требования к функционированию программного комплекса автоматизации системы контроля эффективности действия ЧДА.

Осуществляется разработка программного комплекса для мониторинга всех районов потенциального выделения действием ЧДА энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт ОАО «СО ЕЭС». Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности [Текст] / ОАО «СО ЕЭС». — М., 2009.

2. Катаев, Б. О повышении живучести мегаполисов [Электронный ресурс] / Б. Катаев, И. Катаев // Электронный журнал «Энергосистема». —

2010. — № 5–6.

3. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.10.035–2009. Правила оформления нормальных схем электрических соединений подстанций и графического отображения информации посредством программно-технических комплексов [Текст] / ОАО «ФСК ЕЭС». — М., 2009.,

МЕТОД РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ В ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКЕ

Постановка задачи

В практике эксплуатации различают в зависимости от скольжения s следующие асинхронные режимы:

при скольжениях $s \approx 1$ (например, кратковременные режимы при пуске двигателей, когда частота ЭДС в контурах ротора $\omega_{\text{рот}} = 2\pi 50 \text{ с}^{-1}$; длительные режимы при работе машины на нелинейную нагрузку, когда $\omega_{\text{рот}} > 2\pi 250 \text{ с}^{-1}$);

при скольжениях $s = 0,05$ (например, режимы длительностью $t = 30$ мин при $\omega_{\text{рот}} = 2\pi 2,5 \text{ с}^{-1}$ явнопольсных дизельных генераторов, турбогенераторов; асинхронный режим гидрогенераторов по ГОСТ 5616 не разрешен).

Отметим, что обмотка возбуждения при пуске двигателя и в асинхронных режимах генераторов замыкается на дополнительное сопротивление, так что ее влияние на эти режимы практически исключено. При работе в сети с преобразователями частоты влияние токов в обмотке ротора ослаблено; исследование осциллограмм токов в обмотке возбуждения подтверждает, что при определенных индуктивностях ротора их отрицательная полуволна при использовании современных систем возбуждения частично или полностью «срезается». МДС таких токов в длительных асинхронных режимах значительно меньше МДС токов демпферной обмотки; при необходимости пульсирующее поле токов в ней удобно учесть методом наложения [1, 7] (Приложение 4).

Система уравнений для магнитосвязанных контуров синхронной машины с учетом насыщения магнитной цепи и поверхностного эффекта в контурах ротора

Электромагнитные нагрузки машин во всех этих режимах в диапазоне частот $2\pi 2,5 \leq \omega_{\text{рот}} < 2\pi 600$ определяются из нелинейной системы уравнений [1] магнитосвязанных контуров (Приложение 1); при этом оказывается возможным

использовать опыт разработки и создания мощных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми и фазными роторами [2]–[5].

Исходные данные и результаты решения системы уравнений. Заданы: напряжение сети $U_{\text{ф}}$; размеры активной части машины; частота $\omega_{\text{ст}}$ и сопротивления $Z_{\text{ст}}$ фазы статора; частота $\omega_{\text{рот}}$ и сопротивления стержней (Z_B) и участков обоих короткозамыкающих колец (Z_R) демпферной обмотки ротора при этой частоте; характеристика холостого хода машины $F_0 = F_0(\Phi_{\text{вз}})$, где F_0 — МДС магнитной цепи, $\Phi_{\text{вз}}$ — поток взаимной индукции; обмоточные данные статора и конструкция демпферной обмотки (число стержней N_0 на полюсе, шаг по стержням и др.).

В результате решения для каждого значения скорости вращения ротора (частота $\omega_{\text{рот}}$) определяются: токи в обоих контурах машины (включая и токи в элементах конструкции демпферной обмотки); активная мощность $P_{\text{выб}}$, потребляемая из сети, и полная мощность или $\cos\phi$.

Итерационный метод решения. Из уравнений (П1) и (П2) системы при задании первого приближения амплитуды $B_{\text{вз}}(m)$ результирующего поля вычисляются поток взаимной индукции $\Phi_{\text{вз}}(m)$ и амплитуда ЭДС $E_{\text{ст}}$ обмотки статора, а из характеристики холостого хода по (П3) — МДС магнитной цепи $F_{\text{мц}}(m)$ (m — порядок пространственной гармоник; в последующих уравнениях он опущен). Согласно уравнению (П4) можно несколько увеличить [2] эту МДС до F_0 за счет ее активной составляющей $F_{\text{акт}}$; для этого необходимо вычислить потери холостого хода, соответствующие потоку $\Phi_{\text{вз}}$, и механические потери машины.

Перейдем к уравнению (П5). Для вычисления амплитуд гармоник МДС ротора $F_{\text{рот}}^*$ согласно (П5) необходимо предварительно определить:

токи I_N в участках короткозамыкающих колец и токи J_N в стержнях демпферной обмотки (метод определения этих токов) на основе результатов исследования регулярной замкнутой цепной схемы [6] изложен в следующем разделе статьи);



ступенчатую функцию распределения этих токов;

МДС и индукцию, создаваемые токами в обмотках ротора и статора.

Для явнополюсных машин, отличающихся величиной зазора по продольной (d) и поперечной (q) осям, для этого потребовалась реализация ряда линейных преобразований, эквивалентных линейным преобразованиям МДС в теории двух реакций [7]. Эти линейные преобразования в комплексной плоскости для гармоник МДС ротора $F_{\text{рот}}^*$ порядка $n \geq 1$ и индукции порядка $m \geq 1$ выполнены в четвертом и пятом разделах. В рамках этих преобразований оказывается возможным учесть пространственные гармоники $n \geq 1, m \geq 1$, причем демпферная обмотка не подразделяется на элементы по осям (d, q) машины.

В шестом разделе выполнены линейные преобразования для гармоник МДС $F_{\text{ст}}^*$ и индукции поля токов статора явнополюсных машин.

После того, как мы определили эквивалентные МДС $F_{\text{рот}}^*$, $F_{\text{ст}}^*$, перейдем к уравнению (П6) системы, которое является формулировкой закона полного тока [1] и определяет связь между обоими контурами машины исходя из вычисленных значений амплитуд МДС магнитной цепи F_0 и МДС $F_{\text{рот}}^*$. Из уравнения (П6) определяется амплитуда МДС обмотки статора $F_{\text{ст}}^*$, а из (П7) — ток статора $I_{\text{ст}}$. Согласно (П8) теперь возможно вычислить амплитуду напряжения $U_{\text{выб}}$ на выводах обмотки статора машины.

Отметим, что все найденные величины — потока $\Phi_{\text{вз}}$ и ЭДС $E_{\text{ст}}$; МДС $F_{\text{ст}}^*$ и $F_{\text{рот}}^*$ для обеих обмоток, F_0 и F_0 ; токи ротора I_N , J_N и статора $I_{\text{ст}}$, напряжения $U_{\text{выб}}$ — соответствуют произвольно принятому значению амплитуды индукции в зазоре $B_{\text{вз}}$. В практических расчетах эта амплитуда $B_{\text{вз}}$ должна быть выбрана такой, чтобы напряжение $U_{\text{выб}}$ было равно напряжению сети $U_{\text{ф}}$: $U_{\text{ф}} \approx |U_{\text{выб}}|$. Тогда эта амплитуда будет решением системы уравнений (П1) — (П8).

Следовательно, решение системы (П1)–(П8) сводится к определению корня уравнения вида $U_{\text{выб}} = U_{\text{выб}}(B_{\text{вз}})$ при условии

$$\left| \frac{U_{\text{выб}}}{U_{\text{ф}}} - 1 \right| < u, \quad (1)$$

где u — точность вычислений; обычно принимают $u < 0,05$.

В алгоритме $U_{\text{выб}} = U_{\text{выб}}(B_{\text{вз}})$ используются нелинейные зависимости активных и индуктивных сопротивлений стержней демпферной обмотки от частоты $\omega_{\text{рот}}$, характеристика холостого хода согласно (П3) и др.

Корень уравнения при условии (1) может быть найден одним из численных методов решения нелинейных уравнений [9]. Начальное приближение для амплитуды $B_{\text{вз}}$ определяется из уравнений (П1), (П2), (П8) и (1):

$$B_{\text{вз}} < \frac{U_{\text{ф}} \pi}{2 \tau L \omega_{\text{ст}} w_{\text{ст}} K_{\text{вст}}}. \quad (2)$$

Здесь L — активная длина статора (ротора); $w_{\text{ст}}$, $K_{\text{вст}}$ — число витков и обмоточный коэффициент; τ — полюсное деление.

При выполнении условия (1) вычисляется также активная мощность, потребляемая из сети: $P_{\text{акт}} = 1,5 I_{\text{ст}} U_{\text{ф}} \cos \varphi$.

Определение токов I_N

в участках короткозамыкающих колец и токов J_N в стержнях демпферной обмотки

Вспользуемся математической моделью токов демпферной обмотки для мощных синхронных машин, разработанной в [6]. Обозначим предварительно число стержней на каждом из $2p$ полюсов через N_0 ; порядковые номера этих стержней: $N = 0, 1, 2, 3, \dots, N_0 - 1$; участок между соседними стержнями обозначим тем же номером (например, участку между стержнями с номерами $N = 0$ и $N = 1$ присвоим номер $N = 0$).

Сопротивления элементов демпферной обмотки с учетом ее конструкции. Установим предварительно связь между сопротивлениями элементов замкнутой цепной схемы в [1, 6] и элементами конструкции демпферной обмотки явнополюсных и неявнополюсных машин.

Стержни на полюсе с сопротивлением Z_B и участки короткозамыкающих колец (сегментов) между ними с сопротивлением Z_R образуют на полюсе группу; она состоит из N_0 стержней. Такие группы на полюсах соединены участками колец (сегментов) с сопротивлением Z_F , причем $Z_F \neq Z_R \neq Z_B$. Конструкция демпферной обмотки неявнополюсных машин имеет особенности: зубцы ротора числом $N_0 = Z_2$ и клинья в его пазах тоже образуют симметричную группу. Эквивалентное сопротивление каждой пары клин — зубец обозначим также Z_B . В пределах группы

они соединены параллельно по торцам машины участками вала. Сопротивление каждого из этих участков равно Z_R , а сопротивление участков вала между группами равно Z_F ; здесь Z_2 — число пазов ротора. Отметим, что конструкция демпферной обмотки мощных турбогенераторов предусматривает установку под клиньями медных полос; тогда Z_B — эквивалентное сопротивление зубцов, клиньев и медных полос под ними, соединенных параллельно. На валу ротора в зоне бандажных колец у этих турбогенераторов устанавливаются медные листы (сегменты); тогда Z_R , Z_F — эквивалентное сопротивление соответствующих участков вала и медных листов. В конструкции турбодвигателей клинья выполняются из двух половин, отличающихся удельным сопротивлением; тогда Z_B — полное эквивалентное сопротивление зубца и обеих половин клина. Таким образом, демпферная обмотка неявнополюсных машин также соответствует замкнутой цепной схеме, исследованной в [6].

Сопротивления Z_B обмотки соответствуют поперечным элементам замкнутой цепной схемы в [6], сопротивления Z_R — продольным элементам, а Z_F — сопротивлениям между симметричными группами данной цепной схемы. Метод расчета асинхронных режимов, изложенный в этой работе, предполагает, что $Z_B \neq f(N)$; особенности их расчета при $Z_B = f(N)$ рассмотрены в [8].

Запишем расчетные выражения для сопротивлений элементов демпферной обмотки:

а) для явнополюсных машин обычно стержни — круглые, укладываются с торца ротора в полузакрытые пазы с узким шлицом; полюс — шихтованный; сопротивление стержня Z_B вычисляется [2, 8] с учетом поверхностного эффекта, если «приведенная высота» стержня $K'd_{ст} = 1$, где

$K' = \sqrt{\omega_{рот} \mu_0 \gamma / 2}$, μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; γ — удельное сопротивление проводника; $d_{ст}$ — диаметр стержня. Выражения для коэффициентов увеличения сопротивления (коэффициенты Филда) и уменьшения индуктивности круглых стержней приведены в [2]. Сопротивление Z_R вычисляется согласно [2] с учетом того, что длина участка кольца b между стержнями (шаг по стержням) равна $b = b_p / (N_0 - 1)$, где $b_p = b'_p - 2\Delta$ (b_p — ширина полюса; Δ — расстояние от кромки полюса до соседнего с ней стержня; в работе принято $\Delta \approx 0$). Сопротивление Z_F вычисляется аналогично: длина участка кольца

между полюсами $2b_F = (T/2 - b_p)$. При вычислении сопротивлений Z_R и Z_F поверхностный эффект обычно не учитывается [2];

б) для неявнополюсных машин эквивалентное сопротивление стержня Z_B определяется в общем случае тремя сопротивлениями, соединенными параллельно: сопротивлением Z_{B1} пазового клина, сопротивлением Z_{B2} медной полосы под этим клином, сопротивлением Z_{BZ} зубца ротора. Эквивалентное сопротивление короткозамыкающего кольца Z_R представляется двумя сопротивлениями, соединенными параллельно: сопротивлением Z_{R1} участков вала (массив бочки ротора в зоне бандажного кольца) и сопротивлением Z_{R2} медного листа (сегмента) в этой же зоне. Рассмотрим основные расчетные выражения для этих сопротивлений.

Сопротивление Z_{B1} вычисляется согласно [4], причем для машин с непосредственным газовым охлаждением ротора омическое сопротивление клина больше по сравнению с конструкциями, где клин — сплошной: сечение пазового клина уменьшено из-за вентиляционных каналов в нем.

Сопротивления Z_{BZ} зубца ротора и Z_{R1} участков вала (в зоне бандажного кольца) нелинейны: они зависят от степени насыщения массива ротора и глубины проникновения

$\Lambda_{FE} \approx 0,75 \cdot 10^{-4} \sqrt{AS / f_{рот}}$, м; здесь AS — линейная нагрузка (в А/м). Оба сопротивления вычисляются по соотношениям [4]

$$Z_{BZ} = \frac{(1 + j0,6) L \rho_{FE}}{b_Z \Lambda_{FE}};$$

$$Z_{R1} = (1 + j0,6) \frac{\pi D_{банд}}{2p} \frac{\rho_{FE}}{b_{банд} \Lambda_{FE}}. \quad (3)$$

Здесь b_Z — средняя ширина зубца ротора; $b_{банд}$, $D_{банд}$ — длина участка вала и его диаметр под бандажом; ρ_{FE} — удельное сопротивление стали вала ротора; сопротивления Z_{B2} и Z_{R2} вычисляются согласно [2].

ЭДС в контурах демпферной обмотки. Установим теперь связь между ЭДС в звеньях активной цепной схемы [6] и ЭДС в контурах демпферной обмотки (см. рис.) явнополюсных и неявнополюсных машин с учетом особенностей их конструкции. Эти ЭДС индуктируются полем взаимной индукции с амплитудой $B_{вз}$.

ЭДС E_F в контуре ($N_0 - 1, N=0$) между стержнями соседних полюсов и ЭДС $E_{N+1, N+0}$ в контуре ($N+1, N+0$) соответственно равны

$$E_F = -j\omega_{\text{рот}} B_{\text{вз}} \frac{T}{\pi m} \sin\left(\frac{2\pi m}{T}\right) b_F;$$

$$E_{N+1, N+0} = E_M \exp\left(-j \frac{2\pi m b}{T}\right) (N+0). \quad (4)$$

Здесь $E_M = -j\omega_{\text{рот}} B_{\text{вз}} \frac{T}{\pi m} \sin\left(\frac{\pi m b}{T}\right) \times$

$$\times \exp\left(-j \frac{\pi m}{T} (2b_F + b)\right).$$

Токи в участках кольца I_N и в стержнях J_N демпферной обмотки. Токи I_N в продольных элементах замкнутой цепной схемы [6] соответствуют токам в участках кольца (сегментах) демпферной обмотки, а токи J_N в ее поперечных элементах — токам в стержнях. Эти токи с учетом особенностей конструкции обмотки и размеров ее элементов имеют вид [6]

$$I_N = C_1 a_1^N + C_2 a_2^N + \frac{E_M}{Z_B K_B} \exp\left(-j \frac{\pi m}{T} 2bN\right);$$

$$J_N = C_1 a_1^{N-1} (a_1 - 1) +$$

$$+ C_2 a_2^{N-1} (a_2 - 1) + \frac{E_M}{Z_B K_B} \left[1 - \exp\left(-j \frac{\pi m}{T} 2b\right)\right] \times$$

$$\times \exp\left(-j \frac{\pi m}{T} 2bN\right), \quad (5)$$

где E_M находится по (4). Значения постоянных C_1, C_2 , коэффициентов a_1, a_2, K_B с учетом конструктивных особенностей машин приведены в Приложении 2.

Проверка расчетных выражений для токов демпферной обмотки

Пример расчета. В табл. 1 представлено распределение токов в элементах демпферной обмотки (см. рис.) явнополюсной машины (номинальная активная мощность — 20 мВт; номинальное напряжение — 10,5 кВ, $2p = 56$, $T = 0,914$ м, $N_0 = 6$; $2b_F = 207,214$ м; $L = 1,15$ м; $b = 50 \cdot 10^{-4}$ м, частота при пуске $\omega_{\text{рот}} = 100 \text{ р с}^{-1}$).

Сопротивления ее элементов: $Z_B = 6,806 \cdot 10^{-4} \times \exp(j 81,52)$; $2Z_R = 4,093 \cdot 10^{-4} \exp(j 86,92)$; $2Z_F = 1,696 \cdot 10^{-4} \exp(j 81,52)$.

В табл. 1 ток в стержне с номером $N = 2$ принят за 100 %. Из этой таблицы следует, что токи в сегментах между обоими полюсами равны по величине и противоположны по знаку: $I_{N=-1} = -I_{N=5}$. Это соответствует закону Кирхгофа для распределения токов в сегментах демпферной обмотки на полюсах противоположной полярности и является дополнительной проверкой расчетных выражений (5).

Из табл. 1 также следует, что распределение токов в элементах отличается от гармонического: $|J_N| \neq \text{const}$; $\Delta \alpha_N \neq \text{const}$; $|I_N| \neq \text{const}$; $\Delta \beta_N \neq \text{const}$. Ток в среднем стержне ($N = 2$) минимален (см. табл. 1), а токи в крайних ($N = 0$) и ($N = 5$) — максимальны. Отличие от гармонического распределения токов связано с влиянием обеих апериодических компонент в уравнениях (5) и зависит от соотношения активных и индуктивных составляющих в сопротивлениях Z_F, Z_B, Z_R .

Частный случай: $2b_F = b$ (беличья клетка асинхронной машины). В конструкциях мощных турбогенераторов многих фирм для выравнивания жесткости по продольной и поперечной осям ротора в каждом «большом зубе» выполняют пазы. Эти пазы заполняются сталью и заклиниваются;

Таблица 1

Распределение токов в элементах демпферной обмотки

N	$J_N = J_N \exp(j\alpha_N)$	$I_N = I_N \exp(j\beta_N)$
-1	—	$2,52 \exp(j 8,09)$
0	$1,026 \exp(-j 120,04)$	$2,07 \exp(-j 18,79)$
1	$1,023 \exp(-j 141,5)$	$1,81 \exp(-j 49,52)$
2	$1,0 \exp(-j 164,53)$	$1,73 \exp(-j 82,53)$
3	$1,026 \exp(j 172,31)$	$1,82 \exp(-j 115,33)$
4	$1,1 \exp(j 150,59)$	$2,08 \exp(-j 145,58)$
5	$1,21 \exp(j 131,28)$	$2,52 \exp(-j 171,9)$

под клинья укладываются медные полосы. В таких конструкциях демпферная обмотка аналогична беличьей клетке асинхронной машины: в ней $2b_F = b$ и соответственно $Z_F = Z_R$.

Токи J_N в стержнях такой клетки изменяются в зависимости от номера N по гармоническому закону [7]. Следовательно, необходимо доказать, что в частном случае при $Z_F = Z_R$ обе апериодические компоненты тока J_N с амплитудами C_1 и C_2 в уравнениях (5) равны нулю.

Рассмотрим сначала выражение для амплитуды $C_1 = D_3/D_0$ (см. Приложение 2). Для этой конструкции ($Z_F = Z_R \neq 0$) имеем $a_1 \neq a_2 \neq 0$ и, следовательно, определитель системы $D_0 \neq 0$. Перейдем к выражению для D_3 . В нем — два слагаемых; в первом из них имеется сомножитель

$$\left(-\frac{E_F}{Z_B} + C_0 K_{\sigma 0}\right), \text{ а во втором } - \left[\exp\left[-j\frac{\pi m}{T} \times \right.\right. \\ \left.\left. \times 2b(N_0 - 1)\right] + \exp\left[-j\frac{\pi m}{T} 2b\right]\right].$$

Сомножитель в первом слагаемом при $Z_F = Z_R$ имеет особенности: $K_{\sigma 0} = K_B$, так что $-E_F/Z_B = -C_0 K_{\sigma 0}$. Сомножитель во втором слагаемом при $Z_F = Z_R$ также имеет особенности: оба слагаемых равны по величине и противоположны по знаку. Следовательно, числитель $D_3 = 0$; аналогично и числитель $D_4 = 0$. В результате мы получили подтверждение справедливости полученных расчетных выражений (5) для токов I_N и J_N .

Ступенчатые функции тока демпферных обмоток. Комплексные амплитуды гармоник МДС

Основные допущения. В конструкции явнополюсных машин стержни демпферной обмотки устанавливаются обычно в пазах с торца ротора, ширина шлица составляет $b_{ш} = 2-4$ мм, а отношение ее к шагу t_n по пазам мало: $b_{ш}/t_n < 0,05-0,1$. Поэтому можно считать, что ток в стержнях сосредоточен на оси паза. Соответственно функция тока в стержнях (МДС) в зазоре на периоде $T = \pi D$ принимает ступенчатую форму. Очередной скачок МДС на величину тока в пазу имеет место при достижении оси симметрии паза по мере увеличения его номера.

В конструкции неявнополюсных машин пазы ротора выполняются открытыми (с немагнитными клиньями). Исследования показали [8]: даже при резком проявлении поверхностно-

го эффекта в зубце и клине можно допустить, что функция тока в пределах пазового деления нарастает линейно, на величину токов в зубце и в клине; при этом учет линейного изменения функции тока вдоль ширины паза практически не влияет на амплитуду низших гармоник МДС, представляющих наибольший практический интерес. Поэтому и для открытых пазов с достаточной для практики точностью можно считать, что ток сосредоточен на оси пазового деления, если ограничить расчет МДС гармониками порядка $n = 5, 7, 11$. Учет конечной ширины пазов приведен в [8].

Особенности ступенчатой функции тока (МДС). Воспользуемся законом полного тока [1]. Элементы ступенчатой функции тока, полученные из этого закона, представлены в виде табл. 2.

В ее первом столбце указаны порядковые номера участков (номер ступени) между осями симметрии соседних стержней на соседних полюсах с номерами H и $H + 1$. На протяжении каждого такого участка функция тока сохраняет свое неизменное значение до встречи с осью следующего паза (по мере увеличения номера стержня), где она возрастает скачком на величину тока в этом пазу. Во втором столбце табл. 2 указана протяженность каждой ступени; при этом использованы следующие геометрические соотношения (см. рис. 1): $(N_0 - 1)b + 2b_F = 0,5T = \tau$. В третьем столбце этой таблицы указаны значения функции тока $f_d(x)$ или МДС («высоты ступеней под зубцами каждого полюса»); функция тока $f_d(x)$ имеет период $T = \pi D/p$.

В табл. 2 указаны все необходимые параметры для графического построения ступенчатой функции тока $f_d(x)$ и для математических операций над ней, в том числе для ее гармонического анализа.

Представление ступенчатой функции тока $f_d(x)$ в виде гармонического ряда в комплексной плоскости; физическая трактовка. Запишем сначала математическую формулировку гармонического ряда в комплексной форме [8, 9] для ступенчатой функции тока $f_d(x)$:

$$f_d(x) = \sum_n \left[F_{дпр}(-n) \exp\left(-j\frac{2\pi nx}{T}\right) + \right. \\ \left. + F_{ддоп}(n) \exp\left(j\frac{2\pi nx}{T}\right) \right] + C_0. \quad (6)$$

Таблица 2

Ступенчатая функция тока $f_d(x)$ демпферной обмотки ротора

Порядковый номер ступени	Протяженность ступени	Функция тока («высоты ступеней») $f_d(x)$
Полюс номер H		
0	$-\tau + b_f \leq x < -\tau + b_f + b$	$J_0^{(K)} J_0^{(K)}$
1	$-\tau + b_f \leq x < -\tau + b_f + 2b$	$J_0^{(K)} + J_1^{(K)} J_0^{(K)} + J_1^{(K)}$
2	$-\tau + b_f + 2b \leq x < -\tau + b_f + 3b$	$J_0^{(K)} + J_1^{(K)} + J_2^{(K)}$
.....
$N_0 - 1$	$-b_f \leq x < b_f$	$J_0^{(K)} + J_1^{(K)} + \dots + J_{N_0-1}^{(K)}$
Полюс номер $H + 1$		
0	$b_f \leq x < b_f + b$	$J_1^{(K)} + \dots + J_{N_0-1}^{(K)}$
1	$b_f + b \leq x < b_f + 2b$	$J_2^{(K)} + \dots + J_{N_0-1}^{(K)}$
2	$b_f + 2b \leq x < b_f + 3b$	$J_3^{(K)} + \dots + J_{N_0-1}^{(K)}$
.....
$N_0 - 2$	$b_f + (N_0 - 2)b \leq x < \tau - b_f$	$J_{N_0-1}^{(K)}$
$N_0 - 1$	$\tau - b_f \leq x < \tau$	0

В этом выражении суммирование членов ряда ведется по номерам гармоник МДС ротора (n). Коэффициенты разложения равны [9]

$$F_{\text{дпр}}(-n) = \frac{1}{T} \int_{-0,5T}^{0,5T} f_d(x) \exp\left(j \frac{2\pi n x}{T}\right) dx. \quad (7)$$

Здесь $f_d(x)$ — в соответствии с табл. 2 (третий столбец). Выражение для амплитуды $F_{\text{д доп}}(n)$ гармоники порядка n может быть получено из $F_{\text{д пр}}(-n)$ заменой n на $(-n)$.

Учитывая свойства магнитного поля [1] получаем, что коэффициент $C_0 = 0$.

Рассмотрим подробнее гармоники порядка n для обеих составляющих МДС ротора соответственно обоим слагаемым в выражении (6):

$$f_{\text{д1}}(x, n) = F_{\text{д пр}}(-n) \exp\left(-j \frac{2\pi n x}{T}\right), \quad (8')$$

$$f_{\text{д2}}(x, n) = F_{\text{д доп}}(n) \exp\left(j \frac{2\pi n x}{T}\right); \quad (8'')$$

согласно (6) для каждой гармоники порядка n справедливо:

$$f_d(x, n) = f_{\text{д1}}(x, n) + f_{\text{д2}}(x, n). \quad (9)$$

Отметим предварительно, что частота токов J_N и I_N равна $\omega_{\text{рот}}$, так что эти токи можно представить в виде комплексов

$$J_N = |J_N| \exp(j\omega_{\text{рот}} t); \quad I_N = |I_N| \exp(j\omega_{\text{рот}} t).$$

Поэтому выражение (8') принимает вид

$$f'_{\text{д1}}(x, n, t) = |F_{\text{д пр}}(-n)| \exp\left(j\omega_{\text{рот}} t - j \frac{2\pi n x}{T}\right). \quad (10)$$

Здесь $|F_{\text{д пр}}(-n)|$ — амплитуда МДС $f'_{\text{д1}}(x, n, t)$. Таким образом, в выражениях (6)–(8') амплитуда $F_{\text{д пр}}(-n)$ является комплексной и равна

$$F_{\text{д пр}}(-n) = |F_{\text{д пр}}(-n)| \exp(j\omega_{\text{рот}} t). \quad (11)$$

Аналогично для гармоники порядка n составляющей МДС ротора соответственно второму слагаемому в выражении (6) имеем

$$f'_{d2}(x, n, t) = \\ = \left| F_{\text{д доп}}(-n) \right| \exp \left(j\omega_{\text{рот}} t + j \frac{2\pi n x}{T} \right); \\ F_{\text{д пр}}(n) = \left| F_{\text{д пр}}(n) \right| \exp(j\omega_{\text{рот}} t). \quad (12)$$

Уравнения для $f_{d1}(x, n)$ и $f'_{d1}(x, n, t)$ описывают вращающуюся волну МДС с комплексной амплитудой $F_{\text{д пр}}(-n)$; ее направление вращения — в сторону положительных значений координаты x , то есть согласно направлению вращения ротора. Ее угловая скорость относительно статора равна $\omega_{\text{ст-рот 1}} = \omega_{\text{рот}}/(pn) + \omega_{\text{вр}}$. Здесь $R = 0,5D$ — расчетный радиус по полюсам; $\omega_{\text{вр}}$ — угловая скорость вращения ротора. Соответственно уравнения (8') и (12) описывают вращающуюся волну с комплексной амплитудой $F_{\text{д доп}}(n)$; ее направление вращения — в сторону либо положительных значений координаты x , либо отрицательных в зависимости от величины $\omega_{\text{вр}}$. Скорость ее относительно ротора равна: $V_{\text{рот 2}} = -V_{\text{рот 1}}$, а скорость относительно статора: $\omega_{\text{ст-рот 2}} = -\omega_{\text{рот}}/(pn) - \omega_{\text{вр}}$.

Таким образом, используя представление гармонического ряда (ряд Фурье) в комплексной плоскости и символический метод для гармонических функций тока J_N и I_N , мы получили возможность дать обоим слагаемым этого ряда физическую трактовку в виде двух групп вращающихся волн МДС, создаваемых токами в демпферных обмотках ротора машин переменного тока.

Расчетные выражения для комплексных амплитуд МДС демпферных обмоток. Выше, во втором разделе, получено выражение для расчета токов J_N в стержнях демпферной обмотки. Для удобства вычисления комплексных амплитуд МДС $F_{\text{д пр}}(-n)$ и $F_{\text{д доп}}(n)$ представим его в виде

$$J_N = C_1 a_1^N (1 - a_1^{-1}) + \\ + C_2 a_2^N (1 - a_2^{-1}) + C_0 a_0^N (1 - a_0^{-1}), \quad (13)$$

$$\text{где } C_0 = \frac{E_M}{Z_B K_B}; \quad a_0 = \exp \left(-j \frac{\pi m}{T} 2b \right).$$

Для краткости представим J_N таким образом:

$$J_N = \sum_K C_K a_K^N (1 - a_K^{-1}). \quad (14)$$

Здесь суммирование ведется по параметру K , причем он принимает значения: 0, 1, 2; например, для коэффициентов a_K имеем: $a_K \in a_0, a_1, a_2$.

Воспользуемся выражениями для участков ступенчатой функции тока $f_d(x)$ из табл. 2, а также выражением для комплексной амплитуды $F_{\text{д пр}}(-n)$:

$$F_{\text{д пр}}(-n) = \sum_K \left\{ \frac{-C_K}{j\pi n_{\text{эл}}} \exp \left(\frac{j\pi n_{\text{эл}} b_F}{T_{\text{эл}}} \right) (a_K - 1) \times \right. \\ \times a_K^{-1} \left[1 + a_K \exp \left(\frac{j2\pi n_{\text{эл}} b}{T_{\text{эл}}} \right) \times \right. \\ \times a_K^2 \exp \left(\frac{j2\pi n_{\text{эл}} 2b}{T_{\text{эл}}} \right) + a_K^3 \exp \left(\frac{j2\pi n_{\text{эл}} 3b}{T_{\text{эл}}} \right) + \dots + \\ \left. \left. + a_K^{N_0-1} \exp \left(\frac{j2\pi n_{\text{эл}} (N_0-1)b}{T_{\text{эл}}} \right) \right] \right\}.$$

Выражение в квадратных скобках является геометрической прогрессией со знаменателем

$q = a_K \exp \left(\frac{j2\pi n b}{T} \right)$. Найдем ее сумму. Тогда комплексная амплитуда $F_{\text{д пр}}(-n)$ приобретает вид

$$F_{\text{д пр}}(-n) = \\ = \sum_K \left[\frac{C_K}{j\pi n} \exp \left(\frac{j\pi n 2b_F}{T} \right) (a_K - 1) a_K^{-1} \Psi^{\text{пр}}(-n) \right]; \\ \Psi^{\text{пр}}(-n) = \frac{1 - a_K \exp \left(\frac{j2\pi n b}{T} \right)^{N_0}}{1 - a_K \exp \left(\frac{j2\pi n b}{T} \right)}. \quad (15)$$

Выражение для комплексной амплитуды $F_{\text{д доп}}(n)$ получается из (15) заменой (n) на $(-n)$.

Проверка расчетных выражений для МДС (частный случай). В третьем разделе отмечено, что для полной демпферной обмотки мощного турбогенератора и для беличьей клетки асинхронной машины справедливо соотношение $2b_F = b$. Следовательно, для таких конструкций мы должны получить из (15) известные [7] выражения для МДС обмотки статора машины переменного тока. Например, для гармоник порядка $n = 1$ должно быть



$$F_{\text{як}} = \frac{m_{\text{ф}} I_{\text{ст}} W_{\text{ст}} K_{W \text{ ст}}}{p}; \quad F_{\text{д доп}}(n=1)=0. \quad (15')$$

Здесь $m_{\text{ф}}$ — число фаз, p — число пар полюсов. Для беличьей клетки: $m_{\text{ф}} = N_0 2p$ — число пазов; $I_{\text{ст}}$ — ток в стержне клетки; $W_{\text{ст}} = 0,5$; $K_{W \text{ ст}} = 1$.

В третьем разделе было получено: $C_1 = 0$; $C_2 = 0$ при $2b_F = b$. Тогда из выражения для числителя $\Psi_{\text{пр}}(n=-1)$ имеем: $[1 - a_0 \exp(j2\pi b/T)^{N_0}] = 0$; знаменатель также равен нулю. Раскрывая неопределенность, получаем $\Psi_{\text{пр}}(n=-1) = N_0$; из выражения для $\Psi_{\text{доп}}(n=1)$ следует $\Psi_{\text{доп}}(n=1) = 0$.

В результате получаем при $n=1$

$$|F_{\text{д пр}}(n=-1)| = F_{\text{як}}; \quad F_{\text{д доп}}(n=1)=0.$$

Это подтверждает справедливость полученных расчетных выражений для комплексных амплитуд гармоник МДС демпферной обмотки ротора.

Комплексные амплитуды индукции поля демпферной обмотки ротора. Эквивалентные МДС $F_{\text{рот}}^*$

Поле в зазоре, возбуждаемое токами в демпферной обмотке, определяется не только гармониками МДС с комплексными амплитудами $F_{\text{д пр}}(-n)$, $F_{\text{д доп}}(n)$ согласно (6)–(15), но и другими факторами: формой зазора между ротором и статором, уровнем насыщения магнитной цепи машины [7] и др. Для машин неявнополюсных и явнополюсных эти факторы имеют особенности.

Неявнополюсные машины. Зазор $\delta_{\text{э кв}}$ у машин этого типа — постоянный ($\delta_{\text{э кв}} = \text{const}$). Представим поле $b_{\text{д}}(x)$ токов демпферной обмотки в виде ряда в комплексной плоскости аналогично (6):

$$b_{\text{д}}(x) = \sum_m \left[B_{\text{д пр}}(-m) \exp\left(\frac{-j2\pi mx}{T}\right) + B_{\text{д доп}}(m) \exp\left(\frac{j2\pi mx}{T}\right) \right]. \quad (16)$$

В этом выражении суммирование членов ряда ведется по номерам m гармоник индукции ротора; комплексные амплитуды индукции равны

$$B_{\text{д пр}}(-m) = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{э кв}} k_{\text{нас}} k_{\text{карт}}} F_{\text{д пр}}(-m);$$

$$B_{\text{д доп}}(-m) = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{э кв}} k_{\text{нас}} k_{\text{карт}}} F_{\text{д доп}}(m). \quad (17)$$

Здесь μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; $k_{\text{нас}}$ — коэффициент насыщения магнитной цепи; $k_{\text{карт}}$ — коэффициент Картера [2, 7]. Отметим, что коэффициент $k_{\text{нас}}$ обычно вычисляют для гармоник поля порядка $m=1$; для гармоник порядка $m>1$ его можно уточнить методом итераций. Аналогично для гармоник $m=1$ вычисляется и $k_{\text{карт}}$; при $m>1$ его величина несколько изменяется, однако в практических расчетах этим обычно пренебрегают.

Из соотношений (17) следует, что для неявнополюсной машины при решении системы уравнений (П1)–(П8) можно в уравнении (П5) принять:

а) $F_{\text{д пр}}(-m) = F_{\text{рот}}^*$, если расчет ведется для поля с угловой скоростью относительно статора $\omega_{\text{ст-рот1}} = \omega_{\text{рот}}/(pm) + \omega_{\text{вр}}$;

б) $F_{\text{д доп}}(m) = F_{\text{рот}}^*$, если расчет ведется для поля со скоростью относительно статора: $\omega_{\text{ст-рот2}} = -\omega_{\text{рот}}/(pm) + \omega_{\text{вр}}$ (Приложение 3).

Явнополюсные машины

Эквивалентный зазор в пределах периода T

Для этих машин изменение зазора $\delta_{\text{э кв}}$ в тангенциальном направлении вдоль угловой координаты $\varphi = 2\pi x/T$ (вдоль расточки статора) определяется поперечным сечением машины. Функция $\delta_{\text{э кв}}(\varphi)$ представлена в табл. 3. Предполагается, что ось отсчета углов φ совпадает с поперечной осью q ротора.

Здесь $\alpha = b_p/\tau$, $b_p = (N_0 - 1)b$; $b_{\text{д}}(\varphi)$ — индукция в зазоре поля токов демпферной обмотки ротора. В качестве эквивалентного зазора $\delta_{\text{э кв}}$ в расчетной практике принято [2]

$$\delta_{\text{э кв}} = \delta_{\text{мин}} + 0,33(\delta_{\text{макс}} - \delta_{\text{мин}}) = \text{const}, \quad (18)$$

где $\delta_{\text{макс}}$, $\delta_{\text{мин}}$ — максимальное и минимальное значения зазора под полюсом.

Расчетные выражения для комплексных амплитуд индукции демпферных обмоток. Для явнополюсных машин, как и для неявнополюсных, представим поле $b_{\text{д}}(x)$ токов демпферной обмотки в виде ряда на комплексной плоскости [9]. Для каждой гармоники поля порядка m имеем

$$b_{\text{д}}(x, m) = b_{\text{д1}}(x, m) + b_{\text{д2}}(x, m), \quad (19)$$

где $b_{\text{д1}}(x, m) = B_{\text{д пр}}(-m) \exp(-j2\pi mx/T)$;
 $b_{\text{д2}}(x, m) = B_{\text{д доп}}(m) \exp(j2\pi mx/T)$.

Таблица 3

Изменение зазора $\delta_{\text{эКВ}}(\varphi)$ явнополюсной машины вдоль угловой координаты $\varphi (-\pi \leq \varphi \leq \pi)$

Угловая координата	Зазор $\delta(\varphi)$	Индукция
$-\pi \leq \varphi \leq -(1 + \alpha)\pi/2$	$\delta_{\text{эКВ}}(\varphi) \rightarrow \infty$	$b_{\text{д}}(\varphi) \approx 0$
$-(1 + \alpha)\pi/2 < \varphi \leq -(1 - \alpha)\pi/2$	$\delta_{\text{эКВ}}(\varphi) = \delta_{\text{эКВ}}$	$b_{\text{д}}(\varphi) \neq 0$
$-(1 - \alpha)\pi/2 < \varphi \leq (1 - \alpha)\pi/2$	$\delta_{\text{эКВ}}(\varphi) \rightarrow \infty$	$b_{\text{д}}(\varphi) \approx 0$
$(1 - \alpha)\pi/2 < \varphi \leq (1 + \alpha)\pi/2$	$\delta_{\text{эКВ}}(\varphi) = \delta_{\text{эКВ}}$	$b_{\text{д}}(\varphi) \neq 0$
$(1 + \alpha)\pi/2 < \varphi \leq \pi$	$\delta_{\text{эКВ}}(\varphi) \rightarrow \infty$	$b_{\text{д}}(\varphi) \approx 0$

Найдем комплексные амплитуды $B_{\text{д пр}}(-m)$ и $B_{\text{д доп}}(m)$, учитывая соотношение $b_{\text{д}}(x, m) = [\mu_0 / (d_{\text{эКВ}} k_{\text{нас}} k_{\text{карт}})] f_{\text{д}}(x, n)$, а также зависимость $\delta_{\text{эКВ}}(\varphi)$ для эквивалентного зазора в табл. 3. Комплексная амплитуда $B_{\text{д доп}}(m)$ равна

$$\begin{aligned}
 B_{\text{д доп}}(m) = & \frac{F_{\text{д пр}}(-n)G_M}{j2\pi(n+m)} \times \\
 & \times \left\{ \exp \left[\frac{j2\pi(n+m)(-b_F)}{T} \right] - \right. \\
 & - \exp \left[\frac{j2\pi(n+m)(-b_F - b_P)}{T} \right] + \\
 & + \exp \left[\frac{j2\pi(n+m)(b_F + b_P)}{T} \right] - \\
 & - \exp \left[\frac{j2\pi(n+m)b_F}{T} \right] \left. \right\} + \frac{F_{\text{д доп}}(n)G_M}{j2\pi(-n+m)} \times \\
 & \times \left\{ \exp \left[\frac{j2\pi(-n+m)(-b_F)}{T} \right] - \right. \\
 & - \exp \left[\frac{j2\pi(-n+m)(-b_F - b_P)}{T} \right] + \\
 & + \exp \left[\frac{j2\pi(-n+m)(b_F + b_P)}{T} \right] - \\
 & - \exp \left[\frac{j2\pi(-n+m)b_F}{T} \right] \left. \right\}, \quad (20)
 \end{aligned}$$

здесь $G_M = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{эКВ}} k_{\text{нас}} k_{\text{карт}}}$.

Комплексная амплитуда $B_{\text{д пр}}(-m)$ может быть получена из (20) заменой порядка m на $(-m)$. Ограничим задачу вычисления этих амплитуд условием, представляющим наибольший практический интерес: $m = n$.

В этом случае для комплексных амплитуд индукции получаем

$$\begin{aligned}
 B_{\text{д пр}}(-m) = & \frac{F_{\text{д пр}}(-n)G_M 2b_P}{T} + \\
 & + F_{\text{д доп}}(n)G_M \frac{-1}{\pi m} \sin \left(\frac{2\pi m b}{T} \right); \\
 B_{\text{д доп}}(m) = & \frac{F_{\text{д доп}}(n)G_M 2b_P}{T} + \\
 & + F_{\text{д пр}}(-n)G_M \frac{-1}{\pi m} \sin \left(\frac{2\pi m b}{T} \right). \quad (20')
 \end{aligned}$$

Таким образом, ротору явнополюсной машины с зазором $\delta_{\text{эКВ}}(\varphi)$, изменяющимся по периферии ротора согласно табл. 3, поставлен в соответствие ротор с постоянным зазором $\delta_{\text{эКВ}}$ согласно (18); токи в его демпферной обмотке образуют два поля: $b_{\text{д1}}(x, m)$ с комплексной амплитудой $B_{\text{д пр}}(-m)$ и $b_{\text{д2}}(x, m)$ с комплексной амплитудой $B_{\text{д доп}}(m)$ по (19)–(20').

Из соотношений (19)–(20') следует, что для явнополюсной машины при решении системы уравнений (П1)–(П8) можно в уравнении (П5) принять:

а) $B_{\text{д пр}}(-m)/G_M = F_{\text{рот}}^*$, если расчет ведется для поля с угловой скоростью относительно статора: $\omega_{\text{ст-рот1}} = \omega_{\text{рот}}/(pm) + \omega_{\text{вр}}$;

б) $B_{\text{д доп}}(m)/G_M = (F_{\text{рот}}^*)'$, если расчет ведется для поля со скоростью $\omega_{\text{ст-рот2}} = -\omega_{\text{рот}}/(pm) + \omega_{\text{вр}}$ (Приложение 3).



Комплексные амплитуды индукции поля обмотки статора. Эквивалентная МДС $F_{\text{ст}}^*$

Расчетные выражения для комплексных амплитуд. Выражение для МДС обмотки статора имеет вид

$$f_{\text{як1}}(x, k) = F_{\text{як пр}}(-k) \exp\left(\frac{-j2\pi kx}{T}\right), \quad (21)$$

где $F_{\text{як пр}} = F_{\text{як}}$ согласно (15'), k — порядок гармоники этой МДС.

Для неявнополюсной машины $\delta_{\text{экр}} = \text{const}$; поэтому при решении системы уравнений (П1)–(П8) в уравнении (П7) можно принять $F_{\text{як}} = F_{\text{ст}}^*$ и из уравнения (15') вычислить ток $I_{\text{ст}}(F_{\text{ст}}^*)$.

Для явнополюсной машины гармоники порядка s поля токов статора вычисляются с учетом зазора $\delta_{\text{экр}}(\varphi)$, изменяющимся по периферии ротора согласно табл. 3; индукция $b_{\text{як}}(x, s)$ поля имеет вид

$$b_{\text{як}}(x, s) = B_{\text{як пр}}(-s) \exp\left(-j\frac{2\pi sx}{T}\right) + B_{\text{як доп}}(s) \exp\left(j\frac{2\pi sx}{T}\right). \quad (22)$$

После преобразований в комплексной плоскости для амплитуд получаем

$$B_{\text{як пр}}(-s) = \frac{F_{\text{як пр}}(-k)G_M 2b_p}{T};$$

$$B_{\text{як доп}}(s) = F_{\text{як пр}}(-k)G_M \frac{-1}{\pi s} \sin\left(\frac{2\pi sb}{T}\right). \quad (23)$$

Отметим, что выражения для этих комплексных амплитуд могут быть получены из (19)–(20') с учетом выражения (21) для $f_{\text{як1}}(x, k)$. Ограничим задачу вычисления этих амплитуд дополнительным условием: $k = s = m = n$. Из соотношений (23) следует, что для явнополюсной машины при решении системы уравнений (П1)–(П8) можно в уравнении (П5) принять:

$$a) \frac{B_{\text{як пр}}(-k)}{G_M} = \frac{F_{\text{як пр}}(-k)2b_p}{T} = F_{\text{ст}}^*, \text{ если рас-}$$

чет ведется для поля с угловой скоростью отно-

сительно статора $\omega_{\text{ст-рот1}} = \frac{\omega_{\text{рот}}}{p} + \omega_{\text{вр}}$;

$$б) \frac{B_{\text{як доп}}(k)}{G_M} = F_{\text{як пр}}(-k) \frac{-1}{\pi s} \sin\left(\frac{2\pi sb}{T}\right) = (F_{\text{ст}}^*)',$$

если расчет ведется для поля со скоростью

$$\omega_{\text{ст-рот2}} = \frac{-\omega_{\text{рот}}}{p} + \omega_{\text{вр}} \text{ (Приложение 3).}$$

Проверка расчетных выражений для эквивалентной индукции в зазоре (частный случай). Найдем из выражений (22) для $b_{\text{як}}(x, k)$ при $k = s = 1$ значения индукции;

при $x = 0$ (ось q) будет $b_{\text{як}}(x = 0, k = 1) = [\alpha - (1/\pi)\sin(\pi\alpha)] F_{\text{як пр}}(k = -1)$;

при $x = T/4$ (ось d) будет $b_{\text{як}}(x = T/4, k = 1) = [\alpha + (1/\pi)\sin(\pi\alpha)](-j) F_{\text{як пр}}(k = -1)$.

В теории двух реакций [7] используются коэффициенты формы поля статора — для поперечной реакции K_q и для продольной реакции K_d . Они соответствуют значениям индукции, полученным в уравнениях (22) и (23).

Приложение 1

Система уравнений для двух магнитосвязанных контуров с учетом насыщения магнитной цепи:

$$\Phi_{\text{вз}}(m) = \frac{2}{\pi m} \tau L B_{\text{вз}}(m); \quad (П1)$$

$$E_{\text{ст}} = -j\omega_{\text{ст}} W_{\text{ст}} K_{\text{ст}} \Phi_{\text{вз}}; \quad (П2)$$

$$F_{\text{мц}} = F_{\text{мц}}(\Phi_{\text{вз}}); \quad (П3)$$

$$F_0 = F_{\text{мц}} + F_{\text{акт}} \exp\left(\frac{j\pi}{2}\right); \quad (П4)$$

$$F_{\text{рот}}^* = F_{\text{рот}}(\Phi_{\text{вз}}); \quad (П5)$$

$$F_0 = F_{\text{ст}}^* + F_{\text{рот}}^*; \quad (П6)$$

$$I_{\text{ст}} = I_{\text{ст}}(F_{\text{ст}}^*); \quad (П7)$$

$$U_{\text{выв}} = I_{\text{ст}} Z_{\text{ст}} - E_{\text{ст}}. \quad (П8)$$

Приложение 2

Выражения для коэффициентов:

$$C_1 = \frac{D_3}{D_0}; \quad C_2 = \frac{D_4}{D_0}.$$

$$D_0 = 2(a_2 - a_1) + a_1^{N_0} (a_2 - 2 - \sigma') - a_2^{N_0} (a_1 - 2 - \sigma') + a_1^{N_0-1} - a_2^{N_0-1};$$

$$D_3 = \left(\frac{-E_F}{Z_B} + C_0 K_{\sigma 0}\right) (a_2^{N_0-1} + a_1) +$$

$$+ C_0 \{ \exp[-j\Delta\varphi(N_0-1)] + \exp(j\Delta\varphi) \} K_{\sigma 2};$$

$$K_{\sigma 0} = 1 + (2 + \sigma') \exp[-j\Delta\varphi(N_0-1)] - \exp[-j\Delta\varphi(N_0-2)];$$

$$\sigma' = \frac{2Z_F}{Z_B}; \quad K_{\sigma 2} = a_2^{N_0-2} - (2 + \sigma') a_2^{N_0-1} - 1;$$

$$K_B = \exp(j\Delta\varphi) - (2 + \sigma) + \exp(-j\Delta\varphi),$$

$$\text{где } \Delta\varphi = \frac{\pi m 2b}{T};$$

$$\sigma = 2 \frac{Z_R}{Z_B}; \quad a_{1,2} = \frac{2 + \sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\sigma}}{2}.$$

Коэффициенты D_4 и C_2 могут быть получены из коэффициентов D_3 и C_1 заменой a_1 на a_2 и соответственно a_2 на a_1 .

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Особенности системы уравнений (П1)–(П8) для полей со скоростью относительно статора $\omega_{\text{ст-рот } 2} = -\omega_{\text{рот}}/(pm) + \omega_{\text{вр } m}$.

Режим при заданных значениях комплексных амплитуд $B_{\text{д доп}}(m)$, $B_{\text{як доп}}(k)$ и скорости $\omega_{\text{ст-рот } 2}$ соответствует режиму синхронного генератора с подключенным возбудителем.

Для расчета такого режима являются заданными: эквивалентный ток ротора, он соответствует

амплитуде $(F_{\text{як}}^*)' = B_{\text{д доп}}(m)$; частота ЭДС статора

$\omega_{\text{ст}}' = |\omega_{\text{ст-рот } 2} pm|$; сопротивление нагрузки при этой частоте $Z_{\text{нагр}}'$; скорость $\omega_{\text{вр}} = \text{const}$.

Для этого режима уравнение (П5) системы преобразуется к виду: $E_{\text{ст}}' = I_{\text{ст}}' (Z_{\text{ст}}' + Z_{\text{нагр}}')$.

Алгоритм решения системы $(F_{\text{рот}}^*)' = f(B_{\text{вз}}')$

при условии $(F_{\text{рот}}^*)'_{\text{интер}} \approx (F_{\text{рот}}^*)'$ аналогичен изложенному в разделе 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Поле токов обмотки возбуждения, пульсирующее с частотой $\omega_{\text{рот}}$, нетрудно разложить [1, 7] на две составляющие; комплексная амплитуда одной из них суммируется с $B_{\text{д пр}}(-m)$, а вторая — с $B_{\text{д доп}}(m)$.

Выводы

Электромагнитные нагрузки определяются из нелинейной системы для магнитосвязанных контуров; уравнения ее используются для обих полей: с амплитудами $B_{\text{д пр}}(-m)$, $B_{\text{як пр}}(-k)$ и $B_{\text{д доп}}(m)$, $B_{\text{як доп}}(k)$.

Комплексные амплитуды $B_{\text{д пр}}(-m)$ и $B_{\text{д доп}}(m)$ получены в результате серии линейных преобразований функции тока демпферной обмотки в комплексной плоскости. Эта функция основана на распределении токов в элементах конструкции демпферной обмотки исходя из ее математической модели [6]. Комплексные амплитуды $B_{\text{як пр}}(-k)$ и $B_{\text{як доп}}(k)$ получены аналогично.

Практические примеры подтверждают справедливость выполненных преобразований и полученных расчетных соотношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред. И.П. Копылова.— М.: Энергия, 1980.— 495 с.
3. Глебов, И.А. Научно-технические проблемы крупного турбогенераторостроения [Текст] / И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич.— М.: Наука, 1990.— 350 с.
4. Лютер, Р.А. Асинхронные моменты вращения машины с массивным ротором и немагнитным бандажом [Текст] / Р.А. Лютер, Н.Я. Самойлович, В.В. Коган // Электросила.— 1965.— № 24.
5. Антонов, В.В. Метод расчета мощных асинхронных двигателей с нелинейными параметрами [Текст] / В.В. Антонов, И.З. Богуславский, М.Г. Савельева // Электросила.— 1983. № 35.
6. Богуславский, И.З. Моделирование токов в демпферной обмотке мощной синхронной машины посредством замкнутой активной цепной схемы [Текст] / И.З. Богуславский // Научно-технические ведомости СПбГТУ.— 2011. № 4.— С. 79–86.
7. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов.— М.— СПб.: Питер, 2006.
8. Богуславский, И.З. Генераторы и двигатели переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами. Т. 1, 2 [Текст] / И.З. Богуславский.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
9. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн / Пер. с англ.— М.: Наука. 1970.— 720 с.



УДК 621.311.22:075.8

В.Г. Киселёв

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Постановка проблемы

При разработке и внедрении в производство изделий, оборудования, конструкций и сооружений различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. Коррозия относится в основном к экономическим проблемам, так как связана с возможными потерями основных и оборотных фондов, а также предпринимательской прибыли. Этот факт, в частности, на законодательном уровне отражает пункт 1.4 ГОСТ 9.602 — 89 [1]: «При разработке проекта строительства подземных металлических сооружений одновременно должен разрабатываться проект их защиты от коррозии». Следует напомнить и пункт 1.11 [1]: «Средства защиты подземных металлических сооружений от коррозии выбирают исходя из вида сооружения, условий прокладки, данных об опасности коррозии и требуемого срока службы сооружения на основании технико-экономического обоснования...». Последний пункт, к сожалению, был отменен законодателем в 1995 году [2]. Таким образом, как ГОСТ 51164 — 98 [3], так и ГОСТ 9.602 — 2005 [4] (эти нормативные документы действуют и в настоящее время) демонстрируют единый подход к вопросу об осуществлении антикоррозионных мероприятий. Они (антикоррозионные мероприятия) необходимы в том или ином виде, определяемом нормативными документами, а выбор наиболее эффективного варианта не требуется. Аналогично построены и ведомственные инструкции, посвященные вопросам защиты от коррозии, например «Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии» [5]. Следовательно, заказчик получает проект соответствующий нормативным документам, но вряд ли оптимальный по затратам. Решению проблемы оптимизации затрат, по крайней мере в отношении катодной защиты наложенным током, для трубопроводов и посвящена данная статья.

Катодная защита от коррозии наложенным током подземных металлических сооружений. Основные понятия и предпосылки

Катодная защита от коррозии наложенным током (в дальнейшем — «катодная защита», или «электрохимическая защита») в случае подземных металлических сооружений (ПМС) используется в основном для защиты от почвенной коррозии, а также и для защиты от коррозии, вызываемой постоянными и переменными блуждающими токами.

Современные устройства катодной защиты представляют собой, как правило, катодные станции, снабженные специальными блоками, которые обеспечивают автоматическое регулирование электрических параметров защиты (рис. 1). В качестве основного параметра, подлежащего регулировке, обычно выбирается электрохимический потенциал защищаемого сооружения по отношению к грунту. При отсутствии особых условий агрессивности его поддерживают в границах от $-0,85$ В до $-1,15$ В. Измерения

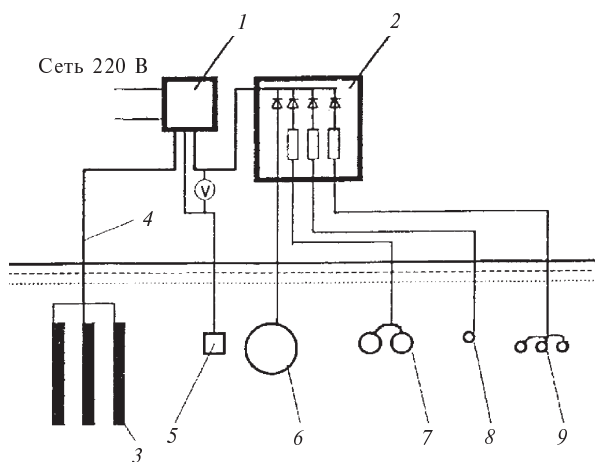


Рис. 1. Схема катодной защиты:

1 — катодная станция (преобразователь); 2 — БДР (блок диодно-резисторный); 3 — аноды (контур анодного заземления); 4 — контурный кабель; 5 — электрод сравнения; 6 — водовод; 7 — теплотрасса; 8 — телефонные кабели; 9 — силовые кабели высокого напряжения

в этом случае проводят с использованием медно-сульфатного электрода сравнения.

В соответствии с DIN 30676 необходимыми предпосылками для осуществления качественной электрохимической защиты от коррозии являются:

обеспечение высокой продольной проводимости трубопроводов (отсутствие изолирующих фланцев, устранение соединений в трубопроводе с высоким электрическим сопротивлением и т. д.);

отсутствие контактов с заземленными сооружениями (заземляющие устройства, арматура железобетонных фундаментов, другие подземные металлические сооружения, не подлежащие катодной защите, и т. д.);

наличие качественной диэлектрической изоляции.

Будем считать, что в нашем случае первые два требования безусловно выполнены, и приступим к собственно расчету катодной защиты и оценке ее технико-экономической эффективности как функции качества изоляции ПМС. В качестве объекта защиты выберем отдельно расположенный трубопровод, находящийся в грунте.

Расчет катодной защиты подземного трубопровода: основные этапы

При проектировании электрохимической защиты технические и экономические характеристики проекта тесно взаимосвязаны и практически неотделимы друг от друга. Основные исходные данные для расчета катодной защиты: диаметр трубопровода (газопровода), толщина стенки трубопровода, удельная проводимость материала трубопровода, удельная плотность защитного тока, удельное сопротивление грунта, а также стоимость материалов, оборудования, строительства и эксплуатации систем катодной защиты.

Расчет стоимости электрохимической защиты будем проводить по методу годовых приведенных затрат в пересчете на один километр трубопровода при периоде эксплуатации $T = 10$ лет. Однако предварительно определим необходимые для экономического расчета технические параметры катодной защиты.

Определение необходимой плотности защитного тока. Первым этапом проектирования любой электрохимической защиты является определение необходимой плотности защитного тока J_z . Оценить значение этой величины можно либо

экспериментально (при наличии уже построенного ПМС), либо теоретически (при проектировании нового подземного металлического сооружения) с использованием соответствующих нормативных документов [6]. При этом очевидно, что затраты на электрохимическую защиту будут снижаться с уменьшением величины защитного тока. Снижения этой величины добиваются, прежде всего, качественной изоляцией ПМС и устранением контактов ПМС с другими металлическими сооружениями, соприкасающимися с грунтом. Для трубопроводов снижению затрат на электрохимическую защиту способствует и увеличение их продольной проводимости.

Для оценки возможных изменений плотности защитного тока в грунте мы воспользуемся данными из справочника [7], предварительно усреднив их и представив в табличной форме (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость средней плотности защитного тока от вида изоляции в грунте

Тип покрытия	Плотность защитного тока А/м ²
Полиэтиленовое	$5 \cdot 10^{-6}$
Битумное с армированием из стекловолокна	$6 \cdot 10^{-5}$
Битумное с армированием из войлока	10^{-3}
Джутовое с пропиткой	10^{-2}
Без покрытия	$5 \cdot 10^{-2}$

С целью большей наглядности конечного результата выберем для дальнейших вычислений некоторые конкретные значения плотности защитного тока. Пусть она равняется соответственно $1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ и 10^{-6} А/м². Кроме того, в процессе расчета нам потребуются и некоторые другие данные. Выберем их и зададимся конкретными значениями этих величин, которые и будем использовать при вычислениях, а именно: ρ_s — удельное сопротивление стали ($\rho_s = 0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м); d — наружный диаметр трубопровода ($d = 321$ мм); s — толщина стенки трубопровода ($s = 6$ мм); ρ — удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления; оно может колебаться в очень широких пределах, мы будем считать $\rho = 10$ Ом·м.

Определение величины защитной зоны трубопровода. Определение величины защитной зоны трубопровода будем проводить при омическом падении потенциала в его зоне защиты, равном 0,3 В согласно формуле [7]

$$2L = \sqrt{\frac{2,4s}{\rho_s J_s}}. \tag{1}$$

Расчет будем вести при выбранных выше значениях плотности защитного тока и других параметров.

Представим зависимость величины защитной зоны трубопровода, вычисленную по формуле (1), от плотности защитного тока и численных характеристик защищаемого объекта в табличной форме (табл. 2).

Определение величины защитного тока. Для определения величины защитного тока можно воспользоваться следующей формулой [7]:

$$I_o = 2\pi dJ_sL. \tag{2}$$

Внесем полученные данные в табл. 2.

Определение оптимального количества электродов в анодном заземлении. Оптимальное количество электродов в анодном заземлении может быть определено по формуле [8]

$$n_w = I_o \sqrt{\frac{FR_o\rho ktT}{K_o\rho_o w}}, \tag{3}$$

где F — фактор взаимовлияния анодов, определяющий увеличение сопротивления анодного устройства в результате взаимного экранирования отдельных анодов. Его величина обычно ко-

леблется в пределах от 1 до 2,5. В наших расчетах для большей наглядности мы примем $F = 1$; t — количество часов в году, $t = 8760$ часов; T — расчетный срок эксплуатации анодного заземления (годы). Мы принимаем $T = 10$ лет; ρ — удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления. Оно может колебаться в очень широких пределах. Мы будем считать $\rho = 10$ Ом·м; k — стоимость электроэнергии. Примем ее условно равной 1 рубль за 1 кВт·час; K_o — стоимость отдельного анода, включая его установку; примем ее равной 10 000 руб.; w — коэффициент полезного действия преобразователя; примем его равным 0,5; R_o — сопротивление растекания отдельного анода при удельном сопротивлении грунта ρ_o , равном 10 Ом·м. Для случая вертикальных анодов длиной l , диаметром d и с глубиной заложения $t = 0$ оно может быть вычислено по следующей формуле [7]:

$$R_o = \frac{\rho_o}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \tag{4}$$

Пусть $l = 2$ м, а $d = 0,05$ м, тогда $R_o = 5,07$ Ом, или $R_o \approx 5$ Ом.

Представим результаты расчета оптимального количества анодов в анодном заземлении в табл. 2. Дополнительные численные параметры, необходимые для вычислений, приведены выше.

Определение величины сопротивления растекания анодного заземления. При осуществлении дальнейших вычислений нам потребуется знание величины сопротивления растекания анодного заземления, которое определяется формулой [8]

Таблица 2

Технические параметры катодной защиты трубопровода наложенным током, определяемые при различных плотностях защитного тока

J_s , А/м ²	$2L$, м	I_o , А	n_w , шт.	K_A , тыс. р	n_o , ₂ мм	R_r , Ом	R_G , Ом	R_{K_0} , Ом	R , Ом	W , Вт	W_o , Вт
1	283	283	2648,9	26489	1567	0,00318	0,00191	0,00112	0,00621	1492	994,7
10 ⁻¹	894	89,4	836,8	8368	495,3	0,0101	0,00606	0,00353	0,01969	472	314,7
10 ⁻²	2828	28,3	264,9	2649	156,7	0,0318	0,0191	0,0112	0,0621	149	99,5
10 ⁻³	8944	8,9	83,7	837	49,5	0,101	0,0605	0,0353	0,1966	47	31,1
10 ⁻⁴	28280	2,8	26,5	265	15,6	0,321	0,191	0,112	0,624	15	9,8
10 ⁻⁵	89440	0,9	8,4	84	5,0	1,00	0,604	0,353	1,957	5	3,0
10 ⁻⁶	282800	0,3	2,6	26	1,56	3,00	1,95	1,12	6,07	2	1,1

$$R_G = F \frac{R_0 \rho}{n \rho_0} \quad (5)$$

В нашем случае сопротивление грунта $\rho = \rho_0 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, следовательно, сопротивление отдельного анода в грунте $R = R_0$. Производя вычисления с помощью формулы (5), поместим полученные данные в табл. 2.

Выбор оптимального сечения дренажного кабеля. Выбор оптимального сечения кабеля постоянного тока, обычно производят при помощи специального графика (см., например, справочник [7]) исходя из величины защитного тока и срока службы установки электрохимической защиты или по величине максимально допустимого падения напряжения на нем. Кроме того, оптимальное сечение кабеля, мм^2 , может быть определено и по следующей разработанной нами формуле:

$$n_0 = I_0 \sqrt{\frac{R_1 C t T}{w K_1}}, \quad (6)$$

где K_1 — стоимость одного погонного метра кабеля сечением 1 мм^2 . Пусть она составляет 100 рублей за погонный метр кабеля сечением 1 мм^2 . В дальнейшем мы будем приближенно считать, что стоимость пропорционально возрастает с ростом сечения кабеля и его длины. R_1 — сопротивление одного погонного метра кабеля сечением 1 мм^2 , которое в свою очередь определяется формулой

$$R_1 = \rho_k \frac{l_k}{S_k}, \quad (7)$$

где ρ_k — удельное сопротивление меди ($\rho_k = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$); l_k — длина кабеля (в нашем случае $l_k = 1 \text{ м}$); S_k — сечение кабеля (в нашем случае равное 1 мм^2); C — стоимость 1 кВт·час электроэнергии; примем ее условно равной 1 рубль за 1 кВт·час; w — коэффициент полезного действия преобразователя. Мы принимаем $w = 0,5$; T — срок службы установки электрохимической защиты (принимаем $T = 10$ лет).

Результаты расчета оптимального сечения кабеля для различных защитных токов, произведенные по формуле (6), представлены в табл. 2.

Определение общего сопротивления дренажного кабеля. Общее сопротивление дренажного кабеля может быть рассчитано с использованием известной из курса физики формулы

$$R_k = \rho_k \frac{l_k}{n_0}, \quad (7)$$

где $\rho_k = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; длину кабеля принимаем с целью большей наглядности вычислений для всех рассматриваемых вариантов электрохимической защиты, $l_k = 100 \text{ м}$; n_0 — оптимальное сечение кабеля в мм^2 .

Определим общее сопротивление кабеля протяженностью 100 метров для различных плотностей тока по формуле (7) и поместим полученные результаты вычислений в табл. 2.

Определение входного сопротивления трубопровода. В соответствии со справочником [7] расчет входного сопротивления трубопровода будем производить по формуле

$$R_T = \frac{0,9}{I_0}. \quad (8)$$

Данные расчета представим в табл. 2.

Определение необходимой мощности преобразователя. Рассчитаем необходимую мощность преобразователя. Как известно, мощность источника тока для катодной защиты может быть вычислена по следующей формуле

$$W = k_1 k_2 I_0^2 R, \quad (9)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий потери мощности при преобразовании электрического тока из переменного в постоянный (примем его равным 2, т. е. коэффициент полезного действия — 0,5); k_2 — коэффициент, учитывающий запас мощности преобразователя, принятый при проектировании катодной защиты, и возможное снижение сопротивления изоляции трубопровода со временем; мы принимаем его равным 1,5; R — общее сопротивление в цепи постоянного тока, которое вычисляется по формуле

$$R = R_a + R_k + R_T, \quad (10)$$

где R_a — сопротивление растекания (включая омическое и поляризационное) анодного заземления; R_k — омическое сопротивление кабеля постоянного тока; R_T — входное сопротивление (включая омическое и поляризационное) трубопровода.

Вычислим необходимую мощность W преобразователя в соответствии с формулой (9) и внесем данные в табл. 2.

Определение расхода электроэнергии при защите трубопровода. При расчете расхода электроэнергии нам потребуется упрощенная форму-



ла для определения мощности преобразователя и соответственно расхода электроэнергии при защите трубопровода в течение часа работы установки катодной защиты:

$$W_3 = k_1 I_0^2 R. \quad (11)$$

Вычислим необходимую мощность преобразователя W_3 в соответствии с формулой (11) и внесем полученные данные в табл. 2.

Расчет годовых приведенных затрат катодной защиты наложенным током. Примем, как и ранее, срок эксплуатации катодной защиты равным десяти годам. Расчет экономической эффективности катодной защиты будем производить с использованием данных из табл. 2 и формулы для приведенных коррозионных затрат, рассчитанных на весь срок службы установки катодной защиты [9]

$$\Pi = K + CT, \quad (12)$$

где K — капитальные затраты на сооружение установки катодной защиты. Этот вид затрат зависит в первую очередь от мощности установки катодной защиты, и его удобно разбить на три составные части:

$$K = K_a + K_k + K_{\Pi}, \quad (13)$$

где K_a — капитальные затраты, необходимые для сооружения анодного заземления; K_k — капитальные затраты, израсходованные на покупку и монтаж дренажного кабеля; K_{Π} — капитальные затраты на покупку и установку преобразователя. В силу относительно небольшого вклада этой величины в общие капитальные затраты

примем K_{Π} равным 200 000 рублей для плотностей тока от 1 до 10^{-2} А/м² и соответственно 100 000 рублей для плотностей тока от 10^{-3} до 10^{-6} А/м²; C — годовые эксплуатационные затраты, рассчитанные на одну установку катодной защиты, которые, в свою очередь, удобно разбить на следующие составные части:

$$C = C_p + C_3. \quad (14)$$

Здесь C_p — затраты на профилактику установки катодной защиты, проведение различных измерений, капитального и текущего ремонтов и так далее. Для конкретной установки их можно принять постоянными в течение всего периода эксплуатации катодной защиты. Они мало изменяются при изменении мощности установки электрохимической защиты. Мы примем их равными 100 000 р/год; C_3 — годовые затраты на электроэнергию. Для конкретной установки их можно считать постоянными в течение всего периода эксплуатации катодной защиты, но они очень сильно зависят от величины защитного тока и определяются формулой

$$C_3 = ktW_3, \quad (15)$$

где k — стоимость электроэнергии (принимая ее равной 1 р/кВт·ч); t — количество часов в году (8760 ч); W_3 — мощность, потребляемая на входе преобразователя электрохимической защиты.

Рассчитаем приведенные коррозионные затраты, отнесенные ко всему сроку службы установки катодной защиты, в соответствии с формулой (12). Полученные результаты, а также промежуточные результаты расчета поместим в табл. 3.

Таблица 3

Экономические параметры катодной защиты трубопровода наложенным током, определяемые при различных плотностях защитного тока.

K_a , тыс. р	K_k , тыс. р	K_{Π} , тыс. р	K , тыс. р	C_p , тыс. р	C_3 , тыс. р	C , тыс. р	Π , тыс. р	Π_1 , тыс. р	Π_L , тыс. р
26 489	15 670	200	42 359	100	8, 714	108,7	43 446	4 345	15 353
8 368	4 953	200	13 503	100	2, 757	102,8	14 531	1 453	1 625
2 649	1 567	200	4 416	100	0, 872	100,9	5 425	543	192
837	495	100	1 432	100	0, 272	100,3	2 435	244	27,3
265	156	100	521	100	0, 086	100,1	1 522	152	5,4
84	50	100	234	100	0, 026	100,0	1234	123	1;4
26	15,6	100	141,6	100	0, 010	100,0	1142	114	0,4

Определение годовых приведенных затрат катодной защиты будем проводить по следующей формуле:

$$Ц_1 = K / T + C, \quad (16)$$

Рассчитаем годовые приведенные коррозионные затраты по формуле (16); результаты поместим в табл. 3.

Определение годовых приведенных затрат на катодную защиту в пересчете на один километр трубопровода. Определение годовых приведенных затрат на катодную защиту в пересчете на один километр трубопровода можно произвести по следующей формуле

$$Ц_L = Ц_1 / (2L). \quad (17)$$

Рассчитаем годовые приведенные коррозионные затраты по формуле (17), а полученные результаты поместим в табл. 3.

Основные результаты работы:

Предложен модернизированный метод проектирования катодной защиты подземных металлических трубопроводов наложенным током, в котором используются процедуры, оптимизирующие стоимость катодной защиты, рассчитанную на один километр протяженности подземного металлического сооружения.

Показано, что с увеличением плотности защитного тока происходит непропорционально резкий рост стоимости годовых приведенных затрат на катодную защиту в расчете на один километр подземного металлического трубопровода.

Приведены примеры конкретного расчета катодной защиты с использованием предложенного метода для различных значений плотности защитного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.602–89. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Текст] / ГК СССР по стандартам.— М., 1989.
2. Сборник нормативных документов и рекомендаций по защите газовых сетей от коррозии [Текст] / АО «Росгазификация».— М., 1996.— С. 2.
3. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Текст] / Госстандарт России.— М., 1998.
4. ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии [Текст] / М.: Стандартинформ, 2006.
5. РД 154-34.0-20.518–2003. Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии [Текст].— М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2003.
6. РД 153-39.4-091–01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии [Текст].— СПб.: Изд-во ДЕАН, 2002.— С. 175.
7. Baeckmann, W. Taschenbuch für den katodischen Korrosionsschutz [Текст] / W. von Baeckmann.— Vulkan-Verlag Essen.— 1996.— S. 63, 75, 77, 147, 120, 73.
8. Baeckmann, W. Handbuch des katodischen [Текст] / W. von Baeckmann, W. Schwenk.— Korrosionsschutzes. Verlag Chemie.— 1980.— S. 224, 219.
9. Киселёв, В.Г. Совершенствование методики оценки экономической эффективности антикоррозионных мероприятий [Текст] / В.Г. Киселёв // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009.— № 4 (89). Т. 2.— С. 109.

УДК 539.261:539.273

Н.А. Яблокова, В.В. Трофимов

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС РЕМОНТНЫХ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В ремонтных дисках компрессоров низкого давления (КНД) опасно «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения и повреждение из-за усталости может возникнуть внезапно. Существующие традиционные методы и средства неразрушающего контроля направлены, как известно, на поиск и нахождение конкретного дефекта, но уровень чувствительности этих методов не достаточен для выявления «преддефектного» состояния металла, что не позволяет проводить оценку (прогнозирование) остаточного ресурса.

Стадию «преддефектного» состояния материала дисков под действием циклических нагрузок характеризуют значительные пластические деформации, которые отображаются на поверхности в виде повреждений. Процессы упрочнения-разупрочнения материала поверхностного слоя приводят к размножению дефектов кристаллической структуры материала, дефекты смещаются к поверхности материала. Повреждения приповерхностного слоя двигаются на поверхность. Значительные повреждения материала сосредоточены в поверхностном слое глубиной 10–15 мкм. Поэтому наиболее оптимальными методами для неразрушающего анализа структурных параметров на поверхности считаются методы рентгеноструктурного анализа (РСА).

На основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса ремонтных дисков сделан вывод [1], что ресурс дисков КНД определяют зоны концентрации напряжений (ЗКН) — основные источники развития повреждений. На дисках КНД зонами концентрации напряжений в пазах типа «ласточкин хвост» являются расположенные на поверхности и под

поверхностью сопряжения основания и боковой грани паза (галтели) со стороны выхода потока воздуха [2].

В нашей работе для определения фактического состояния и оценки ресурса ремонтного диска КНД из сплава ВТ3-1 проводилась методами РСА одновременная оценка нескольких параметров материала диска, характеризующих: структуру металла (максимальная и интегральная интенсивность интерференционных линий; интегральная интенсивность фона; положение и профиль интерференционной линии), прочность материала (ширина интерференционной линии и интегральные параметры), экспресс-оценку количественного фазового состава сплава и напряженно-деформированного состояния (НДС).

Анализ данных, полученных нами экспериментально и известных по научно-технической литературе, показывает, что есть взаимосвязь между шириной интерференционных линий и микротвердостью, между шириной интерференционных линий и остаточной деформацией [3]. Анализ структурных изменений по полуширинам интегральной интенсивности, смещению и интенсивности интерференционных линий в титановых сплавах посвящен ряд работ [4–7]. В этих работах показано влияние параметров различных видов поверхностной обработки на микроискажения, плотность дислокаций и структурные превращения в титановых сплавах. Установлены связи между структурными, технологическими и ресурсными параметрами для сплава ВТ3-1 после обработки поверхности — упрочнением, электроимпульсной или термической.

Смещение линий на рентгенограмме свидетельствует об изменении периода кристаллической решетки исследуемого материала и связано с рядом особенностей структурного состояния материала. В первую очередь оно обусловлено закономерностями отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей в линейно-напряженном поликристаллическом материале. По смещению линий проводится анализ макронапряжений в металле [8]. Точность метода определения макронапряжений зависит от величины ориентированных микронапряжений и касательных напряжений, возникающих в металле при деформации. При наличии микронапряжений происходит уширение интерференционных линий и нарушается линейная зависимость межплоскостного расстояния d от $\sin^2 \psi$ (ψ — это угол между нормалью к поверхности образца и нормалью к отражающей плоскости). Расхождение зависимости $d(\sin^2 \psi)$ при углах наклона $\pm \psi$ показывает наличие касательных напряжений в поверхностном слое.

Интенсивность интерференционных линий зависит от ряда факторов и характеризует степень искажения кристаллической решетки. Ослабление интерференционных линий может происходить из-за динамических и статических искажений структуры [3]. Статические и связанные с ними напряжения возникают при наличии в кристаллах различного рода дефектов (дислокации, вакансии, дефекты упаковки и др.).

Целями нашей работы были разработка метода определения неразрушающими методами РСА структурных параметров на ремонтных

дисках КНД из сплава ВТЗ-1 и определение остаточного ресурса ремонтных дисков по данным периодических исследований структурных параметров этих дисков и в соответствии с критериями предельного состояния в зонах концентраторов напряжений.

Определение структурных параметров

Методика разработана для проведения измерений и расчета структурных параметров в поликристаллических двухфазных авиационных титановых сплавах на дифрактометре XSTRESS 3000 G3 с использованием рентгеновской трубки с титановым анодом. Структурные параметры определяются методами РСА для схемы симметричной и несимметричной рентгеносъемки, что позволяет проводить на деталях оценку интегрированных параметров структурного состояния по изменению напряженно-деформированного состояния, фазового состава, параметров тонкой кристаллической структуры и т. д.

Оборудование и принцип измерения. Для проведения анализа структурных параметров в титановых сплавах методом двух пиков (диапазон регистрации углов 2θ равен $106-160^\circ$) измерения на дифрактометре XSTRESS 3000 G3 выполняются для интерференционных линий (пики) фаз при поддержании дуги детектора в положении для нормального измерения напряжений, как показано на рис. 1, а (конфигурация УУ модифицированного дифрактометра). При использовании метода четырех и более пиков необходимо использовать специальную дугу с диапазоном регистрации углов 2θ равен $65-160^\circ$; в этом слу-

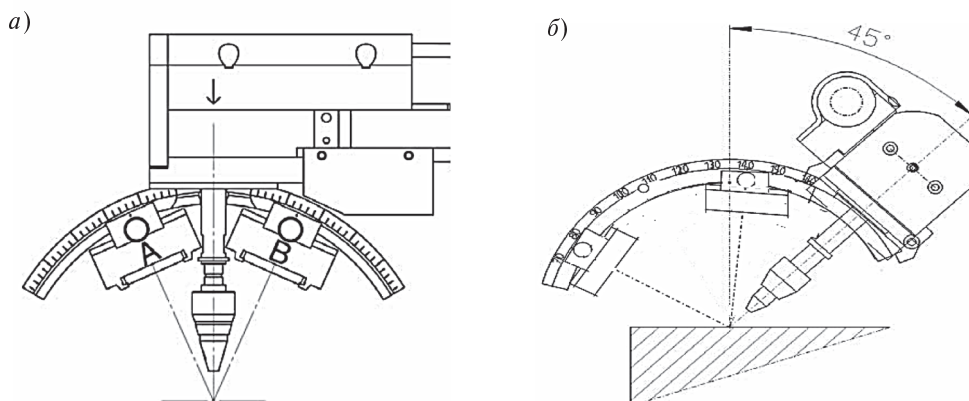


Рис. 1. Схемы проведения рентгеносъемки для анализа структурных параметров в титановых сплавах с помощью дифрактометра XSRESS 3000 G3:
а — дуга детектора в стандартном режиме Ψ ; б — специальная дуга в режиме Ω

чае измерения проводятся для конфигурации дифрактометра Ω . В режиме Ω , когда начинается измерение, коллиматор касается точки измерения в перпендикулярном направлении, а затем осуществляется угловое смещение для измерения положения — в соответствии с показанным на рис. 1, б. Режим Ω позволяет проводить количественный фазовый анализ содержания фазы в двухфазных титановых сплавах. Оба режима рентгено съемки позволяют определять структурные параметры методами РСА неразрушающим способом.

Калибровка дифрактометра проводилась при использовании порошка из титанового сплава с фазой кубической модификации α – Ti. Проверка объективности метода осуществляется при помощи эталонного образца с известным фазовым составом (3–6 % β – Ti, остальное α – Ti). Рентгенограммы от эталонных образцов и типичного образца из ремонтного диска КНД, полученные на дифрактометре XSTRESS 3000 G3R, приведены на рис. 2.

Расчет структурных параметров. Анализ структурных параметров методами РСА проводят для изучения влияния кристаллических дефектов по эффектам, которые они вызывают на рентгенограммах.

Методика предназначена для определения структурных параметров в титановых сплавах с фазовыми модификациями α – Ti и β – Ti. Вначале регистрируют рентгеновский спектр в заданном диапазоне углов, затем проводят подгонку нелинейной экспериментальной кривой (рентгеновский спектр) с применением алгоритма Левенберга—Марквардта (Levenberg—Marquardt) для

функции Пирсона VII и параболической функции вычитания фона.

Применение процедуры расчетного моделирования рентгенограмм с помощью метода подгонки пиков позволяет создать собственную структуру обработки экспериментальных данных по разным методикам независимо от используемого оборудования, автоматизировать расчет всех параметров и сохранить результаты в базе данных, провести автоматизированный выбор случайных выпадов измерения или провести оценку по установленным критериальным параметрам.

Пробоподготовка и эксперимент

Диски (образцы из диска) для исследования на дифрактометре XSTRESS 3000 G3R устанавливались на держателях образцов и крупногабаритных деталей. Подготовка образцов для проведения измерений на дифрактометре XSTRESS 3000 не требуется. Для проведения качественного фазового анализа, определения текстуры и микронапряжений на других современных дифрактометрах были изготовлены образцы из контрольных и дефектных ремонтных дисков КНД.

Измерения структурных параметров методами РСА на дисках проводилось на переднем и заднем торцах обода диска со стороны левого и правого радиуса паза. На каждом диске проведено 124 измерения. Операционное время измерения на каждом диске составляет 20 ч.

Анализ полученных результатов

Экспериментальные исследования изменения остаточных напряжений на торцах обода

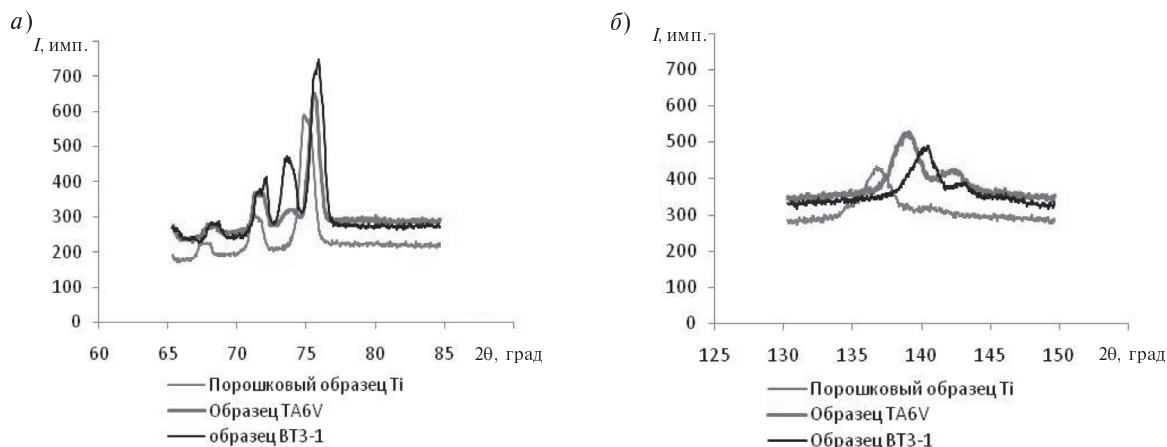


Рис. 2. Рентгенограммы эталонных образцов, полученные в режиме Ω :
 а — на детекторе А; б — на детекторе В

ремонтных дисков КНД со стороны правого радиуса паза показали, что на переднем торце обода диска происходит значительное изменение остаточных напряжений на всех исследуемых точках, а величина средней полуширины интерференционных линий (11.0) практически, не изменяется. Поэтому можно считать, что в пределах эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей исследуемая зона диска испытывает упругие деформации. А на заднем торце обода ремонтных дисков с наработкой в эксплуатации 5300–5500 циклов (12000–15000 ч) при увеличении полуширины линии (11.0) происходит уменьшение величины макронапряжений сжатия по сравнению с диском, имеющим наработку в эксплуатации 500 ч. Также получено, что на переднем и заднем торцах диска максимальное перераспределение макронапряжений и изменение величины полуширины линии (11.0) фазы α – Ti происходит для дисков с наработкой в эксплуатации 12000–15000 ч (рис. 3, а). Есть четкая тенденция уменьшения полуширины линии (11.0) фазы α – Ti на передних торцах обода диска с увеличением наработки дисков в эксплуатации (рис. 3, б). На заднем торце обода (на выходе) диска, с правой стороны паза, характер изменения полуширины линии (11.0) в зависимости от наработки диска отличается от других исследуемых точек на торце обода. На дисках с наработкой 15000–20000 ч полуширина линий (11.0) на заднем торце обода практически не изменяется.

Рентгенографические данные показывают, что пластическая деформация металла, зависящая от плотности дислокаций и определяемая по ширине интерференционной линии, характерна

для первой стадии циклического деформирования. Вторая стадия обуславливается развитием нарушений сплошности (деструкция материала) и мало влияет на ширину интерференционной линии. Следовательно, исследуемые диски с наработкой в эксплуатации более 15000 часов можно отнести к зоне риска по причине деструкции материала в зонах концентрации опасных напряжений.

Анализ зависимости $d(\sin^2\varphi)$ показал, что на исследуемых образцах дисков с наработкой 12000–15000 ч в зонах риска образования дефекта нарушается линейность функции $d(\sin^2\varphi)$ и появляется значительное расхождение линий $d(\sin^2\varphi)$ для наклонов $\pm\psi$, что связано с действием микронапряжений и больших по величине касательных напряжений.

Величина касательных напряжений на диске с наработкой в эксплуатации 440 ч, определенная на заднем торце обода (на выходе диска), составила 5 % от величины нормальных напряжений; на дисках с наработкой 12000–20000 ч — 30 % от величины нормальных напряжений. В радиусе паза этого диска (в зоне начала образования дефекта) величина касательных напряжений составила 80 % от величины нормальных напряжений. Следовательно, образование микротрещины начинается в радиусе паза диска с дальнейшим распространением на задний торец диска.

Проведено исследование количественного фазового состава материала ремонтных дисков. Определение количественного фазового состава сплава выполнено для интерференционных линий фазы α – Ti (00.2, 1.01 и 11.0) и линий фазы

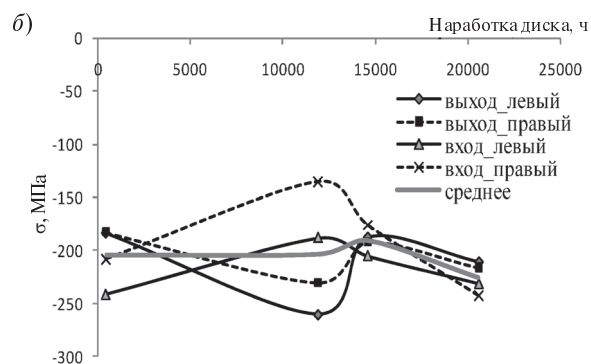
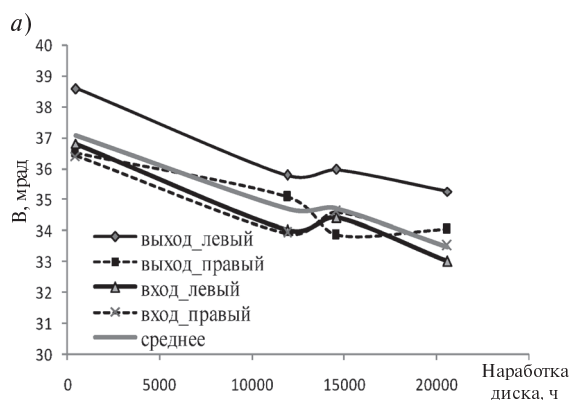


Рис. 3 Изменение остаточных напряжений σ (а) и полуширины интерференционной линии (11.0) B (б) в зависимости от наработки t



β -Ti (11.0) с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 G3 на излучении Ti-K $_{\alpha}$. Содержание фазы β -Ti, определенное «по базису», составляет $(22 \pm 3) \%$, а «по призме» — $(15 \pm 3) \%$. Разница в количестве фазы β -Ti, определенной «по базису» и «по призме», вызвана исходной текстурованностью материала дисков.

При анализе изменения максимальной и интегральной интенсивности интерференционной линии (11.0) фазы α -Ti от наработки дисков обнаружено резкое изменение параметров для дисков с наработкой 15000–20000 ч. Анализ экспериментальных данных показал, что на исследованных дисках с наработкой менее 12000 ч значительные изменения структурных параметров происходят только в малых объемах, поэтому перераспределение этих параметров по всему ободу диска во время эксплуатации диска происходит без потери свойств материала. На дисках с наработкой более 12000 ч изменение структурных параметров охватывает большую часть обода диска. До точки перелома (см. рис. 3) судя по характеру изменения интенсивности и ширины интерференционных линий возможен дислокационный механизм развития пластической деформации. После точки перелома процесс деформации определяется развитием микроразрушений — деструкцией материала в тонком поверхностном слое, работает

дислокационный и вакансионный механизмы, что в дальнейшем может привести к образованию микротрещин на поверхности и их распространению в глубинные слои диска в процессе эксплуатации.

В настоящий момент на ОАО «НПО» Сатурн» продолжают работы по набору статистики рентгеноструктурных параметров на ремонтных дисках КНД, что позволит расширить базу экспериментальных данных, провести уточнение ресурса дисков и получить экспериментальные закономерности для оценки остаточного ресурса ремонтных дисков новых и серийных газотурбинных двигателей.

Разработана новая методика определения структурных параметров на крупногабаритных дисках КНД из сплава ВТ3-1 неразрушающими методами PCA с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 G3.

Результаты анализа изменения рентгеноструктурных параметров на ремонтных дисках позволили определить закономерности изменения структурного состояния дисков в процессе эксплуатации и ресурсных испытаний.

Предложена возможная интерпретация механизма накопления повреждений в приповерхностных слоях дисков КНД в зависимости от наработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев, В.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов [Текст] / В.В. Клюев // Диагностика и контроль.— 2007. № 3.— С. 18–23.
2. Кутырёв, В.В. Закономерности рассеяния и статистическая оценка границ распределения долговечности дисков КНД авиационных двигателей [Текст] / В.В. Кутырёв, С.В. Теплова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.— 2009. № 3(19).— С. 376–380.
3. Рыбакова, Л.М. Структура и износостойкость металла [Текст] / Л.М. Рыбакова, Л.И. Кукуленова.— М.: Машиностроение, 1982.— 209 с.
4. Лоскутов, С.В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов [Текст] / С.В. Лоскутов, В.В. Левитин // Журнал технической физики.— 2002. Т. 72. Вып. 4.— С. 133–135.
5. Папшева, Н.Д. Влияние ультразвуковых колебаний на тонкую кристаллическую структуру поверхностного слоя [Текст] / Н.Д. Папшева, М.К. Александров, О.М. Акушская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.— 2009. Т. 11. № 5(2).— С. 412–415.
6. Диваков, А.К. Откольная прочность титановых сплавов [Текст] / А.К. Диваков, Ю.И. Мешеряков, Н.И. Жигачева, Б.К. Барахтин, W.A. Cooch // Физическая мезомеханика.— 2009. № 12(6).— С. 42–52.
7. Skotnikova, M.A. Structural-Phase Transformation In Metal of Blades of Steam Turbines From Alloy VT6 After Technological Treatment [Текст] / M.A. Skotnikova, Y.M. Zubarev, T.A. Chizhik, I.N. Tsybulina // Proceeding of the «10th World Conference on Titanium». 2003. Hamburg, Germany.— 2004. Vol. 5.— P. 2991–2999.
8. Васильев, Д.М. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений [Текст]: обзор / Д.М. Васильев, В.В. Трофимов // Заводская лаборатория.— 1984. Т. 50. № 7.— С. 20–29.

УДК 531.8:621.01

А.А. Хростицкий, А.Н. Евграфов, В.А. Терешин

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ МЕХАНИЗМА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

Целью геометрического исследования механизмов с избыточными связями является выявление особенностей кинематических цепей, связанных с геометрическими характеристиками. Основная геометрическая характеристика — это функция положения механизма Π_s . Отыскание Π_s составляет прямую задачу геометрического анализа. Для механизмов с n степенями подвижности функции положения записываются в виде групповых уравнений [3, с. 42]

$$x_s = \Pi_s(q_1, \dots, q_n), \quad s = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где x_s — выходные координаты механизма.

Как было отмечено в работах [5, с. 171; 6, с. 404], существуют *парадоксальные механизмы*, у которых за счет особой структуры присутствует способность двигаться при избыточных закреплениях. В этом случае избыточные (зависимые) связи как физические ограничители не проявляют себя.

В статье рассматриваются парадоксальные механизмы на примере пространственного шестизвенного механизма, содержащего одну избыточную связь. Для парадоксальных механизмов использовать классический алгоритм геометрического исследования [2, с. 16–17] можно лишь со значительными оговорками. В рассматриваемом механизме даже без указания входа кинематическая цепь сразу распознается как пространственная *структурная группа* в особом положении, при этом, не имея возможности разложить ее на независимые подсистемы, все необходимые уравнения можно получить из замкнутого контура.

Один из методов решения задачи геометрического исследования рассматриваемого в статье шестизвенника описан в работе [5]. Изложенный в [5] метод решения имеет недостаток: не учитывается якобиан (4) системы групповых уравнений. Необходимость определения якобиана связана с последующим силовым расчетом механизма методом последовательных приближений, основанным на анализе последователь-

ности неособых положений механизма, которая стремится к особому положению.

В статье [4] предложено для выявления особых положений использовать условия равновесия звеньев. В [3, с. 61, 65] состояние механизма в особом положении предлагается характеризовать наличием кратных корней системы групповых уравнений

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

и определителем матрицы Якоби (якобианом J). Матрица Якоби, составленная из частных производных функций системы (2), записывается в форме

$$\Xi = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

тогда якобиан

$$J = \det \Xi. \quad (4)$$

В случае, если механизм находится в особом положении, якобиан обращается в нуль. Если механизм находится вне особого положения, то якобиан отличен от нуля. Таким образом, аналитическим путем выявляются сингулярные положения механизма.

Наша статья посвящена исследованию особенностей решения задачи геометрии механизмов с избыточными связями методом анализа функции якобиана.

Геометрическое исследование механизма, находящегося в особом положении

Рассмотрим схему пространственного шестизвенника (рис. 1), в соответствии с которой разработана установка турбулентного смесителя [5, с. 171].

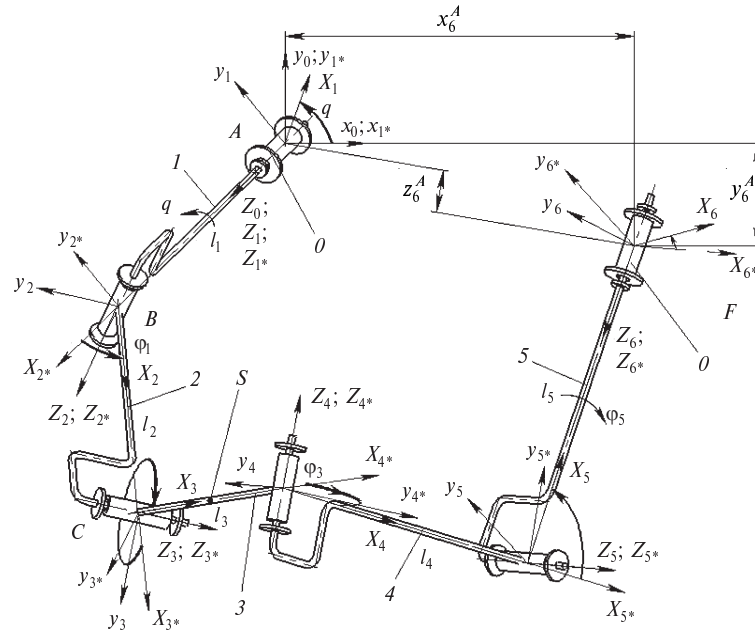


Рис. 1. Схема кинематической цепи механизма в неособом положении

На указанном рисунке q — угол поворота входного звена I (обобщенная координата); $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ — углы относительного поворота звеньев. Для определения функций положений Π_k выходных координат

$$\begin{aligned} x_k &= \Pi_k(\varphi_i(q)), \quad y_k = \Pi_k(\varphi_i(q)), \\ z_k &= \Pi_k(\varphi_i(q)) \end{aligned} \quad (5)$$

механизма, находящегося в особом положении, составим и решим матричные уравнения для замкнутого контура $ABCDEF A$. Условие замкнутости контура является равенство единичной матрицы E последовательного произведения матриц $H_{i-1,i}$ перехода в $(i-1)$ -ю систему координат из i -й системы. Запишем это условие в виде матричного уравнения [1, с. 90]

$$H_{00}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = E, \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} &H_{01}(q)H_{12}(\varphi_1)H_{23}(\varphi_2) \times \\ &\times H_{34}(\varphi_3)H_{45}(\varphi_4)H_{56}(\varphi_5)H_{60} = E. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив матрицы $H_{i-1,i}$, найденные по методике, описанной в [5, с. 173–174], в выражение (7) и перемножив, получим в общем виде

$$H_{00} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Входящие в матрицу H_{00} элементы представляют собой выражения зависимостей искомых функций положения Π_k в неявном виде. Приравняв элементы матрицы H_{00} соответствующим элементам единичной матрицы E без тождеств нижней строки, можно записать систему из 12-ти трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} a_{11}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{12}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ \dots \\ a_{21}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ \dots \\ a_{33}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{34}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В указанной системе для отыскания действительных корней достаточно решить 6 уравнений, тогда как остальные уравнения являются зависимыми от них. В соответствии с рекоменда-

ми в [1, с. 90] запишем систему из шести уравнений с шестью неизвестными в виде

$$\begin{cases} a_{11}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{13}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ a_{14}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ a_{22}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{24}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ a_{34}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В указанной системе переменными параметрами являются пять групповых координат $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ и обобщенная координата q . Так как исследуемая структурная группа находится в особом положении, то якобиан системы равен нулю. На основании свойства проворачиваемости механизма в особом положении определим зависимости групповых координат от q из системы любых четырех уравнений, добавив к ним равенство нулю функции якобиана. Тогда система примет вид системы из пяти уравнений с пятью неизвестными, позволяющей решить задачу геометрии парадоксального механизма:

$$\begin{cases} a_{11}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{22}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) - 1 = 0, \\ a_{24}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ a_{34}(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0, \\ J(q, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

В представленной работе система решена численным методом. Результатами вычислений

являются графики зависимостей углов относительного поворота звеньев $\varphi_1(q), \varphi_2(q), \varphi_3(q), \varphi_4(q), \varphi_5(q)$ от обобщенной координаты q (рис. 2).

Графики наглядно иллюстрируют одну из геометрических особенностей кинематической цепи — свойственные ей соотношения углов. Так функции углов относительного поворота $\varphi_1(q), \varphi_2(q), \varphi_3(q), \varphi_4(q)$ звеньев, обладающих пространственной подвижностью, имеют период π , следовательно, на один оборот входного звена I приходится два оборота промежуточных звеньев 2, 3, 4. Углом поворота $(\varphi_1 - \varphi_4), (\varphi_2 - \varphi_3)$, располагающимся симметрично относительно друг друга (см. рис. 1), свойственна равная амплитуда.

Несмотря на симметричное расположение входного q и выходного φ_5 углов, зависимость $\varphi_5(q)$ имеет нелинейный характер. Отличие углов q и φ_5 друг от друга является нечетной относительно точек $q, \varphi_5 = k\pi/2$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) функцией с периодом π . Входное I и выходное 5 звенья вращаются в противоположных направлениях.

Геометрическое исследование механизма, выведенного из особого положения

Выше было отмечено, что в рабочем подвижном состоянии механизм находится в особом положении, тогда как в неособом положении механизм неподвижен. Для численного определения особого положения кинематической цепи оценим погрешность расчета якобиана. Для этого переведем механизм из особого положения в неособое и определим наибольшее значение модуля якобиана как масштаб для оценки ошибки его численного расчета.

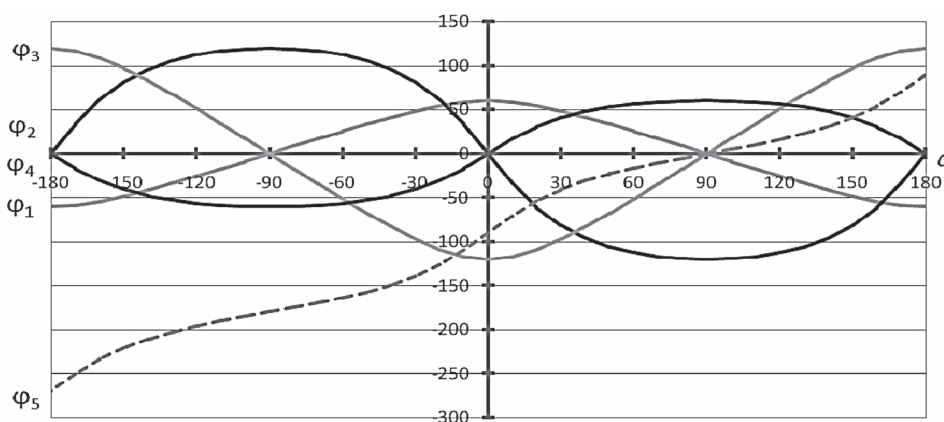


Рис. 2. Графики зависимостей углов относительного поворота звеньев от q

Выведение кинематической цепи (см. рис. 2 в [5, с. 172]) из особого положения осуществляется поочередным изменением величин углов $\varphi_i(q)$ для некоторого произвольного q (например, $q = 65^\circ$) и определением соответствующего положения с ориентацией места присоединения кинематической пары F к стойке. Кинематическая схема с измененным углом φ_2 представлена на рис. 1. Для нового положения будут действительны прежние матрицы перехода $H_{i-1,j}$ с новыми подставленными геометрическими параметрами $\varphi_i(q)$, x_6^A , y_6^A , z_6^A . Используя систему функций (9) для матрицы Якоби (3), по формуле (4) находят значения якобиана для каждо-

го отдельного положения кинематической цепи. Результаты вычислений — это графики зависимостей якобиана J от варьируемых параметров — углов $\varphi_i(q)$ (рис. 3).

Из графиков видно, что якобиан как функция пяти переменных $J(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5)$ достигает максимального значения $J_9 = -5,33 \cdot 10^{-4}$ вблизи $\varphi_2 = 0$. Порядок указанного максимального значения якобиана дает представление о масштабе погрешности его расчета. Сравнивая результаты вычислений, можно сделать вывод о том, что якобиан, подсчитанный для особого положения, допускается считать нулевым, т. е. положение, в котором работает механизм, действительно особое.

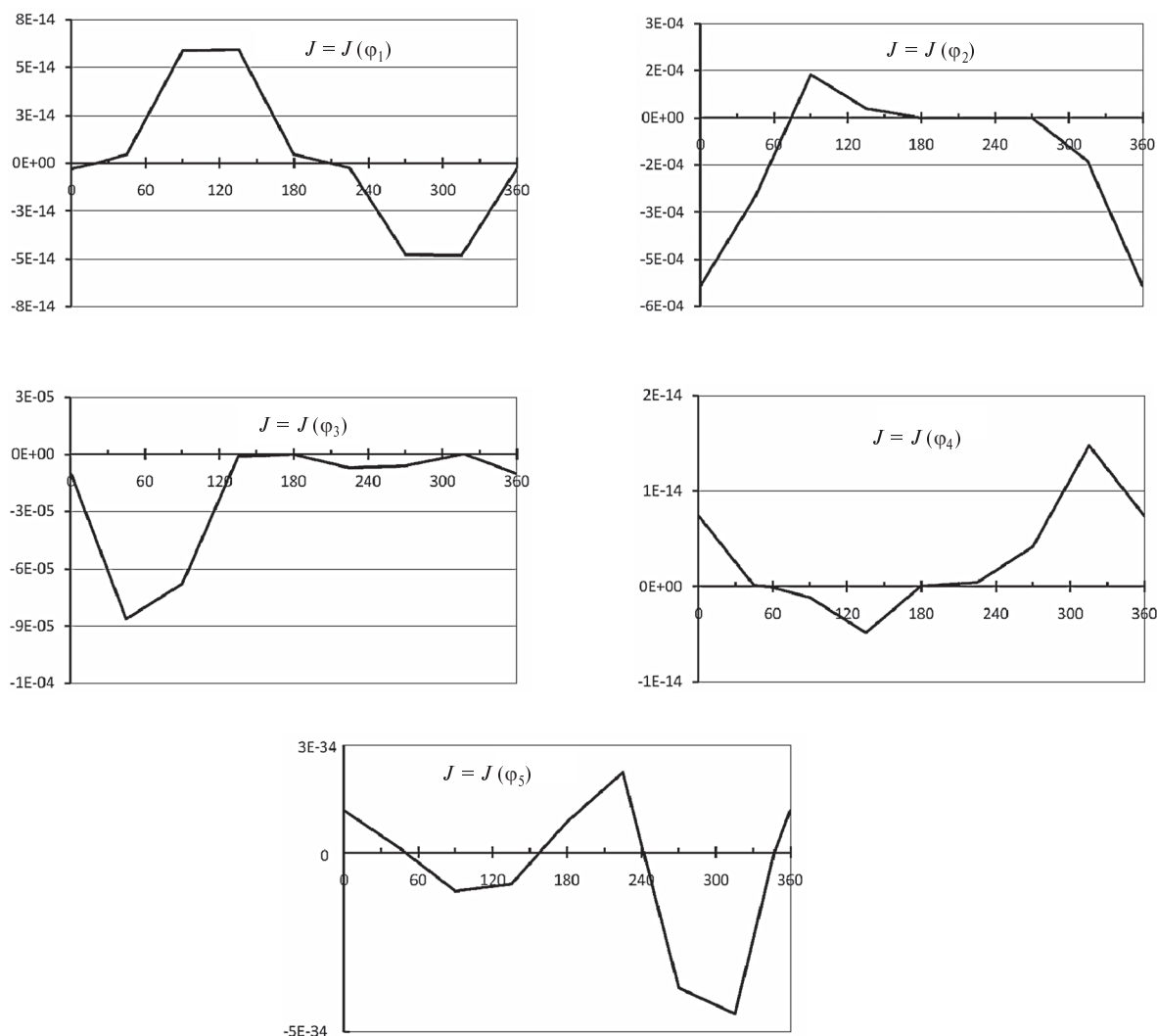


Рис. 3. Значения якобиана J в зависимости от $\varphi_i(q)$

В настоящей статье при решении задач геометрического исследования механизма с избыточными связями выявлены следующие особенности, свойственные такому механизму:

в случае, если парадоксальный механизм сразу распознается как структурная группа, не раскладывающаяся на независимые подсистемы, необходимые групповые уравнения получаются из замкнутого контура;

при решении системы уравнений, описыва-

ющих функцию положения, необходимо вместо одного из уравнений подставить выражение равенства нулю функции якобиана;

особое положение механизма характеризуется значением якобиана системы групповых уравнений на несколько порядков меньшим, чем его максимальное значение.

Выводы, полученные для исследуемого в настоящей работе парадоксального механизма, приведены впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вульфсон, И.И.** Механика машин [Текст]: учеб. пособие для вузов / И.И. Вульфсон, М.Л. Ерихов, М.З. Коловский [и др.]; Под ред. Г.А. Смирнова.— М.: Высшая школа, 1996.— 511 с.

2. **Евграфов, А.Н.** Теория механизмов и машин [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н. Петров.— 2-е изд., испр. и доп.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 248 с.

3. **Коловский, М.З.** Теория механизмов и машин [Текст]: учеб. пособие для студ. вузов / М.З. Коловский, А.Н. Евграфов, Ю.А. Семенов, А.В. Слоущ.— М.: Издательский центр «Академия», 2008.— 560 с.

4. **Терёшин, В.А.** Наглядное представление особых положений всех шестизвенных групп Ассура

[Текст] / В.А. Терёшин // Теория механизмов и машин.— 2003.— № 2.— С. 15–16.

5. **Хростицкий, А.А.** Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями [Текст] / А.А. Хростицкий, А.Н. Евграфов, В.А. Терёшин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 2 (123).— С. 170–176.

6. **Хростицкий, А.А.** Особенности структуры и геометрии пространственного шестизвенного механизма с избыточными связями [Текст] / А.А. Хростицкий, В.А. Терёшин // Современное машиностроение. Наука и образование.: Материалы Междунар. науч.-практ. конф.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 399–409.

УДК 628.562:621.9

А.С. Горелов, В.В. Прейс

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАССОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Несмотря на высокий уровень автоматизации современных массовых поточных производств в машиностроительной и приборостроительной отраслях промышленности, значительная часть параметров, определяющих качество производимой продукции, контролируется не автоматическими устройствами, а выборочно вручную. Рост производительности технологического оборудования и уровня автоматизации технологических процессов ставит задачу разработки методологических основ и концепции построения систем автоматизированного статистического контроля (САСК),

обеспечивающих создание эффективной системы управления качеством.

Под управлением качеством (*quality control*) понимают методы и виды деятельности оперативного характера, которые используют для выполнения требований к качеству. Статистическим управлением качеством (*statistical quality control*) называют часть деятельности для выполнения требований к качеству продукции, в которой применяют статистические методы.

В соответствии с положением стандартов ИСО серии 9000 статистические методы рас-

считаются как одно из эффективных средств обеспечения качества продукции. Они ориентированы на разработку сквозного механизма на всех этапах жизненного цикла продукции, начиная с исследования требований рынка к качеству продукции и кончая ее утилизацией после использования. Внедрение статистических методов направлено на создание гарантий непрерывности процесса обеспечения качества продукции в соответствии с требованиями Потребителя.

Методологические основы автоматизированного статистического контроля качества продукции массовых производств базируются на совокупности взаимосвязанных методов [1]:

проведении автоматизированного статистического контроля;

выборе и оценке планов контроля на основе математических моделей среднего выходного качества, затрат, связанных с контролем, информативности использования плана;

построении системы автоматизированного статистического контроля.

Планом статистического контроля (*sampling plan*) называется определенная последовательность действий, устанавливающая процедуру и критерии приемки продукции. Функции плана:

1) защита от дефектной продукции с определенной вероятностью. При любом варианте статистического контроля часть дефектной продукции удаляется из общего технологического потока, поэтому ее общий объем уменьшается;

2) статистическое управление качеством, обеспечивающее изменение среднего качества изготовленной продукции. Статистическое управление невозможно в случае разрушающего контроля, малоэффективно при отсутствии разбраковки накопленной части и замены (исправления) дефектной продукции, эффективно при разбраковке накопленной части и чрезвычайно эффективно при разбраковке и замене (исправлении) дефектной продукции. В случае разрушающего контроля план осуществляет только функцию защиты, назначается из экономических критериев.

Основными характеристиками планов предлагается считать: оперативную характеристику $P(Q)$; характеристику среднего выходного качества $AOQ(Q)$; экономическую характеристику $Z(Q)$; информационную характеристику $I(Q)$.

Полная совокупность характеристик планов статистического контроля в их взаимосвязи представлена на рис. 1.

Предложим более обобщенные по сравнению с действующими нормативными документами определения характеристик планов:

1. Уровень качества продукции Q (*production quality level*) — характеристика качества продукции, основанная на сравнении значения показателя качества оцениваемой продукции с базовым значением соответствующего показателя.

2. Оперативная характеристика $P(Q)$ (*operating characteristic curve*) — зависимость вероятности проведения выборочного контроля от уровня

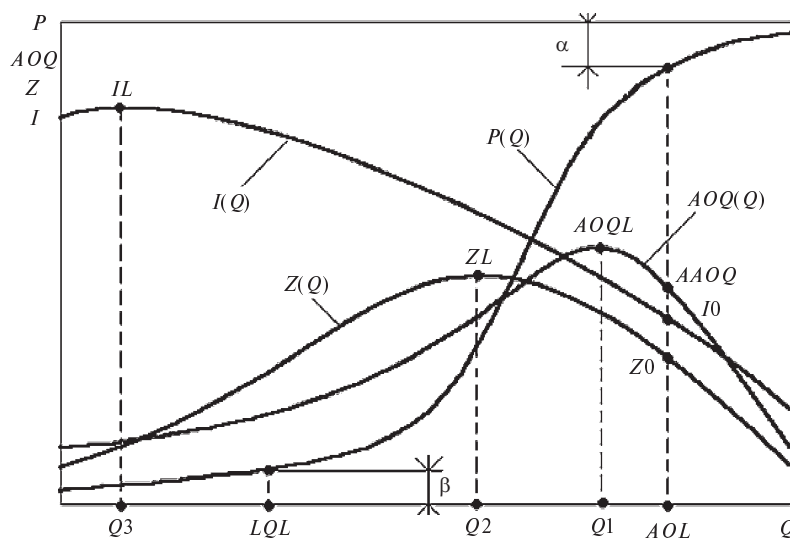


Рис. 1. Характеристики планов статистического контроля

качества процесса производства (в частности, показывает долю единиц или партий продукции, принимаемых в ходе выборочного контроля).

3. Риск Потребителя α (*consumer's risk*).

4. Риск Изготовителя (Поставщика) β (*producer's risk*).

5. Приемлемый уровень качества AQL (*acceptable quality level*) — уровень качества продукции, который служит границей удовлетворительного качества процесса производства и гарантирует приемлемое значение риска Потребителя α .

6. Предельный уровень качества LQL (*limiting quality level*) — уровень качества продукции, который служит границей неудовлетворительного качества процесса производства и гарантирует приемлемое значение риска Изготовителя β .

7. Характеристика среднего выходного качества $AOQ(Q)$ (*average outgoing quality curve*) — средний уровень качества продукции после контроля как результат статистического управления при определенном входном уровне качества продукции Q .

8. Предел среднего выходного качества $AOQL$ (*average outgoing quality limit*) — максимальное значение среднего выходного качества AOQ для заданного плана контроля при входном уровне качества продукции $Q1$.

9. Приемлемое среднее выходное качество $AAOQ$ (*acceptable average outgoing quality*) — средний уровень качества продукции, который соответствует границе удовлетворительного качества процесса производства AQL . Поскольку $AAOQ$ определяется не только планом контроля, но и «историей качества», т. е. распределением значения уровня качества в процессе производства, то эта характеристика есть «интегральное среднее выходное качество».

10. Экономическая характеристика контроля $Z(Q)$ — зависимость средних затрат, связанных с контролем, от уровня качества процесса производства. Средние затраты, связанные с контролем, можно определить выражением

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = bN + a_1 G_D + a_2 D_G, \quad (1)$$

где N — среднее число проконтролированных единиц продукции; G_D — среднее число ошибочно забракованных годных единиц; D_G — среднее число ошибочно принятых дефектных единиц; b, a_1, a_2 — стоимостные коэффициенты.

11. Предельное значение средних затрат ZL для данного плана контроля и стоимостных ко-

эффициентов b, a_1, a_2 при входном уровне качества продукции $Q2$.

12. Приемлемое значение средних затрат $Z0$, соответствующее границе удовлетворительного качества AQL процесса производства. Определяется не только планом контроля, но и «историей качества», т. е. распределением значения уровня качества в процессе производства, поэтому эта характеристика может быть названа «интегральными средними затратами».

13. Информационная характеристика контроля $I(Q)$ — зависимость информации о результатах контроля от уровня качества процесса производства. Предлагаемая информационная оценка результатов статистического контроля представлена в виде разницы неопределенности (энтропии) входного H_Q и выходного H_{Qs} качества продукции:

$$I = H_Q - H_{Qs}. \quad (2)$$

14. Приемлемое значение информации $I0$, соответствующее приемлемому уровню качества AQL , может быть оценено по формуле

$$I > \frac{\chi_\alpha^2}{2N}, \quad (3)$$

где χ_α^2 — значение χ^2 — распределения при доверительной вероятности, соответствующей риску Потребителя α .

15. Максимальное значение информации IL для заданного плана контроля при входном уровне качества продукции $Q3$.

Статистическое управление само по себе не улучшает качество отдельных единиц продукции. После проведения планируемых и систематически выполняемых действий (процедуры статистического контроля) меняется приемлемый уровень качества AQL и возникает среднее выходное качество AOQ (см. рис. 1). При замене дефектных единиц продукции величина AOQ достигает максимального значения — предела среднего выходного качества $AOQL$. В результате при любом входном уровне качества среднее выходное качество не превышает $AOQL$. Но даже если отсутствует процедура замены или исправления дефектной продукции, то AOQ все равно будет лучше, чем уровень качества QL (*quality level*) до контроля за счет разбраковки объемов выборок и объемов накопления.

Представляется, что в автоматизированных массовых поточных производствах основным



результатом статистического управления качеством продукции можно считать улучшение среднего выходного качества AOQ .

Основная особенность таких производств состоит в том, что продукция на приемку поступает не партиями, а поштучно — способом «поток», поскольку формирование потока продукции в отдельные партии в ряде случаев невозможно с технологической точки зрения, а в большинстве случаев экономически неоправданно.

Для управления качеством продукции в автоматизированных массовых поточных производствах требуются методы контроля с оперативной обратной связью. К ним относятся методы непрерывного выборочного контроля, которые позволяют обеспечить сохранение ритма производства и заданную производительность технологического оборудования. Термин «непрерывный выборочный контроль» не совсем удачен, однако широко применяется в научной литературе и узаконен ГОСТами. По нашему мнению, следует говорить о «контроле последовательности единиц продукции в потоке».

Методы проведения автоматизированного статистического контроля в принципе могут реализовывать все известные статистические процедуры, но технически наиболее просто использовать для этого планы непрерывного выборочного контроля CSP (*continuous sampling plan*), которые были предложены в 40-е годы прошлого века Доджем и Ромигом, но не предназначались для применения в автоматических контрольных устройствах.

При использовании одностадийной модели плана $CSP-1$ контрольное устройство автоматической линии производит сплошную проверку продукции в ходе производственного процесса начиная с первого выпускаемого изделия. Такая проверка производится до тех пор, пока через контрольное устройство не пройдет подряд i годных изделий. После этого начинается выборочный контроль с частотой f , продолжающийся до тех пор, пока снова не будет обнаружено дефектное изделие. Сразу возобновляется сплошная проверка, которая продолжается, пока не будет выполнено требование прохождения через контрольное устройство подряд i годных изделий.

Основной недостаток планов Доджа — Ромига применительно к использованию в автоматических линиях — чередование процедур выбо-

рочного и сплошного контроля при появлении дефектных изделий, что приводит к необходимости изменять производительность технологических или контрольных устройств. Поэтому было предложено обеспечивать переменную производительность контрольного устройства за счет избирательной загрузки многопозиционных технологических устройств.

В связи с указанным недостатком планов CSP были разработаны планы автоматического непрерывного выборочного контроля $ACSP$ (*automatic continuous sampling plan*). Эти планы позволяют проводить контроль ритмично, не уменьшая производительность технологических устройств. При одностадийном плане $ACSP-1$ контролируют каждое f^{-1} изделие. При этом текущая последовательность i изделий, выпущенных автоматической линией, находится в накопителе. При появлении среди выборочно контролируемых изделий дефектного объем накопителя уводится из потока на разбраковку, а линия налаживается. Было показано, что средний объем выборки при использовании плана $ACSP-1$ меньше, чем в случае использования плана $CSP-1$, причем имеется возможность обеспечения более низких значений предела среднего выходного уровня дефектности при использовании плана $ACSP-1$.

Применение разработанных планов непрерывного выборочного контроля модели $ACSP$ для решения задач управления качеством продукции в условиях автоматизированного массового поточного производства позволило предложить и новый метод реализации автоматизированного статистического контроля. Использование предложенного метода обеспечивает ограничение уровня дефектности в контролируемой продукции до определенной величины, заложенной в требованиях Потребителя.

Большое разнообразие существующих сегодня методик выбора планов, появление ГОСТов и регламентов, скопированных со стандартов ISO и по-прежнему содержащих статистические таблицы, свидетельствуют о доминировании в отечественной прикладной статистике устаревших западных методик.

Предлагаемая обобщенная методика выбора плана статистического контроля основана на комплексном использовании среднего выходного качества AOQ , информационной характеристики I и экономической характеристики Z . Цель

выбора плана — обеспечение приемлемого среднего качества продукции при значимой информации и приемлемых средних затратах.

Использование ранее не применявшейся информационной характеристики позволяет отразить в результатах контроля влияние погрешности измерительной системы и возможность комплексной оценки варианта контроля для совокупности разнородных признаков качества. Безразмерная информационная оценка позволяет выделить информативную совокупность параметров признаков и скорректировать планы контроля взаимосвязанных параметров.

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1. Устанавливаются требования к качеству продукции в виде предельно допустимого уровня качества LQL .

2. Формируется множество, которое состоит из вариантов планов, обеспечивающих заданный LQL .

В зависимости от технологии и оборудования производства, стадии производства и требований к продукции это могут быть планы непрерывного выборочного контроля с параметрами (f, i) , традиционное статистическое регулирование «потока» или план приемочного контроля партии. В случае применения плана приемочного контроля партии он характеризуется следующими параметрами: объемами выборок n , приемочными и браковочными числами c, d (при использовании альтернативных признаков) или нижними и верхними контрольными границами x_L, x_U (при использовании количественных признаков).

3. Этап «сужения» множества вариантов планов, оценка информативности (информационной эффективности) плана.

Понятие информационной эффективности предлагается использовать наряду с понятиями экономической или производственной эффективности. Информационную эффективность можно оценить через значение информации (2), удовлетворяющее условию (3) и получаемое от уменьшения энтропии состояния производственной системы в результате использования плана статистического контроля (чего не было в известных ранее методиках оценки планов).

К особенностям информационного подхода относится и возможность комплексной безразмерной оценки работы планов одновременно всех контролируемых параметров продукции, а так-

же учета функций погрешности измерения контрольных устройств и взаимных связей параметров внутри информационного поля.

4. Этап группирования параметров на стадии проекта системы автоматизированного статистического контроля, обусловленный технической реализацией ее подсистем, главным образом — подсистемы выделения и подготовки выборок, а также подсистемы измерения и контроля.

Из множества планов, суженного на предыдущем этапе, формируется новое множество, состоящее из планов контроля сгруппированных параметров. При выборе плана ключевая роль отведена конструкторам технической системы, роль специалистов-статистиков заключается в анализе возможных результатов статистического контроля.

5. Предпоследний этап — проектная экономическая оценка, которая служит наиболее значимым критерием выбора планов [2]. На этапе проектирования системы автоматизированного статистического контроля она не может быть абсолютно точной, но тем не менее предшествует производственной оценке. Множество реальных технических решений получает дополнительную характеристику в виде оценок затрат, связанных с контролем.

Этот этап базируется на экспертных оценках безразмерных значений стоимостных коэффициентов b, a_1, a_2 , входящих в формулу (1).

На основании полученных функций затрат Изготовитель еще более сужает множество возможных вариантов планов и может даже остановиться на каком-то конкретном варианте (что неизбежно при проектировании автоматических систем).

Только производственная реализация позволит на шестом этапе окончательно оценить правильность принятых решений.

6. Этап производственной оценки, которая базируется на «истории качества» и «истории затрат».

«История качества» может характеризоваться приемлемым средним уровнем качества AQL и функций распределения качества $\omega(Q)$ за некоторый временной период, если считать качество Q случайной величиной при налаженном технологическом процессе.

Новый термин «история затрат» введен по аналогии с известным термином «история качества». Возможна оценка функции распределения затрат $\omega(Z)$ за некоторый временной период.

На основе производственной оценки дается оценка множеству вариантов объединенного качества Q_{Σ} , общей информации I_{Σ} и суммарных затрат Z_{Σ} .

Особенностью нового подхода к выбору планов является доминирующая роль производителей (конструкторов и технологов), под требования которых должны подстраиваться математики-статистики, обеспечивая статистические гарантии при рациональном техническом решении. В то же время рациональность технического решения системы автоматизированного статистического контроля обусловлена в первую очередь экономической оценкой.

В соответствии с методологией системного подхода структура интегрированной системы автоматизированного статистического контроля качества продукции (САСК КП) может быть представлена иерархической моделью (рис. 2), в которой структурные элементы системы выделяются и группируются по принципу подчиненности.

На первом уровне иерархической модели выделены: система процедур, техническая и информационно-управляющая системы.

Система процедур включает в себя совокупность способов и методик контроля, схем и ал-

горитмов. Она задает информационные, технические, экономические и теоретические (статистические, численные) параметры статистического контроля.

Техническая система представляет собой совокупность технических средств, реализующих систему процедур (действий) в автоматическом и/или полуавтоматическом режимах.

Информационно-управляющая система представляет собой совокупность предписываемых управляющих воздействий и средств технического обеспечения, осуществляющих автоматизированное управление работой всех структурных элементов САСК КП.

На втором уровне иерархической модели в структуре технической системы выделены подсистемы второго уровня: система выделения и подготовки выборок и проб, система измерения и контроля и система воздействия на продукцию по результатам контроля.

На третьем уровне модели для каждой из систем второго уровня выделены основные функциональные устройства.

Для каждого функционального устройства предусмотрен четвертый иерархический уровень, содержащий элементы в составе устройства.



Рис. 2. Иерархическая модель структуры системы автоматизированного статистического контроля качества продукции

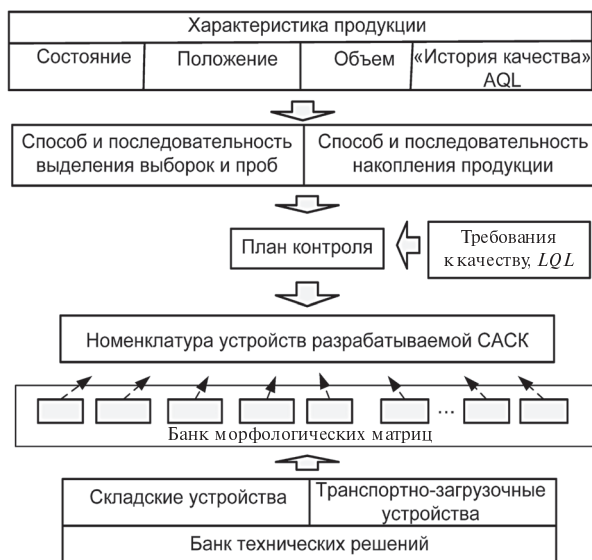


Рис. 3. Последовательность формирования и выбора вариантов функциональных устройств технической системы в структуре системы автоматизированного статистического контроля качества продукции

Последовательность формирования и выбора вариантов функциональных устройств технической системы в структуре системы автоматизированного статистического контроля качества продукции САК КП представлена на рис. 3.

1. Формируется перечень характеристик (состояние, положение, объем) и «истории качества» продукции.

2. Выбирается схема контроля (способ и последовательность выделения выборок и накопления продукции) на основе сформированных характеристик продукции с учетом «истории качества».

3. Определяется план контроля на основе выбранной схемы с учетом требований к качеству производимой продукции (например, предельный выходной уровень дефектности).

4. Формируется номенклатура функциональных устройств на основе банка морфологических матриц.

Источником формирования банка морфологических матриц функциональных систем и устройств служит банк технических решений, в ка-

честве которых предлагается использовать обширные разработки мировой и отечественной школы автоматизации поточных производств, в частности в области создания автоматизированных систем транспортирования штучной продукции и манипулирования ею в процессе транспортирования. При этом может быть применен известный метод создания новых конструкций путем преобразования одного или нескольких прототипов. В качестве прототипов выступают устройства автоматизации, не предназначенные непосредственно для реализации различных процедур статистического контроля, но обладающие качествами, которые позволяют использовать их для этой цели.

Система выделения выборок и проб и система измерения и контроля (см. рис. 2) достаточно широко представлены в научно-технической литературе, патентных материалах и в виде реальных конструкций [3, 4].

Система воздействия на продукцию (см. рис. 2) ранее системно не описывалась и представляет собой автоматизированный контрольный накопитель продукции, оснащенный устройствами для приема, упорядоченного размещения (разделения) продукции, упорядоченного удаления продукции. При контроле «статичной» совокупности единиц автоматизированный контрольный накопитель может представлять собой стационарную площадку, склад, резервуар, бункер и пр. При контроле «динамичной» совокупности контрольные накопители могут располагаться между соседними разноименными технологическими позициями линии, причем связь позиций может быть жесткой или гибкой.

Представленные основы автоматизированного статистического контроля качества продукции, включающие новые методы проведения контроля, выбора и оценки планов контроля, а также технические решения функциональных устройств обеспечивают предпосылки для создания систем автоматизированного статистического контроля качества продукции, позволяющие эффективно управлять качеством в условиях массовых поточных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов, А.С. Автоматизированный статистический контроль продукции массовых производств

[Текст] / А.С. Горелов / Под науч. ред. В.В. Прейса. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. — 220 с.



2. Горелов, А.С. Планирование контроля качества продукции на основе экономико-статистических критериев [Текст] / А.С. Горелов [и др.] / Под. науч. ред. В.В. Прейса.— Тула: Изд-во ТулГУ, 2010.— 120 с.

3. Горелов, А.С. Системы отбора и подготовки проб для автоматизированного статистического контроля качества нештучной продукции [Текст] /

А.С. Горелов [и др.] / Под. научн. ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006.— 104 с.

4. Автоматизация статистического контроля качества пищевой продукции в массовых производствах [Текст] / А.С. Горелов [и др.] / Под ред. В.В. Прейса.— 2-е изд., перераб. и доп.— Тула: Изд-во ТулГУ, 2011.— 140 с.

УДК 531.8:621.01

А.А. Хростицкий, В.А. Терешин

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПАРАДОКСАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

В технике находят применение механизмы, содержащие избыточные связи, которые имеют подвижность только в особом положении — это так называемые *парадоксальные механизмы* [1, с. 222], примерами которых являются: механизм сдвоенного параллелограмма, эллипсограф [3], механизм Беннета, шестизвенный пространственный механизм Брикара [4, с. 40–44] и ряд других.

В монографии [4, с. 130–132] приведено несколько методов выполнения силового расчета механизмов с избыточными связями. Заслуживает внимания метод, который решает задачу силового расчета в два этапа. На первом этапе устраняются избыточные связи, такие, при которых остановка ведущего звена механизма обращает его в ферму. При этом механизм получается статически определимым. На втором этапе определяются реакции отброшенных ранее связей. Для этого методом сил раскрывается статическая неопределимость механизма. Способы, описанные в [4], неприменимы для механизмов, находящихся в особом положении, так как определитель матрицы жесткости упругой статически неопределимой системы, содержащей матрицу Якоби [2, с. 395], оказывается равным нулю.

В статье предлагается метод силового анализа, основанный на двухэтапном расчете парадоксальных механизмов. С этой целью на первом этапе силового расчета устраняют неосвобождающую избыточную связь и определяют обобщенную движущую силу. На втором этапе выполня-

ют расчет статически неопределимого механизма, в котором движущую силу записывают как реакцию фиктивной упругой связи. Деформацию фиктивной связи, как и деформации остальных упругих элементов, выражают через малые изменения обобщенных координат с помощью уравнений совместности деформаций. Таким образом, система уравнений равновесия, содержащая реакции упругих элементов и обобщенную движущую силу, замыкается. Из полученной замкнутой системы определяют все малые изменения обобщенных координат, по ним находят обобщенную силу и реакции во всех кинематических парах.

В статье силовой анализ выполнен на примере пространственной шестизвенной кинематической цепи *ABCDEF* (рис. 1), применяемой в установке турбулентного смесителя.

На указанном рисунке q — угол поворота входного звена *I* (обобщенная координата); $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ — углы относительного поворота звеньев. Предположим, что на механизм действует одна внешняя сила — сила тяжести $G = \text{const}$ рабочего органа, приложенная в точке S ($CS = DS$) и направленная противоположно оси y_0 , т. е. $G = (0, -G, 0)^T$. Полагаем движение механизма достаточно медленным, чтобы пренебречь силами инерции. Массы звеньев считаются пренебрежимо малыми. Механизм содержит одну избыточную связь, его подвижность $w = 1$ [5]. Такая кинематическая цепь является один раз статически неопределимой, и ее силовой расчет, как указывалось выше, проводится в два этапа.

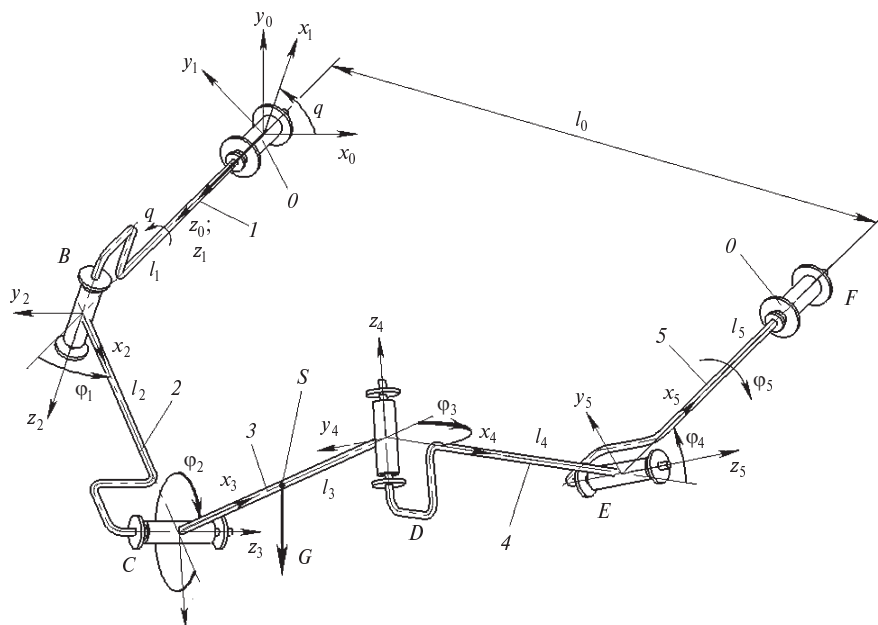


Рис. 1. Кинематическая схема для первого этапа силового расчета механизма

Этап 1. Расчет статически определимого механизма. Рассмотрим модель пространственного шестизвенника с жесткими звеньями. Из структурного исследования данного механизма [6] известно, что в кинематической цепи можно устранить любую одну из присутствующих связей, при этом число степеней подвижности механизма не изменится. Устраняемая таким образом связь называется *неосвобождающей* [2, с. 21].

Отбросим, например, неосвобождающую связь в шарнире F , направленную вдоль оси x ; тогда $R_{Fx} = 0$. Получим статически определимый механизм. Кинематическая цепь такого механизма позволяет найти неизвестную обобщенную движущую силу (уравновешивающий момент) Q . Для полученного контура $ABCDEF$ составим уравнения кинестатики. Запишем пять уравнений равновесия для ветвей кинематических пар A, B, C, D, E , которые принимают форму уравнений моментов:

$$\begin{cases} M_{Az}(R_{Fy}, R_{Fz}, G, M_{Fx}, M_{Fy}, Q) = 0; \\ M_{Bz}(R_{Fy}, R_{Fz}, G, M_{Fx}, M_{Fy}) = 0; \\ M_{Cz}(R_{Fy}, R_{Fz}, G, M_{Fx}, M_{Fy}) = 0; \\ M_{Dz}(R_{Fy}, R_{Fz}, M_{Fx}, M_{Fy}) = 0; \\ M_{Ez}(R_{Fy}, R_{Fz}, M_{Fx}, M_{Fy}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Величина внешней силы $G = (G_{x3}, G_{y3}, G_{z3})^T$ в локальной системе координат при переходе из абсолютной системы определяется выражением

$$\begin{bmatrix} G_{x3} \\ G_{y3} \\ G_{z3} \end{bmatrix} = A_{30} \begin{bmatrix} 0 \\ -G \\ 0 \end{bmatrix} = A_{03}^T \begin{bmatrix} 0 \\ -G \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где A_{03} — матрица направляющих косинусов, определяемая по методике, описанной в [5, с. 173–174].

Система (1) позволяет определить только уравновешивающий момент Q . Реакции в шарнире F находят из решения статически неопределимой системы на втором этапе. Примем $G = 1$ Н. Результатом решения системы (1) является график зависимости $Q = Q(q)$ (рис. 2).

Из графика видно, что максимум модуля уравновешивающего момента достигается через каждую половину оборота входного звена.

Проверкой правильности выявления совокупности неосвобождающих связей служит неизменность величины уравновешивающего момента при любой отбрасываемой связи из данной совокупности. При этом уравнения равновесия записываются для ветвей кинематических пар в соответствии с видом и направлением от-

брасываемой связи. Проведя указанную проверку для исследуемого механизма, можно убедиться, что выбранная связь действительно является неосвобождающей.

Полученные на первом этапе значения уравновешивающего момента Q (обобщенной движущей силы) независимо получаются и на втором этапе силового расчета.

Этап 2. Расчет статически неопределимого механизма. Разомкнем контур $ABCSDEF$ в точке S . Получим две кинематические цепи — $ABCS$ и $SDEF$ — с приложенными внешними силами — $P, -P, G$ — в точке размыкания (рис. 3).

Рассмотрим кинематическую цепь $ABCS$. Согласно принципу возможных перемещений имеем

$$\begin{cases} \delta A = 0; \\ \delta \rho^T P + \sum_{i=1}^3 \delta \xi_i^T R_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\delta \rho = [\delta x_S^{(0)}; \delta y_S^{(0)}; \delta z_S^{(0)}; \delta \alpha_S^{(0)}; \delta \beta_S^{(0)}; \delta \gamma_S^{(0)}]^T$ — шестимерный столбец вариаций линейных и угловых абсолютных координат звена 3 в точке S ;

$P = [P_{Sx}^{(0)}; P_{Sy}^{(0)}; P_{Sz}^{(0)}; M_{Sx}^{(0)}; M_{Sy}^{(0)}; M_{Sz}^{(0)}]^T$ — шестимерный столбец внешнего силового воздействия (торсор) на цепь $ABCS$ в точке S , заданный в проекциях на оси нулевой системы координат;

$\delta \xi_i = [\delta \Delta x_i; \delta \Delta y_i; \delta \Delta z_i; \delta \Delta \alpha_i; \delta \Delta \beta_i; \delta \Delta \gamma_i]^T$ — столбец вариаций линейных и угловых упругих деформаций в кинематической паре $i, (i+1)$;

$R_i = [R_{xi}^{(i)}; R_{yi}^{(i)}; R_{zi}^{(i)}; M_{xi}^{(i)}; M_{yi}^{(i)}; M_{zi}^{(i)}]^T$ — столбец силового взаимодействия между звеньями i и $(i+1)$, заданный в проекциях на оси i -й системы координат.

Абсолютные обобщенные координаты ρ звена 3 связаны геометрическими зависимостями с относительными координатами в кинематических парах. Тогда соответствующую вариацию в матричной форме можно записать так:

$$\delta \rho = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS} \delta \xi_i; \quad (4)$$

здесь три (6×6) -матрицы полных производных по независимым переменным ξ_i определяются выражением

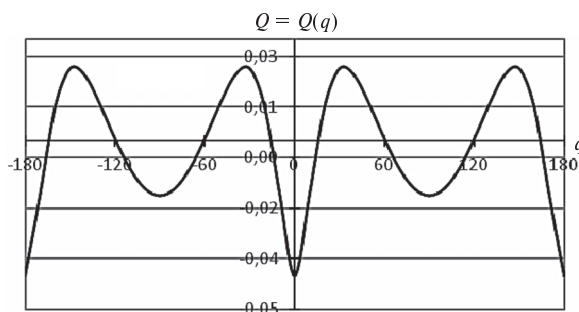


Рис. 2. Величина уравнивающего момента Q (Н·м) в зависимости от обобщенной координаты q

$$\left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS} = \left[\frac{\partial \rho}{\partial \xi_i} \right]_{AS} + \left[\frac{\partial \rho}{\partial \varphi} \right]_{AS} \left[\frac{d\varphi}{d\xi_i} \right]_{AS} \quad (5)$$

и формируют (6×18) -матрицу Якоби

$$\left[\frac{d\rho}{d\xi_1} \quad \frac{d\rho}{d\xi_2} \quad \frac{d\rho}{d\xi_3} \right]_{AS} \text{ для ветви } AS; \varphi — \text{столбец}$$

углов поворота в кинематических парах, зависящих от всех независимых переменных. Подставив выражение (4) в (3), получим

$$\sum_{i=1}^3 \delta \xi_i^T \left[\left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T P + R_i \right] = 0. \quad (6)$$

В силу независимости произвольных вариаций $\delta \xi_i$ множители при них равны нулю. Тогда из (6) имеем

$$R_i = - \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T P. \quad (7)$$

Получен столбец внутренних реакций кинематической цепи, зависящий от геометрических

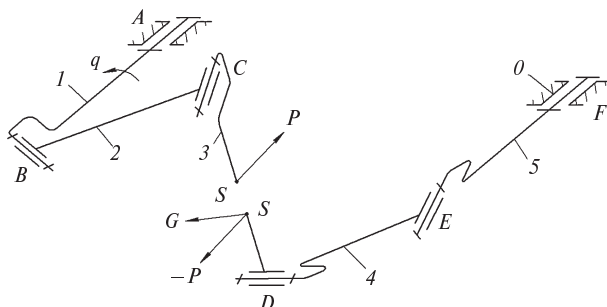


Рис. 3. Кинематическая схема для второго этапа силового расчета механизма без избыточной связи

соотношений, характеризуемых матрицей Яко-

би. Компоненты матрицы Якоби $\left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}$ ра-

ционально искать из уравнений равновесия, составленных для кинематической цепи от точки S до $i, (i+1)$ -й кинематической пары. Пусть k -й элемент столбца внешних воздействий P равен единице ($p_k = 1$), тогда как остальные элементы равны нулю: например, $k = 2$ $P = [0; 1; 0; 0; 0; 0]^T$.

Тогда из (7) столбец реакций R_i окажется численно равен k -му столбцу блока i матрицы Якоби. Изменяя k от 1 до 6, можно найти все элементы указанного блока и, таким образом, получить все компоненты матрицы Якоби в виде функций от q .

Найдем теперь реакции R_i в статически неопределимом контуре $ABCSDEF$. Ввиду линейности упругих взаимодействий в кинематических парах упругие деформации определяются в матричной форме как

$$\xi_i = -e_i R_i, \quad (8)$$

где $e_i = \text{diag}\{e_{ij}\} = \begin{bmatrix} e_{i1} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & e_{i6} \end{bmatrix}$ — матрица по-

датливостей. Знак «минус» обусловлен тем, что R_i является воздействием i -го упругого элемента на звено $(i+1)$. Подставляя уравнение (7) для кинематической цепи $ABCSDEF$ в (7), получим столбец деформаций

$$\xi_i = e_i \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T P. \quad (9)$$

Приращение $\Delta\rho$, соответствующее упругим деформациям и вызывающее линейные и угловые смещения точки S , определяется аналогично (4):

$$\Delta\rho = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{d\rho}{d\xi_i} \right)_{AS} \xi_i. \quad (10)$$

С учетом выражения (9) запишем

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \sum_{i=1}^3 \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS} e_i \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T P = \\ &= \left[\sum_{i=1}^3 \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS} e_i \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T \right] P. \end{aligned} \quad (11)$$

Введя в обозначения приведенную к точке S податливость E_{AS} цепи $ABCS$, окончательно получим в матричном виде

$$\Delta\rho = E_{AS} P. \quad (12)$$

Формула (12) определяет линейные и угловые смещения звена 3 в точке S от приложенного в этой же точке внешнего усилия.

Аналогично находится матрица смещений в точке S для кинематической цепи $SDEF$:

$$\Delta\rho = E_{FS} (G - P), \quad (13)$$

где $E_{FS} = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{FS} e_i \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{FS}^T$ — приведенная

к точке S матрица податливостей цепи $SDEF$; G — шестимерный столбец внешнего силового воздействия на контур $ABCSDEF$ в точке S , заданный в проекциях на оси нулевой системы координат.

Приравняв правые части уравнений совместности деформаций (12) и (13), получим выражение, определяющее внутренние усилия в точке S контура $ABCSDEF$:

$$P = (E_{AS} + E_{FS})^{-1} E_{FS} G. \quad (14)$$

Подстановкой формул (14) в (7) можно получить выражение для расчета всех внутренних усилий в кинематических парах цепи $ABCS$:

$$R_i = - \left[\frac{d\rho}{d\xi_i} \right]_{AS}^T (E_{AS} + E_{FS})^{-1} E_{FS} G. \quad (15)$$

На основе выражений (12) и (13) находят соотношение между внешней силой и деформацией:

$$G = (E_{AS}^{-1} + E_{FS}^{-1}) \Delta\rho = C_S \Delta\rho, \quad (16)$$

где C_S — приведенная жесткость кинематической цепи $ABCSDEF$. Соотношение (16) может использоваться при динамическом исследовании парадоксального механизма в предположении, что столбец G включает в себя и инерционные силы.

Реакции в кинематических парах цепи $SDEF$ записывают аналогично выражению (15), которое с учетом (14) примет вид

$$\begin{aligned} R_j &= - \left[\frac{d\rho}{d\xi_j} \right]_{FS}^T (G - P) = \\ &= - \left[\frac{d\rho}{d\xi_j} \right]_{FS}^T \left[I - (E_{AS} + E_{FS})^{-1} E_{FS} \right] G, \end{aligned} \quad (3)$$

где I — единичная (6×6) -матрица.

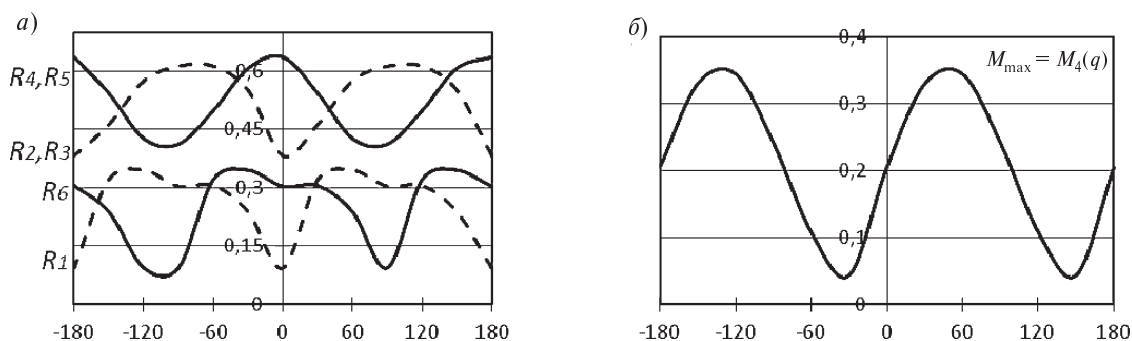


Рис. 4. Графики зависимостей реакций в кинематических парах R_i , H (а) и максимального момента M_4 , Н·м, (б) от обобщенной координаты q

Воспользовавшись приведенной выше методикой и результатами геометрического и кинематического анализов, полученными в работе [5], можно определить реакции в кинематических парах. Пусть внешней силой является сила тяжести, заданная как столбец $G = [0; -1; 0; 0; 0; 0]^T$. По результатам вычислений построены графики зависимостей реакций в кинематических парах от обобщенной координаты q (рис. 4, а) и график максимального изгибающего момента в кинематических парах (рис. 4, б).

Графики наглядно иллюстрируют распределение модулей сил и момента в кинематических парах во время работы исследуемого шестизвенника.

В результате исследований парадоксального механизма с избыточными связями предложена

методика силового расчета такого механизма, предполагающая два этапа расчета:

1. Вначале устраняют неосвобождающую избыточную связь и определяют обобщенную движущую силу Q . Этот этап можно самостоятельно использовать в упрощенных расчетах, когда требуется определить только Q .

2. Затем выполняют расчет статически неопределимого механизма. Для этого записывают уравнения совместности деформаций и в соответствии с предложенной методикой определяют реакции и моменты реакций во всех кинематических парах.

Результаты силового анализа, приведенные в настоящей статье, могут быть использованы при инженерных расчетах конструкций, например при расчете несущей способности подшипников, требуемой мощности приводов, а также при динамическом исследовании механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диментберг, Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов [Текст] / Ф.М. Диментберг.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.— 336 с.
2. Колковский, М.З. Теория механизмов и машин [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.З. Колковский, А.Н. Евграфов, Ю.А. Семенов, А.В. Слоущ.— М.: Издательский центр «Академия», 2008.— 560 с.
3. Лебедев, В.И. Синтез механизмов с пассивными связями [Текст] / В.И. Лебедев, А.М. Турланов // Теория механизмов и машин.— 2003. № 2.— С. 28–31.
4. Мудров, П.Г. Пространственные механизмы

с вращательными парами [Текст] / П.Г. Мудров.— Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1976.— 264 с.

5. Хростицкий, А.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями [Текст] / А.А. Хростицкий, А.Н. Евграфов, В.А. Терешин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 2 (123).— С. 170–176.

6. Хростицкий, А.А. Особенности структуры и геометрии пространственного шестизвенного механизма с избыточными связями [Текст] / А.А. Хростицкий, В.А. Терешин // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конф.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 399–409.

УДК 621.825

Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин

УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МУФТ

Надежность современных судовых установок, состоящих из сложных агрегатов, соединенных в одну кинематическую цепь, в значительной мере зависит от правильного подбора соединительных муфт. Судовой валопровод работает в сложных условиях, для которых характерно многообразие эксплуатационных режимов и возникающих при этом нагрузок.

Из всех муфт, применяемых в приводах судовых энергетических установок (дизельных и турбинных), наиболее совершенны шинно-пневматические муфты (ШПМ). Работоспособность таких муфт, устанавливаемых в судовом валопроводе в качестве разобщительного, упругого и шумоизолирующего элемента, в значительной мере определяется условиями развития крутильных колебаний, которые в свою очередь зависят от податливости и удельного трения, определяющих демпфирующие свойства самих муфт.

Главные признаки, характеризующие работоспособность и предельное состояние основного элемента муфты — резино-кордного баллона, — это его остаточная деформация и герметичность (целостность оболочки), определяемые воздействием высоких температур от внутреннего трения при крутильных колебаниях системы, которые передаются муфтой. Величина остаточной деформации выражается изменением геометрических размеров и может оцениваться величиной зазора между фрикционными колодками (колодочный вариант) или внутренним фрикционным протектором баллона (бесколодочный вариант) и внутренним барабаном муфты.

Обследование баллонов ШПМ непосредственно на судах показало, что зазор в муфтах за установленное время эксплуатации уменьшается с $(6,5-7,0) \cdot 10^{-3}$ м до $(1,0-1,5) \cdot 10^{-3}$ м. Выработанный ресурс муфт при этом составляет до 7–9 тыс.ч. при сроке службы 7–9 лет. Эксплуатация муфт в специфических условиях (присутствие газовой среды, воды, топлива) сокращает ресурс до 2,3–4,5 тыс.ч.

Были зафиксированы случаи разрушения баллонов. Причиной их разрушения при работе на максимальных оборотах стал недопустимо большой знакопеременный момент, действующий в муфте, что вызвано повышенной крутильной податливостью последней.

При обследовании баллонов был обнаружен разрыв покровной резины с расслоением кромок протекторов. По краю кромок внутреннего протектора зафиксированы очаги сильного расплавления кордного каркаса. Срезы разрушенных баллонов показали, что расплавление капронового каркаса вследствие высокой температуры (до 200 °С) способствует осмолению камеры и разрыву по наиболее разогретому участку каркаса.

Особый вид выхода из строя наблюдался у баллонов с рабочим давлением сжатого воздуха в муфте $(13-15) \cdot 10^5$ Па, у которых обнаружилось отслоение камеры и протектора от каркаса и расслоение самого каркаса. Установлено, что в местах отслоения камеры от каркаса образуются воздушные пузыри с внутренним избыточным давлением, что приводит к деформации профиля баллона, выбору рабочего зазора в районе вспучивания и исключает возможность выключения муфты.

Возрастающие требования, предъявляемые к муфтам современных судовых установок в отношении передачи больших вращающих моментов, работы в условиях повышенных частот и возможного регулирования упруго-демпфирующих характеристик, приводят к необходимости совершенствования существующих и созданию новых ШПМ с повышенными эксплуатационными параметрами.

Естественно, что при решении поставленных задач возникает необходимость более качественного проектирования таких муфт. Действующая до настоящего времени методика проектирования баллонов ШПМ [1] в значительной мере устарела и сдерживает их модернизацию.

Для решения вопроса о замене методики проектирования требуется провести анализ накоп-



ленных опытных данных по стендовым и эксплуатационным испытаниям муфт.

Необходимость дополнительного набора экспериментальных данных вызвана также и тем, что для изготовления баллонов применяются новые кордные материалы и новые эластомеры (резины), свойства которых требуют изучения.

Таким образом, перечисленные сведения позволяют пересматривать и корректировать расчетные формулы методики.

Крутильная податливость e^* , характеризующая упругие свойства при скручивании и синусоидальном нагружении ШПМ, определяется как отношение переменной составляющей угла скручивания A к амплитуде переменной составляющей вращающего момента F [1]:

$$e^* = \frac{A}{F}, \text{ 1/Нм.} \quad (1)$$

Удельное трение μ^* муфты представляет собой соотношение между энергией W_{mp} , поглощаемой муфтой, и потенциальной энергией при крутильных колебаниях:

$$\mu^* = \frac{W_{mp}}{\pi F A} = \frac{W_{mp}}{\pi F^2 e^*}. \quad (2)$$

Радиальная и осевая жесткости, по которым также оцениваются упругие свойства муфты, представляют собой силу (нагрузку), которую нужно приложить к муфте для смещения одной из полумуфт на единицу длины в радиальном или осевом направлении.

Упруго-демпфирующие характеристики баллона в свою очередь зависят от его конструкции, типа применяемых резин и корда каркаса, из которых он изготовлен, частоты и амплитуды вращающего момента, а также температуры поля, развивающегося в массиве баллона.

Расчетные формулы для определения указанных характеристик были получены главным образом эмпирическим путем [1, 2] и приводятся без выводов.

Крутильная податливость баллона e^* ШПМ, изготовленного из резины на основе натурального каучука (НК) и капронового каркаса, может быть представлена так:

$$e^* = \frac{0,019 \left[\frac{0,5 \left(\frac{h_3}{r_3^3} + \frac{h_4}{r_4^3} \right) + \frac{\rho}{r_0^3 z} (0,059 t_{\max} - 15,116) \right] A}{(1 + 0,561) \left(1 + \frac{2,4\lambda}{453,15} - t_{\max} \right)}, \frac{1}{\text{Нм}}; \quad (3)$$

$$A = \left\{ 1 + \frac{0,316 F}{r_0^5 z \frac{0,5}{\rho} \left(\frac{h_3}{r_3^3} + \frac{h_4}{r_4^3} \right) + \frac{\rho}{r_0^3 z}} \right\},$$

где ρ — радиус кривизны срединной поверхности каркаса в радиальном сечении, мм; h_3 — толщина внутреннего протектора, мм; h_4 — толщина наружного протектора, мм; r_3 — максимальный радиус вращения наружного протектора во включенном состоянии, мм; r_4 — минимальный радиус вращения внутреннего протектора во включенном состоянии, мм; r_0 — радиус точки профиля, соответствующий максимальной ширине оболочки (близко к $r_{\text{ср}}$ — среднему радиусу), мм; z — число слоев корда в каркасе; t_{\max} — максимальная температура в массиве баллона, К; λ — частота крутильных колебаний, Гц.

Если баллон изготовлен из резины на основе синтетического каучука (СК) и капронового каркаса, крутильная податливость баллона e^* ШПМ определяется выражением

$$e^* = \frac{0,019(0,0064 t_{\max} - 0,748) A}{(1 + 0,561) \left(1 + \frac{4,02\lambda_1}{t_{\max} - 100,15} \right)}, \frac{1}{\text{Нм}}; \quad (4)$$

$$A = \left[\frac{0,46}{\rho} \left(\frac{h_3}{r_3^3} + \frac{h_4}{r_4^3} \right) + \frac{1}{r_0^3 z} \left(\rho + \frac{0,316 F}{r_0^2} \right) \right].$$

Расчетная схема сечения баллона, соответствующая состоянию баллона, наполненного воздухом, показана на рисунке.

Ориентировочно можно полагать

$$\rho \cong \frac{1}{2}(r_2 - r_1). \quad (5)$$

Чем больше удельное трение μ баллона муфты, тем реже проявляются условия резонанса и тем благоприятнее становятся условия работы силовой установки. Однако завышение удельного коэффициента демпфирования при увеличенной податливости и больших знакопеременных эластических моментах может привести к недопустимому нагреву баллона. Поэтому рассчитывают оптимальные значения μ , которые удовлетворяют как необходимой податливости, так и отсутствию перегрева массива баллона температурой внутреннего трения.

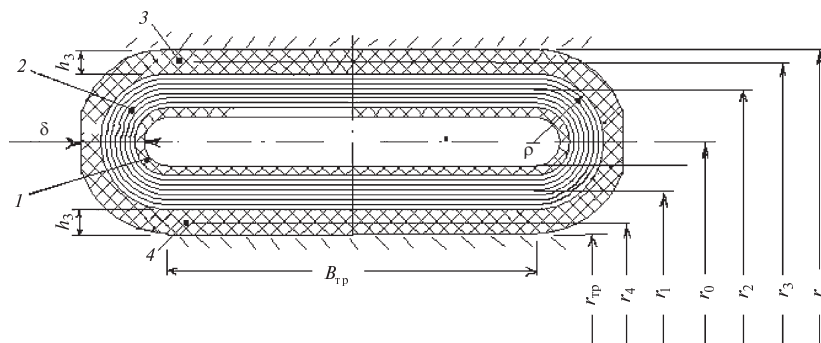


Рис.1. Расчетная схема сечения резино-кордного баллона ШПМ:
1 — камера; 2 — кордный каркас; 3 и 4 — наружный и внутренний протекторы соответственно; r_4 — средний наименьший радиус каркаса; r_2 — средний наибольший радиус каркаса

Удельное трение μ^* рассчитывают по формуле

$$\mu^* = \frac{\mu_0 \left[1 - 0,1 \cdot 10^{-5} (t_{\max} - 273,15)^3 \right]}{(1 + 0,04 r_0) \left(0,392 \frac{r_0^2 \rho}{F} + 0,3 \right)}, \quad (6)$$

где μ_0 — статическое удельное трение при $t_{\max} = 293,16$ К ($\mu_0 = 0,16$ — для резин на основе НК; $\mu_0 = 0,22$ — для резин на основе СК).

Из формулы (6) следует, что при определенной конструкции баллона проектант может регулировать коэффициент демпфирования μ в основном за счет изменения рецептуры материалов. Рецептура, составленная на основе СК, дает большие значения коэффициента демпфирования, чем при использовании НК.

Допускаемая величина амплитуды переменной составляющей вращающего момента может быть определена как

$$F_{\text{доп}} = 0,168 \sqrt{\frac{(t_{\text{доп}} - t_{\text{возд}}) M_6}{\mu^* e^* \lambda \delta \left(\frac{1}{\alpha_T} + 5,618 \cdot 10^{-2} \delta \right)}}, \quad \text{Нм}, \quad (7)$$

где t — допускаемая температура нагрева в массиве баллона в соответствии с ТЗ и ТУ, К; $t_{\text{возд}}$ — температура окружающего воздуха, К; M_6 — масса баллона, кг; δ — условная максимальная толщина стенки баллона, мм (см. рис. 1); α_T — коэффициент теплоотдачи от стенки баллона в воздух, Вт/м²·К.

Максимальная температура в массиве баллона может быть определена выражением

$$t_{\max} = \frac{35,506 \mu^* e F^2 \lambda \delta}{M_6} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{\alpha_T} + 5,618 \cdot 10^{-2} \delta \right) + t_{\text{возд}}, \quad \text{К}. \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи от баллона в воздух зависит от критерия Рейнольдса Re

$$\alpha = 3,300 \sqrt{\omega}, \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \text{если } Re = 2,4 \cdot 10^5; \quad (9)$$

$$\alpha = 0,208 \omega^{0,8} r_0^{0,6}, \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \text{если } Re = 2,4 \cdot 10^5; \quad (10)$$

$$\alpha = 2,012 \sqrt[4]{\sqrt{t_{\max} - 1,715 \frac{\mu^* e^* \lambda \delta^2}{M_6}} - t_{\text{возд}}},$$

$$\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \text{если } \omega = 0. \quad (11)$$

$$\text{где } Re = 5,423 \omega \cdot r_0^2. \quad (12)$$

Формулы (7) и (8) выведены для теплопередачи через плоскую пластину из резинотканевого (кордного) материала, имеющего постоянную толщину δ .

В методике [1] формул, аналогичных (7) и (8), нет. Предложенный в методике способ оценки теплового состояния баллона по суммарной величине теплообразования недостаточен. Эмпирическая формула для расчета перепада температур пригодна в основном для частных случаев.

При расчете баллона ШПМ следует рассматривать весь комплекс формул (3)–(12) и вести вычисления методом последовательных приближений, поскольку многие входящие в них величины взаимно зависимы.

Для наиболее полной оценки упруго-демпфирующих свойств ШПМ при имеющейся несоосности валов, соединяемых муфтой, определяют также радиальную и осевую жесткости, характеризующие величину образуемых при этом реактивных сил, действующих на систему валапровода с подшипниками, и допустимость той или иной расцентровки. Поскольку радиальная



жесткость баллона определяется в основном упругой силой деформации сдвига в элементах баллона, она может быть рассчитана по формуле

$$c_p = \frac{5}{r_0^2 e_y^*}, \text{ кН/м}, \quad (13)$$

где e_y^* — условная крутильная податливость баллона при $t = t_{\max}$, К; λ_y — условная частота крутильных колебаний:

$$\lambda_y = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ Гц}. \quad (14)$$

Однако радиальная жесткость не определяет пригодности к эксплуатации выбранной конструкции и параметров баллона муфты, тем более что зависимость c_p от крутильной податливости e ограничивает возможность ее регулирования.

Осевая жесткость баллона c_o может быть определена по формуле

$$c_o = 56r_0 p, \text{ кН/м}, \quad (15)$$

где p — рабочее давление сжатого воздуха в баллоне, Па.

Как показали испытания, величина осевой жесткости c_o в 6–8 раз меньше радиальной жесткости c_p .

При особых требованиях, обуславливающих определенные упруго-демпфирующие свойства

муфты в системе валопровода энергетической установки, могут быть подобраны такие конструктивные и технологические показатели, которые дадут оптимальные значения осевой жесткости при сохранении других необходимых параметров баллонов муфты.

В заключение следует сказать, что предложенные откорректированные расчетные формулы для определения крутильной податливости e^* , удельного трения μ^* , допускаемой величины амплитуды переменной составляющей вращающего момента $F_{\text{доп}}$, максимальной температуры в массиве баллона t_{\max} , а также радиальной жесткости c_p и осевой жесткости c_o позволят проектировщику учитывать повышенные требования заказчиков к эксплуатационным характеристикам баллонов ШПМ, серийно выпускаемых, а также новых типов и размеров.

2. Применение компьютерной программы по откорректированной методике расчета упруго-демпфирующих характеристик баллонов позволит оперативнее проводить модернизацию проектирования и изготовления шинно-пневматических муфт с улучшенными эксплуатационными параметрами в приводах судовых энергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кукаленко, Б.Д. Силовые элементы упругих муфт. Конструирование, производство, эксплуатация [Текст] / Б.Д. Кукаленко. — Л.: Химия, 1977. — 143 с.

2. Пономарев, С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении [Текст] / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев [и др.] — М.: Машгиз, 1958. — Том 2. — 974 с.

УДК 623.113

И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Цель работы — разработка принципов построения систем стабилизации подвижных объектов, в частности легковых автомобилей (на примере которых будет излагаться в дальнейшем содержание статьи) и др. автотранспортных

средств (АТС), на основе акселерометров и обоснование числа датчиков ускорений, необходимых для описания стабильного положения или вычисления параметров движения объекта на основании показаний акселерометров.

Задача стабилизации объектов, которые подвергаются динамическим воздействиям, весьма актуальна. Она связана с безопасностью, как, например, в случае потери управления АТС. Возможность выполнения функций каких-либо следящих или локационных систем также зависит от стабильности положения этих объектов в пространстве. Системами стабилизации и наведения, обеспечивающими траекторию и точность в достижении цели, оборудуются все самолеты и объекты ракетной техники.

Многие АТС имеют в списке своих опций такие средства активной безопасности, как антиблокировочная и противобуксовочная системы, динамическая система стабилизации, система ночного видения и автоматический круиз-контроль. Они помогают водителю в критических условиях движения АТС: при трогании на скользкой дороге, заносе, экстренном торможении и др. В итоге все они призваны уберечь водителя и пассажиров от ДТП.

Наиболее частая причина аварий — потеря контроля над управлением автомобилем, вызванная: превышением критической скорости в данных условиях движения; неправильной траекторией движения из-за состояния дорожного полотна; внезапными заносами.

Любая существующая система курсовой стабилизации объекта основана на отслеживании его поведения (применительно к АТС это — продольные и боковые ускорения) и команды водителя или оператора, например угла поворота рулевого колеса, усилия нажатия на педаль тормоза и движения педали акселератора. Система стабилизации распознает критическую ситуацию, причем во многих случаях — раньше водителя, и выбирает возможный путь вмешательства. Сохранение положения на дороге и заданной траектории движения АТС обеспечивается посредством управления тормозной системой и тягой двигателя.

На российском автомобильном рынке многие зарубежные автомобили комплектуются динамическими системами стабилизации ESP. Принципы этих систем одинаковые. Отличия заключаются лишь в нюансах алгоритма работы, наличии или отсутствии некоторых элементов.

В отечественной технической литературе в области автомобилестроения крайне мало отражена тема исследования систем ESP. К сожалению, можно предположить, что данной теме уделяется небольшое внимание со стороны российских

конструкторов автомобильной техники. В периодических печатных изданиях, таких, как журнал «За рулем», данный вопрос освещен более информативно. С основами системы динамической стабилизации, ее задачами, составом и функционированием можно также ознакомиться в руководствах по ремонту для механиков станций технического обслуживания. Но в указанных источниках отсутствует какая-либо информация о математическом аппарате существующих систем стабилизации. Из этих источников можно лишь узнать о составе системы и принципе ее работы.

Рассмотрим некоторые принципы построения и функционирования систем курсовой стабилизации [1]. На рис. 1 представлена структура управления такой системы.

Она включает главный контроллер ESP и контроллер скольжения.

С помощью главного контроллера вводятся номинальные величины для контроллера скольжения в виде параметра номинальной величины проскальзывания. Следящий блок определяет переменную контролируемого состояния (курсовой угол автомобиля β), а также оценивает сигналы от датчика положения 3 рулевого колеса, датчика давления 2 в тормозной системе и от органов управления 7 работой двигателя. Помимо скорости движения автомобиля в вычисления также входят необходимые характеристики коэффициентов сцепления между шинами и дорожным покрытием. Эти параметры оцениваются на основе сигналов, получаемых от датчиков частоты вращения колес 1, датчика поперечного ускорения 5, датчика угловой скорости вокруг вертикальной оси 4 и датчика давления в тормозной системе 2. Затем вычисляется тормозной момент, необходимый для приближенного приведения параметров действительного состояния к параметрам требуемого состояния.

Анализируя описанную выше принципиальную схему динамической системы стабилизации, можно отметить следующие ее недостатки:

- большое число измерительных и контролируемых устройств;

- определение параметров требуемого состояния с помощью таких величин, как боковой увод шины и коэффициент сцепления шин с дорожным покрытием, значения которых не могут быть точно известны из-за большого многообразия условий движения.

Существующие электронные системы курсовой устойчивости ESP (контроль динамики ав-

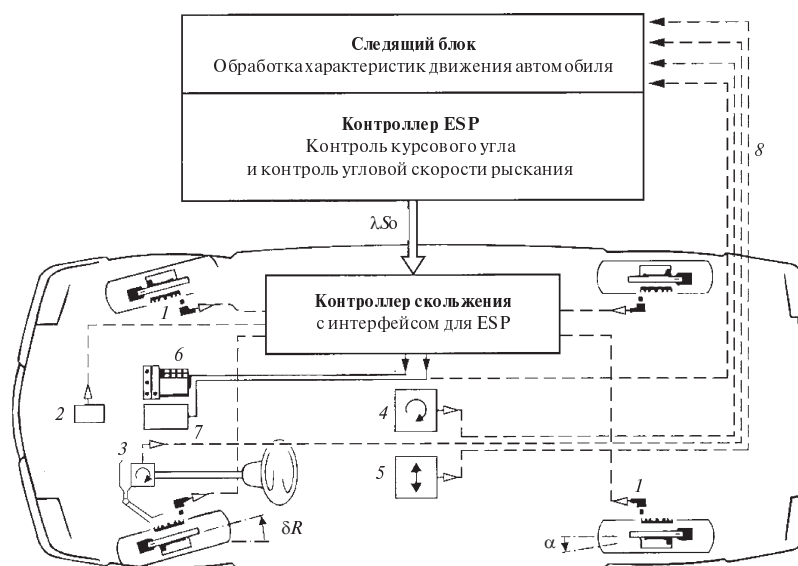


Рис. 1. Электронная программа устойчивости ESP:

1 — датчик частоты вращения колес; 2 — датчик давления в тормозной системе; 3 — датчик положения рулевого колеса; 4 — датчик угловой скорости относительно вертикальной оси; 5 — датчик поперечного ускорения; 6 — модулятор давления; 7 — органы управления работой двигателя; 8 — сигналы датчиков для EPS; α — угол скольжения шины; δ_R — угол поворота переднего колеса; λ_{So} — номинальное проскальзывание шины

томобиля) представляют собой системы с обратной связью, которые позволяют сохранить курсовую устойчивость во время движения автомобиля. Каждая система объединена с тормозной системой и силовой передачей. Система ESP предупреждает «опережение» или «запаздывание» поворота автомобиля во время его управления. Преимущества системы ABS (антиблокировочная система) и TCS (противобуксовочная система) развиваются системой ESP путем повышения активной безопасности движения во время управления автомобилем по следующим направлениям:

обеспечение активной помощи водителю в критических ситуациях;

повышение курсовой устойчивости АТС в предельно сложных условиях дорожного движения для всех режимов эксплуатации, таких, как полное или частичное торможение, движение накатом, разгон, торможение двигателем, изменение нагрузок;

повышение устойчивости движения во время экстремальных маневров управления (аварийная ситуация);

улучшение управляемости при предельно сложных условиях дорожного движения.

Если же абстрагироваться от системы стабилизации АТС, то можно провести аналогию с системами стабилизации в авиации и ракетной технике. Теория подобных систем достаточно подробно изучена, но в качестве датчиков обратной связи используются гироскопы (по углу и угловой скорости) [2].

Математические основы системы стабилизации

В соответствии с целью научной работы были поставлены следующие задачи для исследования:

проверить принципиальную возможность построения системы стабилизации на основе акселерометров;

предложить математическую модель системы стабилизации исходя из условия минимизации числа акселерометров, выявить преимущества и недостатки;

разработать стенд (макет) для проверки математической модели.

Решение поставленных задач проводилось на основе информации в зарубежной и отечественной научно-технической литературе, а также существующих автомобильных аналогов и научных исследований в области стабилизации движения в авиации и ракетной технике.

Метод определения угловых скоростей вращения тела по известным значениям линейных ускорений в определенных точках

Метод позволяет определить угловую скорость по значениям ускорений, определяемым с помощью акселерометров, не прибегая к операции интегрирования. Определение угловых скоростей вращения тела вокруг некоторых координатных осей не зависит от каких-либо массогабаритных параметров объекта.

Рассмотрим систему координат $OXYZ$, связанную с телом (рис. 2). Выберем начало координат в геометрическом центре объекта. В таком случае будем считать, что продольная ось объекта совпадает с координатной осью абсцисс OX , поперечная ось — с координатной осью ординат OY , а вертикальная ось — с осью OZ . Расположение акселерометров в данной системе координат показаны на том же рисунке.

Будем рассматривать произвольное движение объекта и характеризовать его либо тремя угловыми скоростями вращения вокруг осей выбранной системы координат ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$), либо тремя линейными ускорениями вдоль координатных осей (a_x, a_y, a_z).

Линейные ускорения тела a_x, a_y, a_z запишем через линейные ускорения, получаемые от акселерометров:

$$a_x = \frac{a_{x1} - a_{x2}}{2}, \quad (1)$$

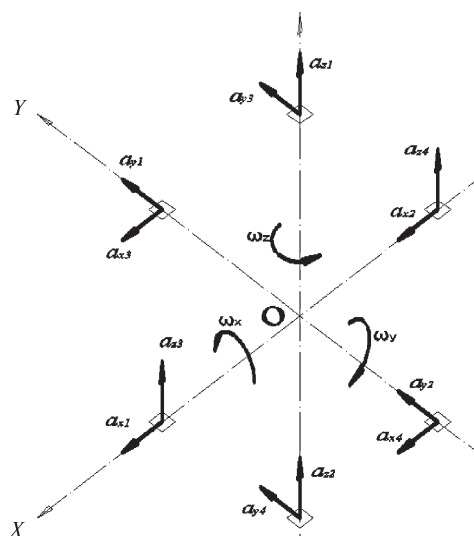


Рис. 2. Схема расположения акселерометров и действующие на них ускорения

$$a_y = \frac{a_{y1} - a_{y2}}{2}, \quad (2)$$

$$a_z = \frac{a_{z1} - a_{z2}}{2}. \quad (3)$$

Здесь a_{x1} и a_{x2} — линейные ускорения, значения которых определяются акселерометрами, установленными вдоль продольной оси объекта; a_{y1} и a_{y2} — ускорения тела, определяемые с помощью акселерометров, установленных вдоль поперечной оси объекта; a_{z1} и a_{z2} — ускорения, определяемые с помощью акселерометров, установленных вдоль вертикальной оси тела.

С другой стороны, каждое линейное ускорение имеет соответствующую составляющую от вращения объекта вокруг координатных осей:

$$a_x = a_{xy} + a_{xz}.$$

Здесь a_{xy} — центростремительное ускорение при вращении тела вокруг оси OY со скоростью ω_y , а a_{xz} — центростремительное ускорение при вращении вокруг оси OZ со скоростью ω_z . Из механики известны выражения

$$a_{xy} = \omega_y^2 R_x;$$

$$a_{xz} = \omega_z^2 R_x.$$

Таким образом, придем к общей формуле

$$a_x = a_{xy} + a_{xz} = \omega_y^2 R_x + \omega_z^2 R_x.$$

Аналогичные выражения запишем и для других линейных ускорений:

$$a_y = a_{yx} + a_{yz} = \omega_x^2 R_y + \omega_z^2 R_y;$$

$$a_z = a_{zx} + a_{zy} = \omega_x^2 R_z + \omega_y^2 R_z,$$

где R_x, R_y, R_z — расстояния от центра системы координат до установленных акселерометров вдоль соответствующих осей. Данные расстояния могут быть различны для разных осей. Их значения преимущественно выбираются в зависимости от конструктивных особенностей объекта. Для простоты дальнейших математических преобразований можно, не уменьшая общности, принять $R_x = R_y = R_z = 1$ м.

Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a_x = \omega_y^2 + \omega_z^2; \\ a_y = \omega_x^2 + \omega_z^2; \\ a_z = \omega_x^2 + \omega_y^2. \end{cases}$$

Система содержит как угловые скорости, так и линейные ускорения АТС. Таким образом, можно выразить одни величины через другие. Например, вычтем из первого уравнения системы второе и, прибавляя третье, получим

$$a_x - a_y + a_z = \omega_y^2 + \omega_z^2 - \omega_x^2 - \omega_z^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2;$$

$$a_x - a_y + a_z = 2\omega_y^2.$$

Отсюда найдем формулу для определения угловой скорости вращения автомобиля вокруг оси ОУ через линейные ускорения:

$$\omega_y = \pm \sqrt{\frac{a_x - a_y + a_z}{2}}. \quad (4)$$

Аналогично получим формулы и для двух других угловых скоростей:

$$\omega_x = \pm \sqrt{\frac{-a_x + a_y + a_z}{2}}; \quad (5)$$

$$\omega_z = \pm \sqrt{\frac{a_x + a_y - a_z}{2}}. \quad (6)$$

Подставим записанные ранее выражения (1) в (4), (2) в (5) и (3) в (6) и найдем формулы, связывающие угловые скорости ω_x , ω_y и ω_z с линейными ускорениями, которые могут быть определены с помощью акселерометров:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \sqrt{\frac{-a_x + a_y + a_z}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{-a_{x1} + a_{x2} + a_{y1} - a_{y2} + a_{z1} - a_{z2}}{2}}, \\ \omega_y &= \sqrt{\frac{a_x - a_y + a_z}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{a_{x1} - a_{x2} - a_{y1} + a_{y2} + a_{z1} - a_{z2}}{2}}, \\ \omega_z &= \sqrt{\frac{a_x + a_y - a_z}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{a_{x1} - a_{x2} + a_{y1} - a_{y2} - a_{z1} + a_{z2}}{2}}. \end{aligned}$$

Данные выражения дают численное значение искомых величин, но не содержат информации об их знаке, т. е. не дают представления о направлении угловой скорости вращения тела. Но отсутствие информации о знаке угловой скорости нельзя считать недостатком метода, по-

скольку положительное направление координатных осей выбирают из удобства расчетов, и это не влияет на результаты.

С целью оценки степени достоверности разработанной математической модели системы стабилизации были проведены испытания установки, измерительными элементами которой служат акселерометры. В качестве объекта, на котором исследовалась экспериментальная установка, был выбран ходовой макет малогабаритного АТС, созданный в Лаборатории электродвижения при кафедре колесных и гусеничных машин СПбГПУ. По результатам испытаний было принято решение создать стенд (состоит из пяти акселерометров, устройств передачи данных с акселерометров на обрабатывающий сигналы блок и собственно контролирующего блока), который бы являлся прототипом системы стабилизации. Экспериментальную проверку этого оборудования предложено выполнить на объекте, который подвергается возмущающему воздействию, например на автомобиле.

На данном этапе решались задачи обеспечения нормального функционирования как отдельных элементов экспериментального оборудования, так и всей системы в целом, а также передача и обработка экспериментальных данных и сравнение их с истинными, что позволит судить о достоверности теоретических выкладок, описанных в интегральном методе. В качестве ординара выступают данные, полученные с помощью датчика угловой скорости. В результате калибровки необходимо сделать вывод о точности измерения датчиков ускорений.

В качестве упрощенного прообраза системы стабилизации выполнен и используется простейший первичный преобразователь, имеющий два акселерометра по двум осям и датчик угловой скорости (ДУС). Первичный преобразователь изготовлен на отдельной макетной плате, имеет габариты 60×17×26 мм и может быть установлен на любой подвижный объект для проведения испытаний. Первичные преобразователи позволяют калибровать сигналы акселерометров с помощью подстроечных резисторов. Помимо этого все сигналы имеют фильтры высоких частот.

ДУС служит для введения коррекции измерения угловой скорости, и его сигнал может считаться эквивалентным теоретической угловой скорости ω . На первой стадии экспериментальной проверки используются акселерометры фир-

мы *Analog Devices ADXL105*, настроенные на измерение в диапазоне $\pm 1 g$. В качестве ДУС выбран датчик фирмы *MURATA ENV-05 F* с диапазоном измерения угловой скорости $\pm 60^\circ/\text{сек}$.

Для проведения тестовых и ходовых испытаний спроектирован, разработан и собран макет, позволяющий исследовать, снимать показания с датчиков и управлять макетом по беспроводному каналу передачи данных. Данный макет имитирует движения автомобиля при перемещении по горизонтальной поверхности.

Ходовой макет на базе двухколесного малогабаритного АТС состоит из металлической рамы — сварной конструкции, на которой размещены все входящие в состав изделия устройства и блоки. Передвижение макета осуществляется при помощи двух мотор-колес с двигателем постоянного тока и редуктором; с фронтальной и тыльной сторон имеются опорные роляльные ролики, поддерживающие рамную конструкцию. Питание осуществляется от аккумуляторной батареи с напряжением 24 В. Характеристики выбранного двигателя и редуктора позволяют достигать ускорений до $\pm 1g$ при разгоне и торможении. Максимальная скорость передвижения около 10 км/ч. Все управление, позиционирование, сбор и передача данных организовано на базе центрального управляющего процессорного модуля X-board 861 фирмы *Contron* (Германия).

Технические характеристики тележки для испытаний:

Максимальная скорость — 5,4 км/ч
 Масса тележки — 50 кг
 Напряжение бортовой сети — 24 В
 Редукция мотор-колес — 9
 Колея — 450 мм
 Радиус качения колеса — 350 мм

В предварительных испытаниях, оценивающих возможность использования акселерометров для построения систем стабилизации тела, роль данного макета свелась к проверке работоспособности и нормального функционирования всех систем и блоков. В ходе такой проверки было реализовано дистанционное управление макетом от джойстика, сбор и обработка сигналов от датчиков и передача их на компьютер оператора по беспроводному каналу. При исследованиях, проведенных на изготовленной макетной плате с датчиками ускорения и угловой скорости, были получены приведенные ниже экспериментальные данные.

Установка датчиков на подвижном макете представлена на рис. 3.

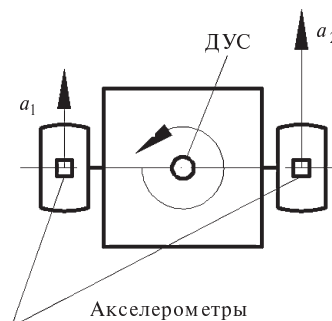


Рис. 3. Установка акселерометров на малогабаритном АТС (вид в плане)

Точность измерения акселерометров определена техническими условиями — $\pm 0,02 g$. На стадии нормирования измерительного канала каждого акселерометра удалось получить индивидуальной калибровкой точность около $\pm 0,005 g$. Однако в структуре измерительной системы не предусмотрены компенсации температуры, дрейфа нуля и других долговременных источников увеличения погрешности.

На рис. 4 представлены результаты эксперимента.

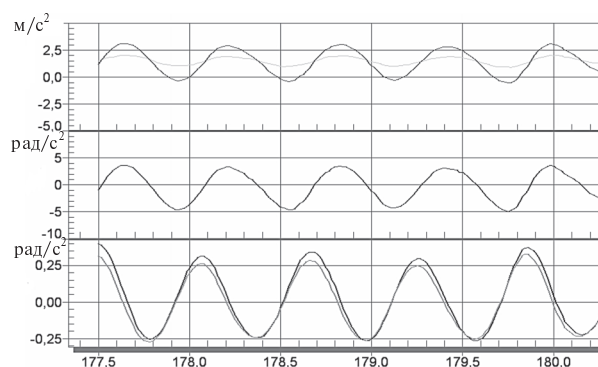


Рис. 4. Результаты эксперимента с учетом компенсации долговременных источников увеличения погрешностей

В качестве выводов по первому эксперименту следует отметить, что созданный на базе малогабаритного АТС экспериментальный модуль позволил провести калибровку датчиков ускорений с помощью датчика угловой скорости, а также получить временные зависимости линейных ускорений, угловых ускорения и скорости.

В результате индивидуальной калибровки определена погрешность акселерометров ($\pm 0,005\text{ g}$).

Описание стенда для определения угловых скоростей при помощи акселерометров

Для проведения испытаний с использованием автомобиля был разработан макет, представляющий собой металлоконструкцию с несколькими площадками, на которых установлены акселерометры (рис. 5).

Основание стенда — три взаимно перпендикулярные балки равной длины, соединенные жестко. Каждая из балок имеет несколько отверстий по всей длине. Для придания необходимой жесткости имеются ребра. Жесткость макета также обеспечивается за счет дополнительных уголков, которые крепятся к вертикальной балке. Уголки с одного конца балки используются для крепления к основным горизонтальным балкам, а уголки с другого конца балки предназначены для установки площадки под датчик ускорения. Подобные площадки устанавливаются на каждом конце основных горизонтальных балок. На вертикальной балке также имеются площадки для монтажа акселерометров. Площадка для акселерометров имеет отверстия для установки на нее единого блока с акселерометром внутри.

Схема установки макета на АТС показана на рис. 6.

Научная новизна и апробация работы

Основной задачей научных исследований была проверка принципиальной возможности построения системы стабилизации объекта, подвергающегося внешнему возмущающему воздействию, которая основными элементами имела бы акселерометры. В ходе работы показана принципиальная возможность существования таких систем стабилизации. А также предложена математическая модель, которая может быть положена в основу систем стабилизации АТС и других подвижных объектов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийских конференциях в СПбГПУ [3–6], НГТУ [7–10], МГТУ им. Н.Э. Баумана [11, 12], СЗЗГТУ [13] и МГТУ «МАМИ» (Открытая научно-техническая конференция 22–25 апреля 2008 года).

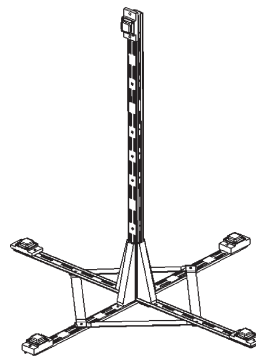


Рис. 5. Общий вид макета для испытаний системы акселерометров

В 2010 году работа удостоена медали и диплома Минобрнауки РФ на конкурсе студенческих и аспирантских работ.

Разработана математическая модель системы стабилизации тела на основе акселерометров. Предложен вариант системы стабилизации, отличающийся по составу от реальных систем, с сохранением основных принципов алгоритма работы. Для этого варианта предложен математический аппарат, с помощью которого от линейных ускорений, измеряемых акселерометрами, осуществляется переход к угловым скоростям.

Концепция системы стабилизации может быть основана на шести акселерометрах. Использование акселерометров вместо датчиков угловых скоростей или гироскопов позволит значительно снизить стоимость системы стабилизации АТС.

Результаты исследования имеют перспективы внедрения в области транспортного машиностроения.

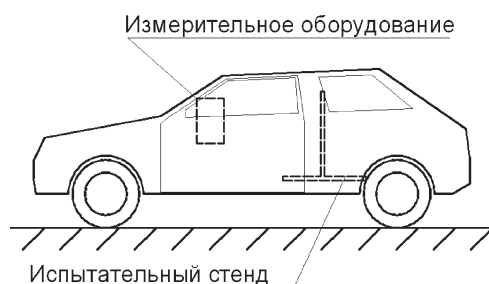


Рис. 6. Установка испытательного стенда на автомобиле

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BOSCH. Автомобильный справочник [Текст] / Пер. с англ.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004.— 992 с.: ил.
2. Рабинович, Б.И. Прикладные задачи устойчивости стабилизированных объектов [Текст] / Б.И. Рабинович.— М.: Машиностроение, 1978.— 232 с.
3. Мазуренко, И.А. Математические основы системы динамической стабилизации автомобиля: метод сравнения реального и идеального поведения [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Матер. Междунар. научн. конф. студентов и аспирантов «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ».— СПбГПУ, 30 ноября—05 декабря 2009 г.— СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009.— Ч. III, ЭнМФ. С. 60—62.
4. Мазуренко И.А., Семёнов А.Г., Цветков В.В. Математические основы системы динамической стабилизации автомобиля: интегральный метод // Материалы Международной научн. конференции студентов и аспирантов «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ».— СПбГПУ, 30 ноября— 05 декабря 2009 г., СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009.— Ч. III. ЭнМФ. С. 63—64.
5. Мазуренко, И.А. // Математические основы системы динамической стабилизации автомобиля: метод определения линейных скоростей через угловые ускорения [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Матер. Междунар. научн. конф. студентов и аспирантов «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ».— СПбГПУ, 30 ноября—05 декабря 2009 г., СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009.— Ч. III, ЭнМФ. С. 64—66.
6. Мазуренко, И.А. // Экспериментальное определение угловой скорости объекта при помощи акселерометра [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Матер. Междунар. научн. конф. студентов и аспирантов «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ».— СПбГПУ, 30 ноября—05 декабря 2009 г., СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009.— Ч. III, ЭнМФ. С. 66—68.
7. Мазуренко, И.А. Метод сравнения реального и идеального поведения автомобиля в математических основах системы его динамической стабилизации [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Тезисы докл. Всеросс. молод. науч.-технич. конф. «Авто-НН-2009».— г. Нижний Новгород, НГТУ, 19—20 ноября 2009 г.— Н.Новгород: Изд-во НГТУ.— 2009.— С. 33—35.
8. Мазуренко, И.А. Интегральный метод в математических основах системы динамической стабилизации автомобиля [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Тезисы докл. Всеросс. молод. науч.-технич. конф. «Авто-НН-2009».— г. Нижний Новгород, НГТУ, 19—20 ноября 2009 г.— Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 2009.— С. 35—36.
9. Мазуренко, И.А. Метод определения угловых скоростей автомобиля через линейные ускорения в математических основах системы динамической стабилизации [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Тезисы докл. Всеросс. молод. науч.-технич. конф. «Авто-НН-2009».— г. Нижний Новгород, НГТУ, 19—20 ноября 2009 г.— Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 2009.— С. 37—38.
10. Мазуренко, И.А. Экспериментальное определение угловой скорости имитатора автомобиля при помощи акселерометра [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Тезисы докладов Всеросс. молодежной науч.-технич. конференции «Авто-НН-2009». г. Нижний Новгород, НГТУ, 19—20 ноября 2009 г.— Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 2009.— С. 38—40.
11. Мазуренко, И.А. Математические модели поведения системы динамической стабилизации автомобиля [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. «Проектирование колесных машин», посвящ. 100-летию начала подготовки инж. по автомоб. спец. в МГТУ им. Н.Э. Баумана» 25—26 нояб. 2009 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.— С. 212—216.
12. Мазуренко, И.А. Эксперименты по определению угловой скорости имитатора автомобиля и оценке достоверности математической модели системы динамической стабилизации автомобиля [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. «Проектирование колесных машин», посвящ. 100-летию начала подготовки инж. по автомоб. спец. в МГТУ, 25—26 ноя. 2009 г. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.— С. 216—218.
13. Мазуренко, И.А. Разработка концепции динамической системы стабилизации автомобиля [Текст] / И.А. Мазуренко, А.Г. Семёнов, А.П. Петкова // Сб. трудов III Всеросс. научно-техн. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами», СЗЗГТУ. Ноябрь 2008 г.— СПб.: Изд-во СЗЗГТУ.— С. 28—30.

УДК 669.295

А.М. Пупышев, И.О. Попов, Ю.А. Митрофанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И ТИТАНА ПРИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

На основе известной пиро-гидрометаллургической схемы переработки хибинских титаномагнетитовых концентратов (ТМК), представленной в работе [1], авторами создана усовершенствованная — менее затратная — технология комплексной переработки ТМК. Предлагаемая технология включает: низкотемпературное (при $T < 1150$ °С) восстановление титаномагнетитовых концентратов [2]; окислительное сернокислотное выщелачивание железа из восстановленного огарка с получением в нерастворимом осадке порошков оксидного титанового концентрата [3]; безотходную переработку растворов сульфата железа с получением порошков чистого оксидного железа и оборотной серной кислоты для выщелачивания железа из восстановленных огарков ТМК¹.

Эффективность предлагаемой пиро-гидрометаллургической технологии в первую очередь определяется селективностью разделения железной и титановой частей на стадии окислительного сернокислотного выщелачивания восстановленного ТМК (ВТМК) с получением в остатке выщелачивания оксидного титанового концентрата (или — после его проковки — искусственного рутилового концентрата) с высоким содержанием диоксида титана. В рамках создания технологии проведены комплексные исследования процесса выщелачивания ВТМК,

которые включают: а) определение макрокинетических закономерностей разделения железа и титана при окислительном сернокислотном выщелачивании восстановленного при низких температурах огарка титаномагнетитового концентрата (ВТМК); б) изучение вещественного состава нерастворимого остатка — оксидного титанового концентрата, полученного в результате выщелачивания.

Для достижения высоких результатов селективного разделения железной и титановой частей на стадии сернокислотного выщелачивания, а также для обеспечения высокой массовой скорости выщелачивания железа, как показано в работе [4], на стадии восстановительного обжига необходимо получить огарок титаномагнетитового концентрата с определенной физико-химической структурой и минимальным содержанием низших оксидов титана (Ti_3O_5 , Ti_2O_3 , TiO), которые по сравнению с TiO_2 обладают большей растворимостью в водных сернокислых средах.

Восстановление ТМК велось в специально созданных условиях при $T < 1150$ °С с использованием смеси восстановителей, состоящей из литейного кокса ($C \approx 96$ %), фракции 0,315–1,0 мм и жидкого углеводородного топлива (солярка), пиролиз которого был источником H_2 и CO . Таким образом, в восстановлении оксидов железа совместно участвуют C , H_2 и CO .

Разработанный авторами низкотемпературный ($T < 1150$ °С) метод восстановления сложных оксидных железо-титановых концентратов с использованием газа с высоким восстановительным потенциалом (H_2 , CO) позволяет обеспечить

¹ И.О. Попов, А.М. Пупышев. Получение искусственного рутилового концентрата из титаномагнетитовых концентратов — техногенных отходов ОАО «АПАТИТ» // Материалы Германо-Российского сырьевого форума. СПбГТУ. 16.06.2011.

глубокое восстановление железа титанатов, ограничить восстановление TiO_2 до низших оксидов и растворение ильменита в полтораокси титана с образованием, как установлено авторами работ [5, 6], твердых растворов, препятствующих глубокому восстановлению железа.

Исследования структурно-фазового состава восстановленного в созданных условиях огарка ТМК показали, что в он включает следующие основные фазы: металлизированную на основе железа (~65 %), оксидную титановую (~18 %), оксидную железо-титановую (~15 %), аносовит (~2 %) и прочие.

Установлено, что 90–93 % от общей массы железа, содержащегося в исходном ТМК, после низкотемпературного восстановления в огарке находится в виде обособленной металлической фазы, состоящей из активного для выщелачивания металлического железа с низким содержанием примесей Ti (~0,87 %) и Mn (~0,64 %).

Оксидная железо-титановая фаза по стехиометрическому составу близка к дититанату железа $[FeO \cdot 2TiO_2; FeO \cdot xTiO_2]$, где $x = 1,27–4,39$. Ее состав в виде оксидов входит: 8,4–26,9 % Fe (~14,01 %) и 13,51–46,8 % Ti (~31,05 %). В качестве примесей содержится, в %, ~3,38 — Si, ~1,22 — Al, ~3,34 — Mn, ~2,28 — Ca и ~0,59 — Mg (в виде оксидов).

Оксидная титановая фаза $[Ti_{0,54–1,19}O_{2,21–2,87}]$ содержит в виде оксидов от 26,2 до 57,7 % Ti (~45,86 %). В качестве примесей в фазе обнаружено, в %, 0,5–19,7 — Fe (~6,01 %); ~0,78 — Si, ~1,05 — Al, ~3,76 Mn и ~0,79 — Mg.

Как следствие частичного восстановления диоксида титана, в отдельных частях исследуемых образцов обнаружена оксидная фаза, которая отнесена к аносовиту $[Ti_3O_5; Ti_{1,23–1,52}O_{4,93–5,11}]$. Содержание титана в фазе составляет ~38,54 %. В качестве примесей в аносовите присутствует ~1,01 % Al, ~1,92 % Si, ~6,33 % Ca и ~1,70 Mn.

Полученный в результате продукт имеет следующий химический состав, % мас.:

Fe _{мет}	67,70
Fe ₂ O ₃	0,86
FeO	1,01
TiO ₂	19,26
Al ₂ O ₃	1,43
SiO ₂	3,11
P ₂ O ₅	0,43
CaO	2,05

MnO	0,04
Mn _{мет}	1,69
V ₂ O ₅	0,37
MgO	0,81
Na ₂ O	0,75
K ₂ O	0,50

Этот продукт обладает степенью металлизации железа более 90 %, хорошо разделенными фазами (металлическая — железная и оксидная — титановая), высокоразвитой поверхностью и содержит активное для выщелачивания металлическое железо.

В ходе исследований макрокинетических характеристик окислительного сернокислотного выщелачивания определялась массовая скорость выщелачивания железа; изучалось влияние на ход процесса температуры раствора, скорости перемешивания пульпы, размера зерен (фракционного состава) ВТМК, степени металлизации ВТМК, содержания пульпы в растворе (Т:Ж), начальной концентрации серной кислоты, расхода кислородо-воздушной смеси на аэрацию; исследовался вещественный состав нерастворимого остатка — оксидного титанового концентрата.

Выщелачивание проводилось в периодическом режиме в реакторе с рабочим объемом 1 дм³, с разовой загрузкой ВТМК (в предварительно нагретый водный раствор серной кислоты). С помощью внешнего обогрева (через стенку реактора) в нем поддерживалась заданная температура. По ходу процесса отбирались пробы раствора для анализа его состава, определялась продолжительность и массовая скорость выщелачивания железа.

Основные результаты исследования макрокинетических характеристик выщелачивания ВТМК для ряда режимных параметров процесса — начальной концентрации H_2SO_4 100 г/л; Т:Ж ≈ 1:10, $T = 25–80$ °С, фракций огарков восстановительного обжига измельченных до крупности 350 и 150 мкм — приведены на рис. 1–4.

Удельная массовая скорость выщелачивания, отнесенная к единице V раствора:

$$\frac{V_{Fe}}{V} = F(a_{Fe}, C_{H_2SO_4}^{нач}, C_{ВТМК\ в\ р-е}, C_{Fe\ в\ ВТМК}, C_{O_2}^{газ}, n_{пер}, T, d_{ч}, t),$$

где a_{Fe} — кажущаяся активность железа как функция от удельной поверхности металлизиро-

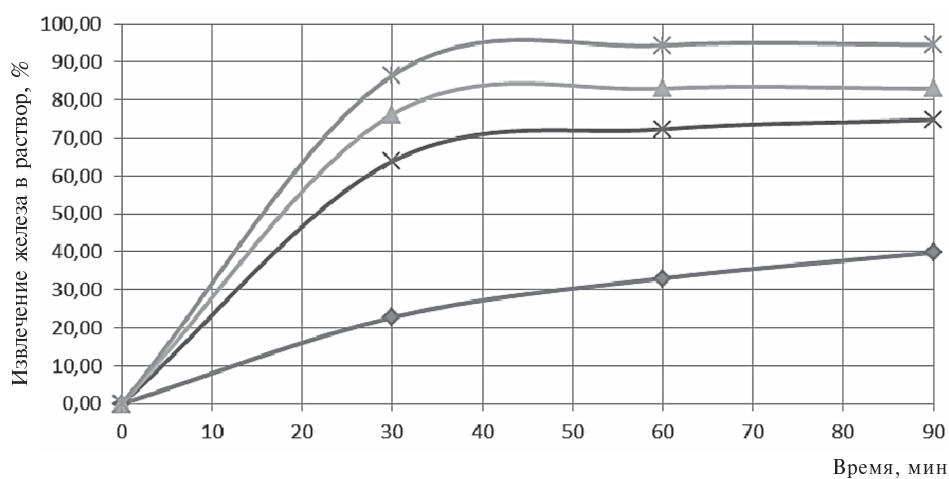


Рис. 1. Влияние температуры на степень выщелачивания железа восстановленного хибинского титаномагнетитового концентрата ($\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 100\text{ г/л}$; Т:Ж = 1:10; крупность — 150 мкм; $n_{\text{пер}}$ — 100 об./мин.)

—♦— $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; —×— $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; —▲— $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$; —*— $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$;

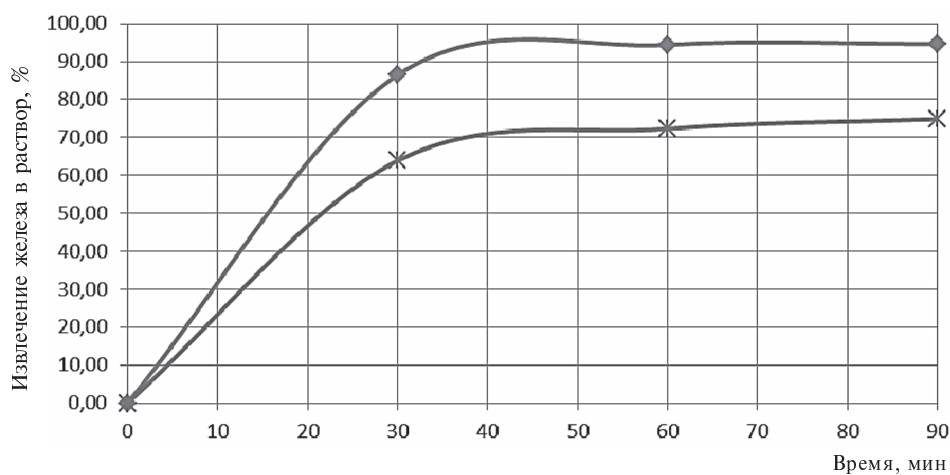


Рис. 2. Влияние интенсивности перемешивания на макрокинетику степень выщелачивания железа восстановленного Хибинского титаномагнетитового концентрата ($\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 100\text{ г/л}$; $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; Т:Ж = 1:10; крупность — 150 мкм)

—♦— перемешивание; —*— без перемешивания

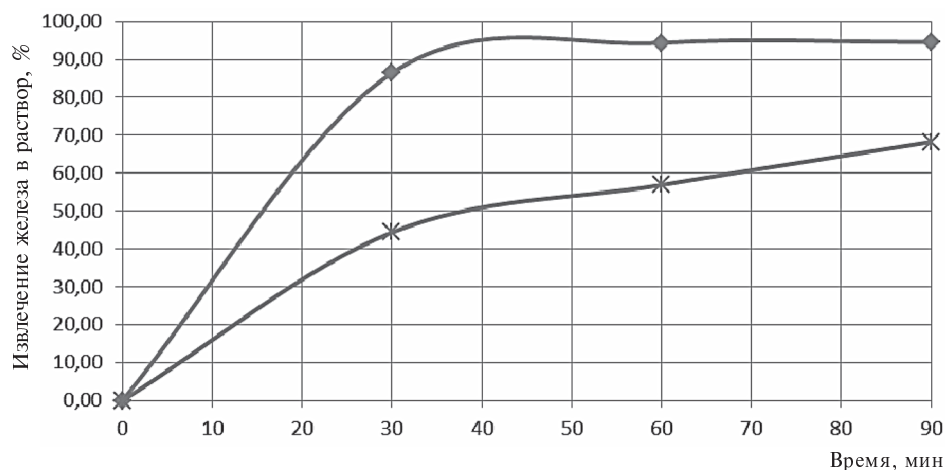


Рис. 3. Влияние размеров зерна на степень выщелачивания железа восстановленного Хибинского титаномагнетитового концентрата

($C_{H_2SO_4} = 100$ г/л, $T = 60$ °С, Т:Ж = 1:10, $n_{пер} = 100$ об./мин.)

—♦— крупность 150 мкм; —*— крупность 350 мкм

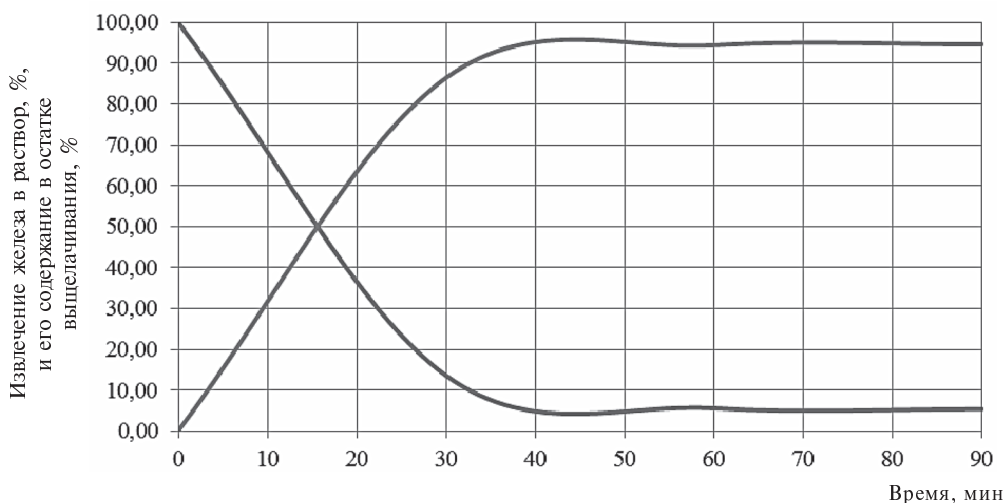


Рис. 4. Массовая скорость выщелачивания

восстановленного Хибинского титаномагнетитового концентрата

($CH_2SO_4 = 100$ г/л, $T = 60$ °С, Т:Ж = 1:10, $n_{пер} = 100$ об./мин.)

— извлечение железа в фильтрат; — содержание железа в остатке выщелачивания



ванной фазы железа, состава фазы, структуры, расположения относительно других фаз ВТМК; $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{нач}}$ — начальная концентрация серной кислоты, г/л; $C_{\text{ВТМК в р-ре}}$ — содержание ВТМК в растворе (Т.Ж); $C_{\text{Fe в ВТМК}}$ — содержание железа в ВТМК, % масс.; $C_{\text{O}_2}^{\text{газ}}$ — удельный расход кислородо-воздушной смеси, м³/мин.; $n_{\text{пер}}$ — интенсивность перемешивания, об/мин.; T — температура, °С; $d_{\text{ч}}$ — размер частиц концентрата; t — время, мин.

Процесс выщелачивания интенсивно протекает при достаточно низких температурах 50–80 °С (рис. 1). Основная масса железа при этом переходит в раствор в течение первых 30 мин., после 60 мин. процесс затухает и практически полностью прекращается к 90 мин.

На макрокинетику выщелачивания ВТМК существенное влияние оказало применение перемешивания. При окислительном сернокислотном выщелачивании ВТМК крупностью помола 150 мкм с начальной концентрацией $\text{CH}_2\text{SO}_4 = 100$ г/л при $T = 60^\circ\text{C}$ степень извлечения железа в раствор при перемешивании $n = 100$ об/мин за 90 мин. достигла ~95 %, в то время как при его отсутствии — ~75 % (рис. 2).

Массовая скорость выщелачивания ВТМК с разной степенью помола представлена на рис. 3. Степень перевода железа в раствор за 90 мин. из ВТМК, измельченного до фракций 150 и 350 мкм, при прочих равных условиях соответственно составила 94,65 и 68,26 %.

При исследовании макрокинетических характеристик выщелачивания восстановленных огарков определены оптимальные режимы. На рис. 4 приведены кинетические характеристики поведения железа ВТМК со степенью металлизации 93 %, измельченного до фракции 150 мкм. Выщелачивание интенсивно протекает при температуре 60 °С (при начальной концентрации H_2SO_4 100 г/л), за первые 30 минут в раствор переходит примерно 80–90 % железа, за 60 минут степень перевода железа в раствор достигает ~95 %. Через 90 минут выщелачивание железа прекращается.

После проковки нерастворимого остатка для удаления гидратной влаги и углерода из хибинского ТМК получен оксидный титановый концентрат с содержанием TiO_2 71–76 %. Пробы полученного оксидного титанового концентрата из ТМК изучались методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), а также стандартных методик и программ. Параллельно определялись полные составы проб химическим анализом.

Микроструктуры образцов прокаленного остатка сернокислотного выщелачивания восстановленного огарка хибинского ТМК представлены на рис. 5 (перекрестия указывают на места проведения микроанализа), а основные результаты рентгеноспектрального микроанализа приведены в таблице. Установлено, что нерастворимый остаток состоит из следующих основных фаз: оксидной титановой, оксидной железо-титановой, силикатной и силикатной титановой.

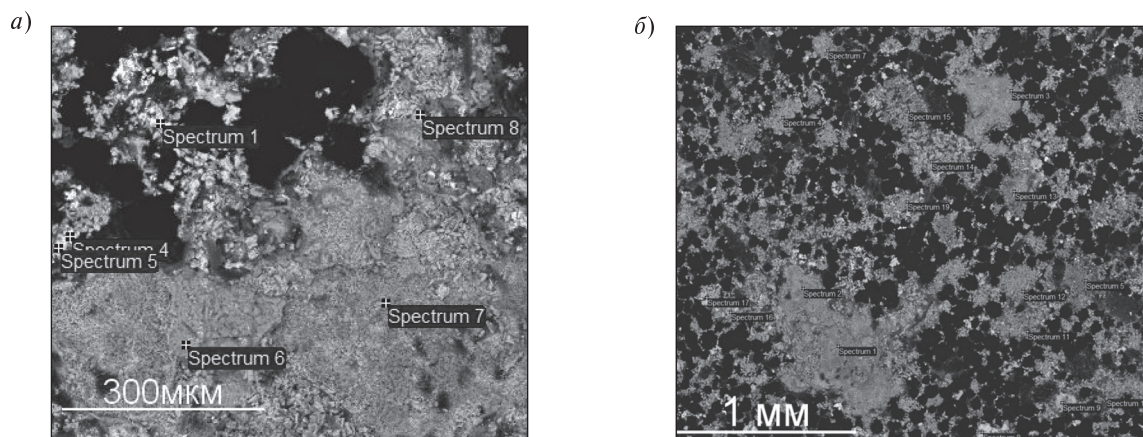


Рис. 5. Микроструктуры образцов искусственного рутилового концентрата, полученного из хибинского ТМК
(оксидная титановая — Spectrum 6, 7; оксидная железо-титановая — Spectrum 1, 8; силикаты — Spectrum 4, 5)

**Фазовое распределение некоторых элементов
в нерастворимом остатке от выщелачивания ВТМК**

Фаза	%	FeO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO
Оксидная титановая	75	1,75	92,96	0,53	0,72	1,77	1,12	0,63	0,52
Оксидная железо-титановая	12	24,78	59,05	0,51	2,02	3,62	7,60	1,70	0,71
Силикатная	13	52,74	2,38	—	0,39	41,13	2,61	0,57	0,18
Силикатная титановая	13	4,68	57,94	—	2,00	24,11	8,01	2,95	—

При выщелачивании ВТМК металлизированная фаза на основе железа практически полностью перешла в раствор в виде сульфата железа. Основу нерастворимого остатка от выщелачивания ВТМК составляет оксидная титановая фаза, по стехиометрическому составу близкая к диоксиду титана. Содержание диоксида титана в фазе составляет 87,4–98,5 (~92,96 %). При этом содержание примесей, %: 0,00–3,20 — FeO (~1,75 %); 0,00–2,45 — MnO (~0,52 %); 0,00–2,00 — MgO (~0,53 %); 0,00–1,67 % Al₂O₃ (~0,72 %); 0–6,00 — SiO₂ (~1,77 %); 0,00–3,61 — SO₃ (~1,12 %) и 0,00–1,72 — CaO (~0,63 %).

Небольшая доля железа, оставшаяся невыщелоченной, в основном находится в оксидной железо-титановой фазе и в меньшей степени содержится в силикатной фазе.

Оксидная железо-титановая фаза по стехиометрическому составу близка к дититанату железа [FeO·2TiO₂; FeO·xTiO₂, где x = 1,31–3,87]. Эта фаза выявляется только в виде небольших включений в фазе рутила. В состав фазы входит 48,28–74,41 % TiO₂ (~59,05 %) и 17,31–33,45 % FeO (~24,78 %). В качестве примесей содержится, %: 0,00–3,21 — Al₂O₃ (~2,02 %); 0,00–4,42 — SiO₂ (~3,62 %); 3,26–12,61 — SO₃ (~7,60 %); 0,00–2,52 — CaO (~1,70 %); менее 0,63 — MgO и менее 0,55 — MnO.

Силикатная фаза выявлена в основном в виде оболочки, окаймляющей фазу рутила, но также встречается в виде отдельных зерен. В состав силикатной фазы входит 1,27–4,49 — TiO₂ (~2,38 %); 45,40–64,41 — FeO (~52,74 %); 31,14–48,81 — SiO₂ (~41,13 %); ~0,39 — Al₂O₃; ~1,12 — SO₃; ~0,57 — CaO и 0,18 — MnO. Силикаты титана состоят из, %: 28,52–76,27 — TiO₂ (~57,94 %); 0,00–11,36 — FeO (~4,68 %); 10,44–46,93 — SiO₂ (~24,11 %); ~2,00 — Al₂O₃; ~8,01 — SO₃ и ~2,95 — CaO.

Основные результаты работы

Исследованы макрокинетические закономерности окислительного сернокислотного процесса выщелачивания железа из восстановленного при низких температурах (<1150 °С) хибинского ТМК.

Установлено, что выщелачивание интенсивно протекает при достаточно низких температурах (60–65 °С) при естественной аэрации без интенсивного перемешивания и позволяет достигнуть селективного разделения металлической (железной) и оксидной (титановой) частей. С повышением температуры степень перевода железа в раствор из ВТМК увеличивается: так за 90 минут при 25 °С она составила 39,82 %, при 50 °С — 74,81 %, при 65 °С — 83,05 % и при 80 °С — 94,65 %. При перемешивании (n = 100 об/мин) и использовании принудительной аэрации степень извлечения железа за 90 минут увеличивается от 75 до 95 %. Степень перевода железа в раствор за 90 минут из ВТМК, измельченного до фракций 150 и 350 мкм, при прочих равных условиях соответственно составила 94,65 и 68,26 %.

При Т:Ж = 1:5 массовая скорость выщелачивания железа возрастает вдвое, и это увеличивает удельную скорость выщелачивания железа в единице объема реактора, что в свою очередь позволяет снизить капвложения.

Получен остаток выщелачивания с высоким содержанием диоксида титана — искусственный рутиловый концентрат с содержанием TiO₂ 71–76 % в зависимости от степени металлизации ВТМК от 88 до 93 %.

Исследован вещественный состав искусственного рутилового концентрата. Установлено наличие в нем следующего состава основных фаз и их распределения, %:

основа — оксидная титановая (~92,96 — TiO₂; ~1,75 — FeO; ~0,52 — MnO; ~0,53 — MgO;



$\sim 0,72$ — Al_2O_3 ; $\sim 1,77$ — SiO_2 ; $\sim 1,12$ — SO_3 и $\sim 0,63$ — CaO);

в виде небольших включений в оксидной титановой фазе — оксидная железо-титановая ($\sim 59,05$ — TiO_2 ; $\sim 24,78$ — FeO ; $\sim 2,02$ — Al_2O_3 ; $\sim 3,62$ — SiO_2 ; $\sim 7,60$ — SO_3 ; $\sim 1,70$ — CaO ; $< 0,63$ — MgO и $< 0,55$ — MnO);

в виде оболочки, окаймляющей оксидную титановую фазу — силикатная ($\sim 2,38$ — TiO_2 ; $\sim 52,74$ — FeO ; $\sim 41,13$ — SiO_2 ; $\sim 0,39$ — Al_2O_3 ; $\sim 1,12$ — SO_3 ; $\sim 0,57$ — CaO и $0,18$ — MnO) и силикатная титановая ($\sim 57,94$ — TiO_2 ; $\sim 4,68$ — FeO ; $\sim 24,11$ — SiO_2 ; $\sim 2,00$ — Al_2O_3 ; $\sim 8,01$ — SO_3 и $\sim 2,95$ — CaO).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, И.О. Технология доводки и гидрометаллургической переработки хибинского высокотитанистого титаномагнетита [Текст] / И.О. Попов, А.М. Макаров, А.И. Ракаев [и др.] // Обогащение руд. — 2004. — № 1. — С. 23–27.

2. Пат. 2379356 РФ: МПК C21B13/08 (2006.01). Способ восстановления ильменитового концентрата: [Текст] / И.О. Попов, А.М. Пупышев, Л.С. Самойленко; заявители и патентообладатели Попов И.О., Пупышев А.М., Самойленко Л.С. — №2008107158/02. — Заявл. 26.02.2008. Оpubл. 20.01.2010. — Бюл. 2010. № 2.

3. Пат. 2410449 РФ: МПК C22B4/00 (2006.01), C22C33/00 (2006.01). Способ переработки титаномагнетитового концентрата: [Текст] / И.О. Попов, С.М. Устинов, Б.Н. Бутырский, А.М. Пупышев; заявители и патентообладатели Попов И.О.,

Устинов С.М., Бутырский Б.Н. — №2009144430/02; заявл. 30.11.2009; опубл. 27.01.2011. — Бюл. 2011. № 3.

4. Пупышев, А.М. Исследование основных процессов комплексной технологии получения искусственного рутилового концентрата из ильменитового и титаномагнетитового концентратов [Текст] / А.М. Пупышев, И.О. Попов // XXXIX междунар. научно-практ. конф. «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — С. 172–175.

5. Гармата, В.А. Титан [Текст] / В.А. Гармата, А.Н. Петрунько, Н.В. Галицкий [и др.]. — М.: Металлургия, 1983. — 559с.

6. Резниченко, В.А. Электротермия титановых руд [Текст] / В.А. Резниченко. — М.: Наука, 1969. — 208 с.

УДК 669.295: 621

Е.К. Иванов, М.А. Скотникова, Н.А. Крылов

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА

Сегодня применение высокоскоростной лезвийной обработки металлических заготовок, особенно труднообрабатываемых, является одним из основных направлений повышения производительности труда и качества получаемых поверхностей. При этом возникает проблема, связанная со снижением износостойкости инструмента, его преждевременным разрушением и усилением интенсивности этого процесса при увеличении скорости резания сверх определенного уровня. Существует гипотеза о наличии здесь связи с изменением степени локализации

пластической деформации в металле заготовки в результате диссипативных процессов, происходящих в зоне стружкообразования.

Физико-механические свойства исследованных материалов

Исследовались стружки после токарной обработки заготовок из сплавов на основе алюминия АМц, титана ВТ23 и стали ХВГ в диапазоне скоростей резания 2–275 м/мин, а для АМц — до 6000 м/мин. Обработка проводилась резцом ВК8 без смазки со скоростью подачи $S = 0,26$ мм/об

и глубиной резания $t = 3$ мм. Геометрические параметры реза составляли углы $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = 12^\circ$.

Можно полагать, что в процессе стружкообразования резец, будучи макро-концентратором, формирует впереди себя волну пластической деформации и разрушения. Известно [1], что размер зоны деформирования в устье трещины зависит от размаха коэффициента интенсивности напряжений (ΔK), определяющего поле упругих напряжений в окрестностях распространяющейся трещины и прочности обрабатываемого материала согласно формуле

$$\Delta L = \Delta K^2 / 12\pi\sigma_{0,2}^2. \quad (1)$$

Таким образом, размер зоны деформирования и период локализации пластической деформации при лезвийной обработке материала будут возрастать с увеличением размаха коэффициента интенсивности напряжений (ΔK). Процесс стружкообразования будет облегчен вблизи сильных концентраторов напряжений в материалах, где релаксационные процессы заторможены в условиях высоких скоростей или низких температур деформирования.

Количественной оценкой предельного сопротивления металла распространению трещины служит вязкость разрушения (K_{IC}). Для исследованных сплавов средние значения уровня прочности (σ_B , $\sigma_{0,2}$), пластичности δ , вязкости

разрушения и расчетного размера зоны пластической деформации ΔL при комнатной температуре представлены в табл. 1. Видно, что в сплаве АМц размер зоны ΔL велик, что согласуется с известной легкостью лезвийной обработки сплавов на основе алюминия.

В процессе обработки металла резанием основной путь диссипации энергии — превращение механической энергии в тепловую, причем тепловыделение возрастает с увеличением степени и скорости деформации. Это тепло распределяется между стружкой, деталью, резцом и окружающей средой. При малых скоростях резания основное тепловыделение происходит в детали, следовательно, в этом случае стружкообразование происходит при относительно низких температурах. Увеличение скорости резания вызывает перераспределение тепла между указанными составляющими и приводит к его локализации, прежде всего в стружке и в зоне ее контакта с резцом. В этом случае стружкообразование происходит при относительно высоких температурах. Возрастание шероховатости поверхности вызывает тепловые вспышки в зоне кратковременного контакта. В табл. 2 представлены сравнительные данные теплофизических свойств металлов, лежащих в основе исследованных сплавов.

Как видим, от алюминия к титану имеет место значительное увеличение температуры плав-

Таблица 1

Химический состав и механические свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Химический состав, вес. %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	ΔL , мкм
АМц	AL- 1,5Mn-0,7Fe-0,6Si-0,2Cu-0,1Zn	110	60	33	20	2949
ХВГ	Fe- 1C-1,5W-1Cr-1Mn-0,3Si	725	375	25	43	349
ВТ-23	Ti- 5Al-5V-2Mo-1Cr-0,5Fe	995	925	14	144	643

Таблица 2

Теплофизические свойства исследованных сплавов

Материал	$T_{пл}$, °C	E, МПа	λ , Вт/(м·K)	α , 10^{-6} 1/град	ρ , 10^{-8} , ом·м	α/λ
AL	660	700	0,53	23,9	2,5	45,1
Fe	1535	2100	0,18	12,1	8,6	67,2
Ti	1668	108500	0,045	8,2	42	182,2

ления $T_{пл}$, модуля упругости E , удельного электросопротивления ρ , снижение теплопроводности (λ), коэффициента линейного расширения α и увеличение отношения α/λ .

Температурные зависимости исследованных материалов представлены на рис. 1. Видно, что по сравнению с ХВГ в сплаве ВТ23 интенсивное разупрочнение происходит уже при температуре деформации 500–600 °С. Сплав на основе алюминия АМц обладает относительно более высокой термостойкостью.

Морфология формирующейся стружки

При резании металлических заготовок в зоне контактного взаимодействия обрабатываемой детали и резца возникает сложный многофакторный процесс взаимодействия деформации, трения, адгезии и разрушения, на соотношение между которыми влияют физико-механические и химические свойства контактирующих материалов, геометрия резания, смазка, скорость и температура деформирования.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости, демонстрирующие нарастание линейного износа инструмента с увеличением скорости лезвийной обработки исследованных сплавов. При обработке стали ХВГ серийная кривая износа имеет явную точку перегиба при скорости резания порядка 165 м/мин, после чего интенсивность износа инструмента значительно возрастает. При обработке сплавов АМц и ВТ23 износ инструмента нарастает равномерно, без перегиба, соответственно с малой и большой интенсивностью износа. На рис. 3, а–в изображены обрабатываемая заготовка, резец и формирующаяся стружка с отмеченными местами локализации пластической деформации ($\epsilon_{лок}$).

При обработке сплава титана ВТ-23 ($V_{рез} = 2–120$ м/мин) локализация деформации оставляла след по всей ширине стружки с прирезцово-вой стороны, при этом формировалась стружка локального (адиабатического) сдвига (рис. 3, в), а износ резца резко возрастал с увеличением скорости обработки резанием (рис. 2, линия 3).

При обработке алюминиевого сплава АМц ($V_{рез} = 8–230$ м/мин) следов локализации пластической деформации не наблюдали, при этом формировалась сливная стружка (рис. 3, а), а износ резца был невелик в широком диапазоне скоростей резания (рис. 2, линия 1).

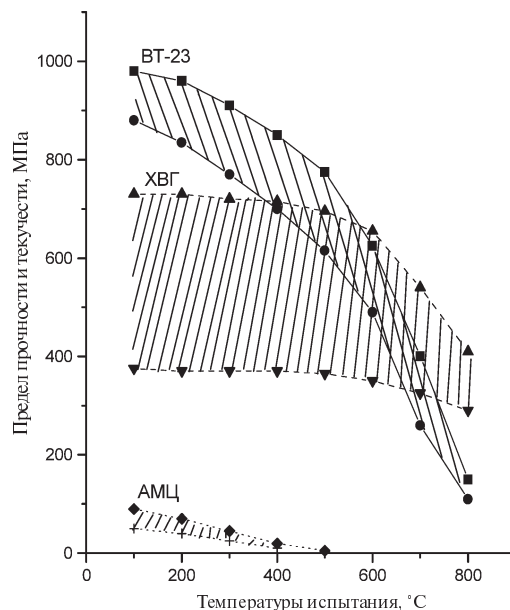


Рис. 1. Температурные зависимости сплавов АМц, ХВГ, ВТ-23:

—■—▲—◆— предел прочности, МПа
—●—▼— предел текучести, МПа

При обработке сплава на основе железа ХВГ ($V_{рез} = 8,6–275$ м/мин) образовывались три вида стружки — смятия (суставчатая), элементная и локального сдвига, которые сменяли друг друга по мере увеличения скорости лезвийной обработки. Локализацию деформации наблюдали только

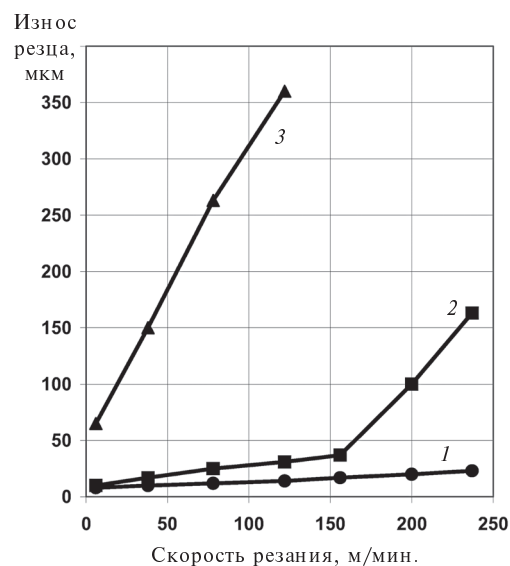


Рис. 2. Износ резца при лезвийной обработке исследованных сплавов АМц (1), ХВГ (2), ВТ-23 (3) с разными скоростями

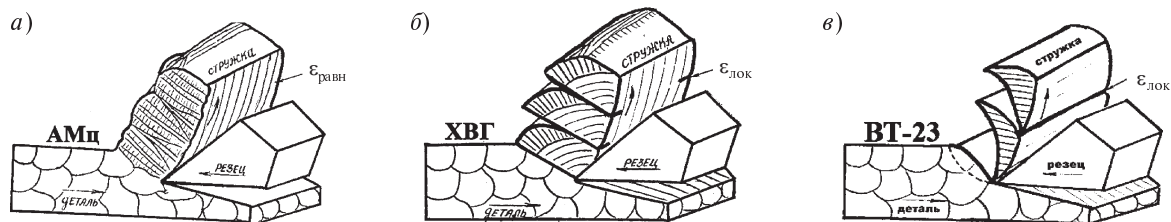


Рис. 3. Схемы формирования стружки: а — «сливной» (равномерная пластическая деформация), б — «элементной» (начало локализации деформации), в — стружки «адиабатического» сдвига (сильная локализация деформации)

на краях элементной стружки при увеличении скорости обработки резанием сверх уровня 165 м/мин (рис. 3, б). При этом происходило резкое возрастание износа инструмента (рис. 2, линия 2).

На рис. 4, а–г представлены фотографии стружек из сплава ХВГ в поперечном (рис. 4, а, б, в) и долевом (рис. 4, г, д, е) направлениях, образующихся при скоростях 34 (рис. 4, а, г), 55 (рис. 4, б, д) и 135 (рис. 4, в, е) м/мин.

При скорости резания 8,6 м/мин сегменты образующейся стружки имели нерегулярную, неправильную форму. По мере увеличения скорости резания начиная с 17 м/мин в продольном сечении на прирезцовой стороне стружки появлялись регулярные полосы локализации пластической деформации (рис. 4, г). Начиная с 55 м/мин полосы локализации со стороны резца маскировались под действием повышающихся сил трения стружки о переднюю грань резца (рис. 4, д). При этом в поперечном сечении сегменты образующейся стружки приобретали все более регулярную, правильную форму (рис. 4, в). На сплаве ХВГ были выполнены количественные оценки геометриче-

ских параметров сегментов стружки в зависимости от скорости резания (рис. 5).

Таким образом, можно полагать, что с увеличением скорости лезвийной обработки металлических заготовок проблема снижения износоустойчивости инструмента и его преждевременного разрушения связана с периодической локализацией пластической деформации и разрушением в металле заготовки при стружкообразовании.

Для установления природы этих явлений необходимо выполнить комплексные исследования структурных, фазовых превращений и перераспределения легирующих элементов, установить их связь с механическими свойствами металла обрабатываемой заготовки. На основе этих исследований можно будет предложить пути повышения износостойкости инструмента за счет выбора оптимального режима резания.

Структура металла стружки

Структуру образующейся стружки на макро- и микроуровнях исследовали с помощью оптической металлографии, просвечивающей

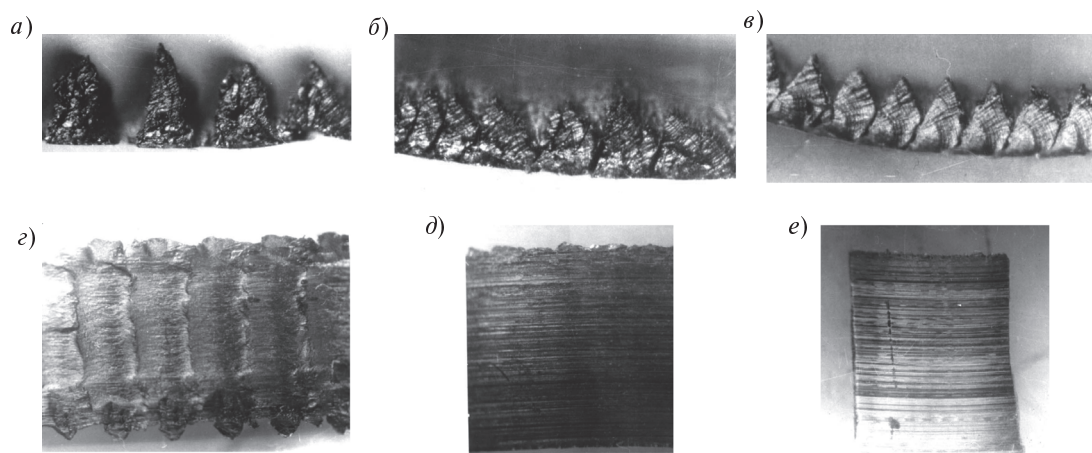


Рис. 4. Стружка из стали ХВГ после лезвийной обработки со скоростями 34 (а, г), 55 (б, д) и 135 м/мин (в, е); а, б, в — поперечное, г, д, е — продольное сечение



и растровой электронной микроскопии с привлечением микродифракционного анализа и ПЭВМ. Образцы (фольги) для просвечивающей электронной микроскопии вырезали трубчатым электродом диаметром 3 мм в продольном сечении стружки.

Структура металла стружки из сплава АМц.

Как показали результаты ранее проведенных исследований [2, 3], в сплаве на основе алюминия АМц с низкой релаксационной способностью металла структура в исходном состоянии представляла собой равноосные зерна с марганцосодержащими включениями $MnAl_6$ (рис. 6, а). После лезвийной обработки формировалась функциональная ячеистая дислокационная структура с высокой энергией дефектов упаковки, рис. 6, б. Каждая ячейка движется как самостоятельный структурный элемент, испытывая трансляционные и поворотные моды деформации, и способна осуществлять конвективное течение.

Как показала растровая электронная микроскопия, свободная поверхность стружки из сплава АМц формировалась по механизму усталостного разрушения. На рис. 6, в представлен сегмент стружки, полученной при скорости резания 230 м/мин и надломленной руками при комнатной температуре. Видно, что участок долома стружки имеет вязкий чашечный характер, в то время как поверхность стружки сформировалась по усталостному механизму разрушения, о чем свидетельствуют колонии регулярных усталостных бороздок, ориентированных перпендикулярно направлению распространения трещины. На поверхности стружки видны следы равномерной пластической деформации без ее макроскопической локализации и образования отдельных сегментов. По известной классификации этот тип стружки можно отнести к *сливной*. Локализация пластической деформации в металле заготовки из сплава АМц наступала только при очень большой скорости резания — 6000 м/мин (рис. 6, з).

Таким образом, стружкообразование в легкообрабатываемых сплавах на основе алюминия, обладающих относительно низкой прочностью и высокой теплопроводностью (интенсивным теплооттоком), развивается при относительно низких контактных температурах и высоких контактных напряжениях, при которых релаксационные процессы заторможены, что обеспечивает равномерность пластической деформации

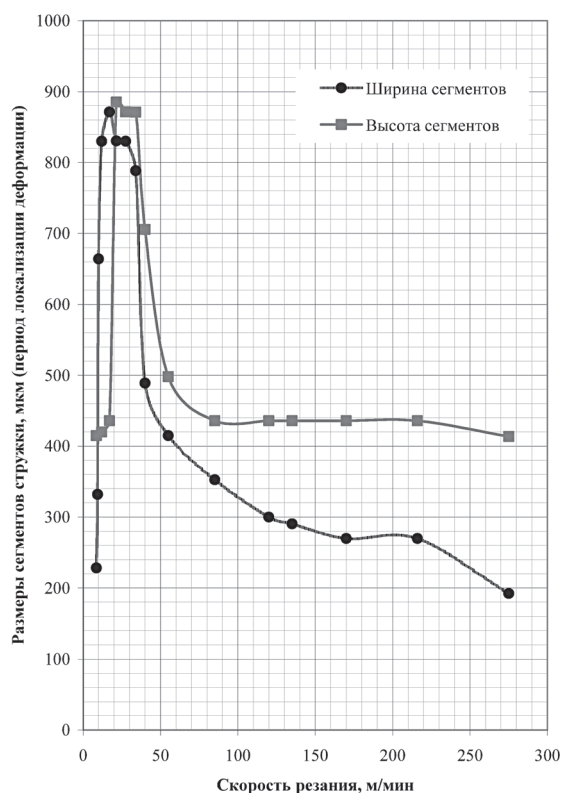


Рис. 5. Зависимость изменения геометрических параметров сегментов стружки из сплава ХВГ от скорости резания

ции металла заготовки и низкий износ материала инструмента.

Структура металла стружки из сплава ВТ23.

В сплаве на основе титана ВТ-23 структура в исходном состоянии представляла собой колонии параллельных пластин α - и β -фаз (рис. 7, а).

При лезвийной обработке резанием начиная со скорости 2 м/мин имела место неоднородная пластическая деформация, ее сильная локализация в узких периодически повторяющихся объемах металла по механизму формирования сверхмелких дислокационных ячеистых структур (рис. 7, б). Как показали результаты растровой электронной микроскопии, свободная поверхность стружки из сплава ВТ-23 формируется по сложному механизму с признаками разрушения в условиях сверхпластичности (рис. 7 в, г).

Таким образом, стружкообразование в труднообрабатываемых сплавах на основе титана, обладающих относительно высокой прочностью и низкой теплопроводностью, развивается при относительно высоких контактных температурах и низких контактных напряжениях, при

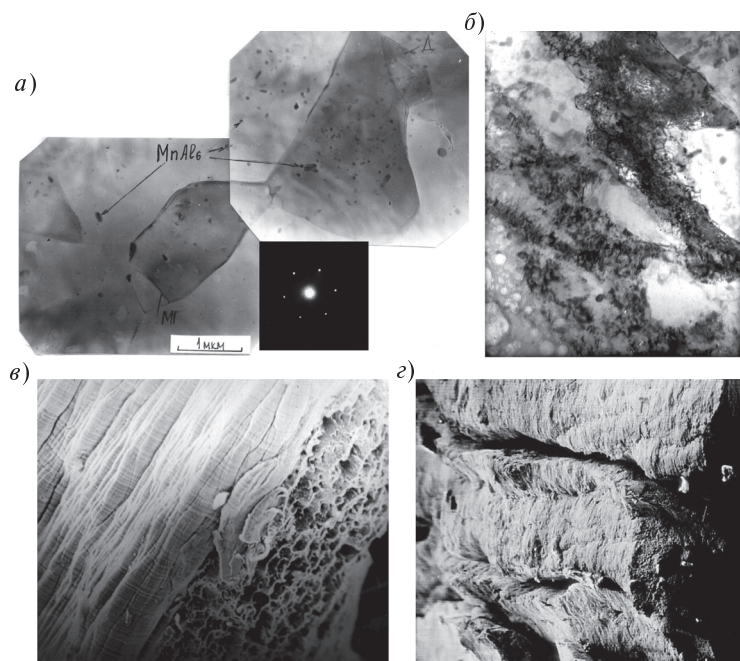


Рис. 6. Характерные фотографии материала стружек из сплава АМц до (а) и после лезвийной обработки со скоростями 230 (б, в) и 6000 (г) м/мин

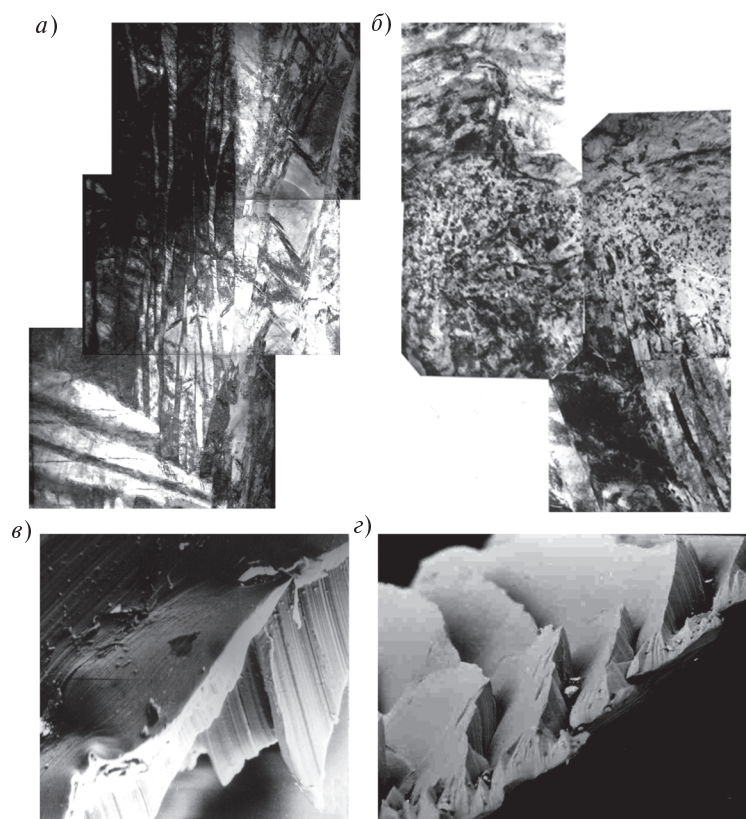


Рис. 7. Характерные фотографии материала стружек из сплава ВТ-23 до (а) и после (б, в, г) лезвийной обработки со скоростью 60 м/мин



которых наблюдается значительная релаксационная способность материала (структурная и концентрационная), что обеспечивает диссипативное видоизменение структуры и химического состава в узких периодических слоях материала. Это приводит к так называемой фрикционной приспособляемости (периоду приработки) материала. В контактной зоне формируется износостойкая вторичная структура, существенно снижающая износ металла обрабатываемой детали, но повышающая износ режущей кромки инструмента.

Структура металла стружки из сплава ХВГ.

Сплав на основе железа ХВГ занимает промежуточное положение по физико-механическим свойствам. В исходном состоянии эта высоколегированная сталь была термообработана на легированный зернистый цементит с частицами сульфидов железа Fe_3S_4 , Fe_9S_8 (рис. 8, а).

Стружкообразование в стали ХВГ при невысоких, от 8,6 до 50 м/мин, скоростях резания сопровождалось смятием металла обрабатываемой детали в результате сжатия, увеличением площади фактического контакта. В то же время в при-

резцовой зоне возникали фрикционные силы трения, которые росли одновременно с ростом площади фактического контакта. При этом большое количество тепла локализовалось в контактной зоне между резцом и деталью (в результате превращения механической энергии в тепловую). Повышение температуры в контактной зоне увеличивало объем металла, вовлекаемого в деформацию, высота и ширина отдельного сегмента стружки увеличивались от 210 до 450–850 мкм (рис. 5) и по известной классификации формировалась *суставчатая стружка*. Следует отметить, что после лезвийной обработки внутри сегментов деформация развивалась однородно за счет формирования ячеистых дислокационных структур (рис. 8, б).

Повышение скорости резания от 60 до 250 м/мин приводило к снижению коэффициента трения [4]. Здесь фрикционное тепловыделение уменьшилось. Понижение температуры в контактной зоне уменьшило и объем металла, вовлекаемого в деформацию, формировалась *элементарная стружка*, которая имела практически одинаковую высоту сегментов (440 мкм)

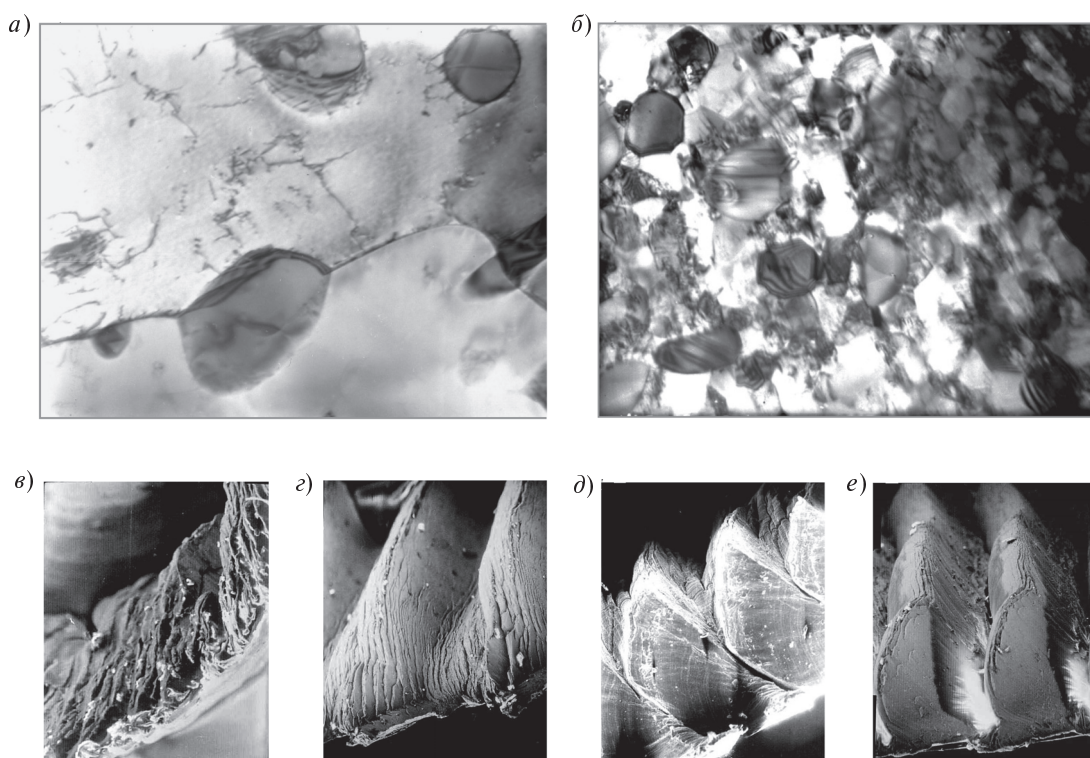


Рис. 8. Характерные фотографии материала стружек из сплава ХВГ до (а) и после (б, в, г, д, е) лезвийной обработки со скоростью 8,6 (в), 21 (б, г), 135 (д), 275 (е) м/мин

и непрерывно уменьшающуюся от 370 до 270 мкм ширину. При этом деформация в объеме металла развивалась равномерно по механизму формирования ячеистых дислокационных структур [2, 3].

При скорости резания 275 м/мин высота сегментов уменьшилась до 400 мкм, а их ширина — до 190 мкм. При этом на краях элементной стружки с прирезцовой стороны наблюдали следы неоднородной пластической деформации. В узких периодических объемах металла происходила локализация тепла и пластической деформации с одновременным массопереносом — сдвигом и выносом сегментов стружки *локального сдвига* (рис. 8, е).

В структуре металла стружки из стали ХВГ, обработанной при скорости резания 275 м/мин, локализация пластической деформации выражалась в формировании узких полос (зон) с более мелкой ячеистой структурой. На рис. 9 представлены: схематическое изображение исследованной фольги после лезвийной обработки со ско-

ростью 275 м/мин (рис. 9, б); номера зон (1–6), в которых была произведена съемка; распределение по этим зонам средних размеров дислокационных ячеек (рис. 9, в). Номера зон 1 и 6 соответствовали местам сочленения сегментов стружки, а номера 2, 3, 4, 5 — местам внутри сегментов. Как видно из графика (рис. 9, в), вдоль границ сегментов свободного края стружки, в узких полосах локализации тепла и пластической деформации (зона 6), формировались более мелкие дислокационные ячейки (0,15 мкм) по сравнению с зонами 4 и 5 (0,3 мкм). Вдоль границ сегментов прирезцовой края стружки разница в размерах дислокационных ячеек в зонах 1 и 2–3 была меньше.

Таким образом, в процессе обработки стали ХВГ резанием с различными скоростями в зоне контактного взаимодействия обрабатываемой детали и инструмента изменялось соотношение между тремя факторами: контактной температурой (деформационное и фрикционное тепловыделение); контактными напряжениями и релак-

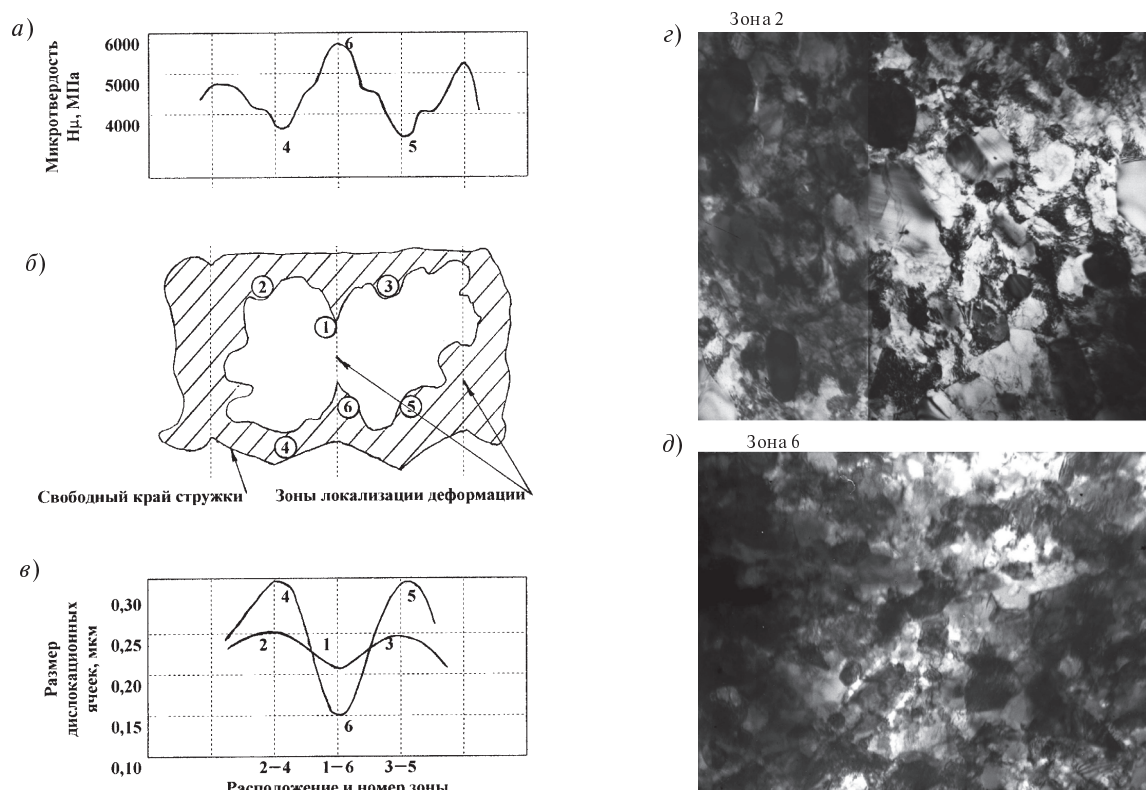


Рис. 9. Изменение значений микротвердости (а), размеров дислокационных ячеек (в) и схема (б) их распределения в долевом направлении элементной стружки из стали ХВГ при резании со скоростью 275 м/мин



сационной способностью (структурная и концентрационная) обрабатываемого материала.

Исходя из количественного соотношения перечисленных факторов система в результате своей самоорганизации устанавливает оптимальный размер объема металла (сегмента стружки), в котором пластическая деформация развивается равномерно в изотермических условиях. Чем больше скорость деформации и ниже теплопроводность обрабатываемого материала, тем размер сегмента меньше, так как затрудняется теплообмен между зоной деформации и окружающей средой. При этом в объеме металла происходит переход от равномерной изотермической деформации к локализованной адиабатической, что приводит к изменению геометрии образующихся сегментов стружки.

Таким образом, для эффективного повышения износостойкости инструмента необходимо,

чтобы скорость деформационного упрочнения преобладала над скоростью динамической структурной и концентрационной релаксации. То есть необходимо создавать условия, чтобы как можно дольше не происходило торможение эволюционирования структуры на микро- и мезоуровнях, вплоть до исчерпания трансляционных механизмов упрочнения за счет формирования ячеистой дислокационной структуры, а также оптимизировать скорость и температуру деформирования. В противном случае избыток тепловой энергии (вследствие уменьшения диссипации и торможения протекания равномерной изотермической деформации) приведет к локализации тепла и пластической деформации на макроуровне. Подключение новых мод пластической деформации значительно затрудняет достижение исчерпания пластической деформации, необходимой для разрушения при стружкообразовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкель, В.М. Физика разрушения [Текст] / В.М. Финкель.— М.: Металлургия, 1970.— 322 с.
2. Skotnikova, M.A. About Nature of Dissipative Processes at Cutting Treatment of Titanium Blanks [Текст] / M.A. Skotnikova, K.N. Voinov, M.A. Martynov, S.S. Ushkov // Titanium-99. Science and Technology.— Saint Petersburg. Russia.— 1999.— Vol. 3. P. 1668–1674.
3. Скотникова, М.А. Локализация пластической деформации металлов при скоростном резании. Прочность материалов и конструкций при низких температурах [Текст] / М.А. Скотникова, Д.А. Касторский // Сб. трудов ГУНПТ.— СПб.— 2000.— С. 60–68.
5. Микляев, П.Г. Кинетика разрушения [Текст] / П.Г. Микляев, Г.С. Нешпор, В.Г. Кудряшов.— М.: Металлургия, 1979.— 279 с.

УДК 620.179.18 : 681.586.5

В.В. Булатов, И.И. Абакумов, А.А. Кульчицкий

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОРОКОВ СТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ КАМЕРЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

К порокам листового стекла относят любое несоответствие химического состава, инородные включения, а также механические повреждения (царапина, пузырь, камень и др.).

В настоящее время контроль пороков листового стекла проводится органолептически в проходящем свете при рассеянном дневном освещении или подобном ему искусственном. Освещенность поверхности листа стекла долж-

на быть не менее 300 люксов [1]. Определение класса порока и оценка его линейных размеров осуществляется визуально человеком. На основании произведенной оценки в соответствии с ГОСТ [1] принимается решение об отнесении объекта контроля к браку.

Видимость объекта контроля (степень различимости пороков стекла при их наблюдении) зависит от продолжительности просматривания,

контраста, яркости, цвета, угловых размеров объекта, резкости контуров и условий освещенности. Каждое свойство имеет абсолютный порог видимости, ниже которого дефект не может быть виден, сколь бы благоприятными не были условия наблюдения с точки зрения других факторов. Человеческий глаз при слишком малой яркости или очень малом контрасте не может различить объект контроля даже при продолжительном рассматривании.

Минимальная величина яркостного контраста, при которой контролер способен различать пороки стекла, для человека составляет 0,01–0,02 (1–2 %) при оптимальных условиях осмотра предмета с угловыми размерами не менее 0,5°. В реальных производственных условиях контроля стекла и изделий из стекол пороговое значение чувствительности выше и составляет около 0,05 (5 %), что объясняется малой яркостью дефектов, их небольшими угловыми размерами и другими факторами [3].

Таким образом, некоторые, даже крупные, пороки стекла не могут быть обнаружены глазом из-за малого контраста на поверхности детали. Возникла проблема точного определения линейных размеров дефекта и его классификации, в то время как ГОСТ [1] установил строгие требования к отнесению изделий из листового стекла к браку по указанным характеристикам. Как

следствие, неправильное определение класса, количества и размеров пороков приводит к высокому проценту брака изделий из листового стекла.

Для усовершенствования системы контроля соответствия качества стекла требованиям ГОСТ предлагается автоматизировать процесс детектирования, внедрив камеру технического зрения (КТЗ). Для исследований использовалась камера фирмы Nation Instruments модель 1722 (NI 1722).

Процесс контроля стекол можно разделить на несколько этапов:

- получение изображения камерой NI 1722;
- пространственная обработка изображения фильтрами или набором фильтров;
- выделение объектов на обработанном изображении;
- распределение объектов по классам пороков листового стекла;
- сравнение найденных пороков с требованиями ГОСТ и принятие решения о соответствии.

Для проведения исследований разработана лабораторная установка автоматизированного детектирования пороков стекла (АДПС) (рис. 1). Работа устройства осуществляется следующим образом. Объект контроля 8 с дефектом закрепляется в держателе 7 и устанавливается на каретку 6. Каретка 6 устанавливается на скамью 14 и располагается перед светильником 9 и белым экраном 11, зафиксированном на держате-

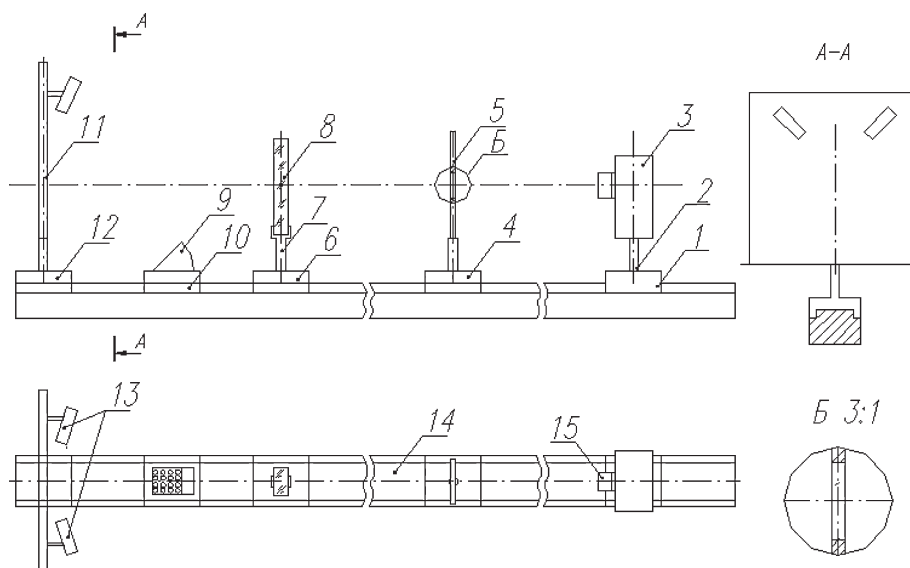


Рис. 1. Устройство автоматизированного детектирования пороков стекла:

- 1 — каретка КТЗ; 2 — крепление КТЗ; 3 — КТЗ; 4 — каретка диафрагмы; 5 — диафрагма; 6 — каретка объекта контроля; 7 — держатель объекта контроля; 8 — объект контроля (листовое стекло); 9 — светильник; 10 — каретка светильника; 11 — экран; 12 — держатель экрана; 13 — светильники; 14 — скамья; 15 — объектив камеры



ле 12. Экран подсвечивается системой рассеянного освещения, состоящей из диодных светильников 13, закрепленных на нем, и диодного светильника 9, установленного на подвижной каретке 10. Камера технического зрения 3 с объективом 15 при помощи крепления 2, соединенного с кареткой 1, устанавливается на скамью 14 перед объектом контроля 8. Диафрагма 5 жестко закреплена на каретке 4 и установлена на скамью 14 между объектом контроля 8 и камерой технического зрения 3. Диафрагма предназначена для ограничения поля зрения камеры 3, чтобы получать и обрабатывать изображение только объекта контроля.

Контроль осуществляется в затемненном помещении. Используется местное светодиодное освещение сцены.

Обязательное условие проведения контрольных работ с применением АДПС — строго зафиксированное положение объекта контроля 8 и КТЗ 3 на одной оптической оси.

В предлагаемом устройстве подвижные каретки позволяют менять месторасположение объекта контроля и регистрирующего элемента системы путем передвижения их относительно друг друга по скамье. Это добавляет дополнительную гибкость системе АДПС — возможность осуществлять диагностику образцов контроля с различными геометрическими размерами.

В основе предлагаемой методики распознавания пороков лежит программная обработка изображения, полученного камерой технического зрения. Для получения высококонтрастного изображения необходима правильно подобранная система освещения образцов контроля.

В систему освещения входят два светильника с тремя диодами и один с шестнадцатью диодами. Освещение устанавливается таким образом, чтобы лучи света падали на экран. Разработан оптимальный вариант освещения, в котором расположение светильников в АДПС характеризуется тремя угловыми размерами (рис. 1).

В предложенной схеме освещение экрана имеет равномерный характер и дает значение освещенности поверхности контролируемого объекта $E = 420$ лк, т. е. условие ГОСТ ($E \geq 300$ лк) выполняется [1]. На рис. 2 представлены изображения, полученные с КТЗ при данном расположении источников освещения. Объект контроля имеет равномерную освещенность. Пороки листового стекла четко различимы.

Рассмотрим обнаружение объектов на примере детектирования трех основных пороков стекла: царапина, пузырь и камень (инородное включение). Все пороки можно описать рядом признаков: геометрическим (форма), структурным, цветовым.

Полученное с КТЗ изображение можно описать матрицей чисел, являющихся количественным описанием яркости каждого пикселя на изображении. По выделенным признакам пороки также можно описать последовательностью чисел. Путем выявления таких последовательностей в искомой матрице можно обнаружить объекты на изображении.

При анализе изображений, получаемых с КТЗ, на первом этапе нужно выделить связанные области. Следует отметить, что при обработке изображений необходимо применять принцип восьмисвязности пикселей, в противном случае (четырёхсвязность) многие пороки стекла не будут обнаружены.

Получаемое цифровое изображение является матрицей I значений пикселей.

Одним из главных признаков пороков стекла является цветовой или признак яркости.

Поэтому для полутонового изображения следует установить порог яркости для светлых и темных объектов. Обозначим светлые пиксели — B , а темные — D . Предположим, что

$$B \leq 150; D \geq 151. \quad (1)$$

Обозначим группу темных пикселей множеством единиц в одной строке матрицы I , не разде-

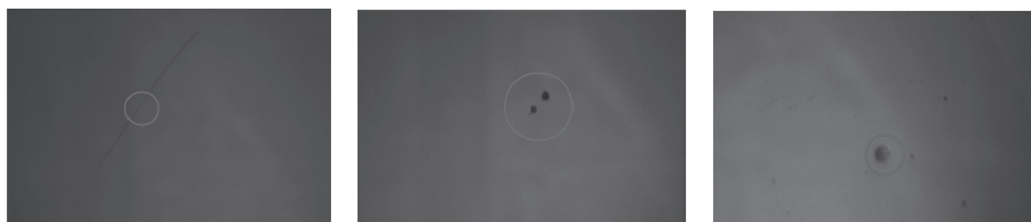


Рис. 2. Изображение объекта контроля при оптимальном варианте освещения

ленных нулями (светлыми пикселями). Тогда группы единиц, расположенных в соседних строках матрицы изображения объекта контроля, с координатами концов по оси абсцисс a , b и c , d будут связными, если справедливо одно из выражений

$$a \leq c \leq b; \quad a \leq d \leq b; \quad c-1=b; \quad d+1=a. \quad (2)$$

На рис. 3 представлены примеры связных областей изображения (далее по тексту — детектируемые объекты).

a	b	a	b
0001111		0001111	
0111100		0110000	
c	d	c	d

Рис. 3. Связные группы единиц на изображении

Контроль размера связной дефектной конфигурации можно свести к расчету одного из линейных геометрических параметров-признаков дефекта (диаметр, длина, площадь).

Рассмотрим контроль размера дефектной конфигурации на примере порока «пузырь». Данный дефект стекла относительно геометрии обладает эллипсовидной формой.

Линейные размеры порока контролируются в соответствии со стандартом [1] и дополнительными требованиями заказчиков. Обозначим общие правила анализа порока «пузырь». По итогам распознавания возможны три варианта событий:

- 1) $L > L_0$ — наибольший линейный размер больше эталонного;
- 2) $L < L_0$ — наибольший линейный размер меньше эталонного;
- 3) связная область не является дефектом.

Расчет площади порока можно произвести, воспользовавшись формулой Пика

$$S = B + \frac{\Gamma}{2} - 1, \quad (3)$$

где B — количество целочисленных точек внутри дефектной области; Γ — количество целочисленных точек на границе дефектной области.

Следующая задача после выделения связных областей на изображении — является разделение выделенных объектов на бездефектные дефектные конфигурации. Эта задача предполагает следующее:

установку максимального размера объекта связной области;

разработку различных видов освещения объекта контроля;

фильтрацию изображения.

После обнаружения объекта проводится пространственная фильтрация изображения, чтобы отнести каждый выделенный объект к определенному классу пороков, а также удалить с изображения объекты, не являющиеся пороками. Фильтрация осуществляется с помощью программы NI Vision Builder. Исследования [5–7] выделили ряд нелинейных фильтров, необходимых для детектирования основных пороков стекла.

При проведении эксперимента использовались образцы контроля с одним или двумя пороками, а также образец с каплями краски и пороком. Результаты поиска дефектов представлены в таблице.

Эксперимент показал, что не все нелинейные фильтры обеспечивают детектирование порока: одни из них добавляют дополнительные шумы на изображении, а другие малоэффективны для распознавания из-за физических особенностей пороков стекла.

При моделировании процесса детектирования порока «пузырь» установлено, что для четкого выявления дефекта следует использовать набор фильтров Laplace-Median. Для детектирования порока «царапина» следует использовать набор фильтров Laplace-Highlight Details. Только этот набор фильтров дает нам возможность распознать царапины на изображении. При детектировании порока «камень» оптимальным является применение фильтра Median с коэффициентом 3.

Результаты детектирования порока «царапина» представлены на рис. 4.

Размер порока в миллиметрах вычисляется с учетом расстояния, на котором находится объект контроля от интеллектуальной камеры. Горизонтальные и вертикальные размеры и расстояния, полученные программой NI Vision Builder в пикселях, переводятся в миллиметры по формулам

$$K_{\text{гор}} = \frac{L_d LN}{F} H_m; \quad (4)$$

$$K_{\text{вер}} = \frac{H_d LN}{F} V_m, \quad (5)$$

где N — размер царапины в пикселях; L_d — горизонтальный размер датчика камеры, мм; H_d — вертикальный размер датчика камеры, мм; F — фокусное расстояние объектива; H_m — горизон-

Количество объектов на образцах контроля с дефектами
после обработки полутонового изображения различными нелинейными фильтрами

Порок стекла	Фильтры							
	Dark objects Laplace filter	Bright objects Laplace filter	Median $k = 3$	Dark objects Laplace + High details	Bright objects Laplace + High details	Bright objects Roberts filter	Bright objects Sobel operator	Dark objects Prewitt operator
Царапина	0	4	0	1	0	3	2	4
Пузырь	0	2	0	7	4	4	5	0
Камень	21	0	1	47	0	0	0	0
Царапина + камень	19	5	1	48	0	4	3	8
Царапина + пузырь	0	8	0	11	4	8	6	16
Пузырь + краска	5	7	3	11	9	16	7	12

тальное разрешение матрицы камеры в пикселях; M_m — вертикальное разрешение матрицы камеры в пикселях; L — расстояние от матрицы камеры до объекта.

Следует отметить, что в соответствии с ГОСТ [1], если расстояние между отдельными пороками менее 500 мкм, то они приравниваются к порокам размером более 0,5 мм. Вычисление размеров

пороков и расстояний между ними реализовано на базе программы Labview.

Следующим этапом распознавания пороков стало создание программного алгоритма, который на основе выделенных признаков автоматически классифицирует объекты на изображении, учитывая все особенности контролируемых дефектов, их классы и размеры.

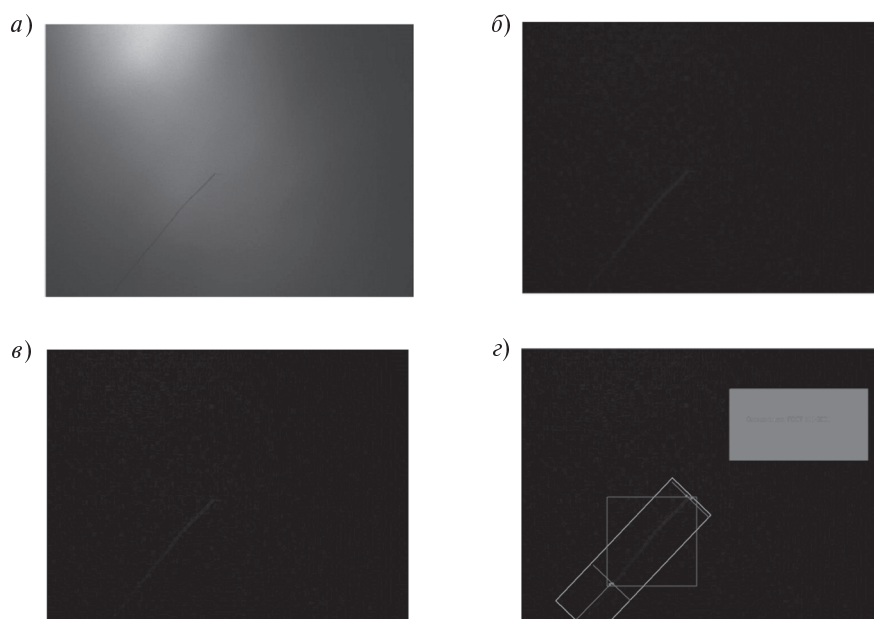


Рис. 4. Этапы работы алгоритма поиска царапин в среде NI Vision Builder:
а — оригинальное изображение; б — обработка фильтром Laplace;
в — обработка набором Laplace Highlight Details; г — обнаружение дефекта,
вывод результата

Алгоритм контроля основных пороков реализован на базе программы NI Vision Builder с применением объектного программирования и подробно описан в статье [4].

Эксперимент показал, что установка АДПС позволяет измерить дефект с точностью до 0,1 мм в соответствии с формулами (1) и (2), что позволяет проводить контроль порока в промышленности.

Итоги работы таковы:

смоделирована опτικο-электронная установка контроля с учетом универсального освещения; выделены основные признаки пороков «царапина», «пузырь» и «камень» и на их основе построен алгоритм детектирования;

эксперимент показал, что для выделения порока «пузырь» следует применять набор фильтров Laplace-Median, для порока «царапина» — Laplace-Highlight Details, а для порока «камень» подходит фильтр Median;

для указанных пороков разработаны алгоритмы распознавания на базе NI Vision Builder.

Проведенное исследование показало, что система АДПС позволяет осуществлять контроль стекла в соответствии с ГОСТ. При этом использование объектного программирования упрощает реализацию алгоритма контроля и уменьшает скорость нахождения дефекта на изображении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 111–2001.** Стекло листовое. Технические условия [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 2001 — 21 с.
2. **Визильтер, Ю.В.** Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на Labview и IMAQ Vision. [Текст] / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь, А.Н. Ходарев, А.В. Моржин // М.: ДМК Пресс, 2007.
3. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений [Текст]: Пер. с англ. / Р.Гонсалес, Р.Вудс //— М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
4. **Булатов, В.В.** Обобщенный алгоритм выделения пороков стекла [Текст] / В.В. Булатов // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 39.— СПб: Изд-во СЗТУ, 2009.— С.125–130.
5. **Булатов, В.В.** Влияние источников света на процесс контроля процесса контроля прозрачных сред техническим зрением [Текст] / В.В. Булатов, А.А. Сарвин // Труды междунар. научно-техн. конф., посвященной 80-летию вуза: Системы и процессы управления и об-

работки информации— СПб.: Изд-во СЗТУ, Институт системного анализа, автоматизации и управления, 2010.— С. 109–113.

6. **Булатов, В.В.** Математические основы обнаружения инородных включений на стекле по монохромному изображению [Текст] / В.В. Булатов, А.А. Сарвин // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию вуза: Системы и процессы управления и обработки информации.— СПб.: Изд-во СЗТУ, Институт системного анализа, автоматизации и управления, 2010.— С. 114–119.

7. **Баранов, С.Б.** Методика оценки пузырьности стекол по монохромному изображению [Текст] / С.Б. Баранов, В.В. Булатов // Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов: Анализ и прогнозирование систем управления. 1 ч.— СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010.— С. 42–47.

УДК 621.771:620.18

*А.М. Золотов, В.Н. Цеменко,
С.А. Котов, С.В. Ганин*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНОЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Метод механического легирования — один из методов порошковой металлургии, который позволяет получать дисперсно-упрочненные и композиционные материалы. Благодаря этому мето-

ду можно добиться расширения растворимости легирующих добавок в материале матрицы, осуществить синтез равновесных и метастабильных кристаллических, а также аморфных фаз.



Метод механического легирования дает возможность получить целый класс новых, обладающих рядом специальных свойств порошковых материалов на основе алюминия, легированного редкоземельными элементами или их оксидами. Пока еще не решена задача получения компактных заготовок из таких порошков, которые относятся к трудно деформируемым и уплотняемым материалам.

Следует отметить, что статические методы уплотнения порошковых материалов, содержащих интерметаллиды высокой твердости, связаны с некоторыми трудностями: холодное прессование не позволяет получать плотные образцы, так как даже при отсутствии в них заметной при микроскопических исследованиях пористости физико-механические свойства этих образцов невысоки; горячее прессование обеспечивает получение плотных заготовок, но протекающие фазовые превращения и укрупнение структуры препятствуют реализации полезных свойств наполнителя. При решении таких задач целесообразно осуществлять предварительное математическое моделирование процессов уплотнения.

В задачах математического моделирования процессов уплотнения при повышенных температурах обычно порошковый материал представляют как пористый с уже образовавшимися связями между частицами порошка. В этом случае допускается возможность использования эллиптического условия пластичности. Представление пористого тела в виде полидисперсной среды с порами позволяет рассчитать пределы текучести при пластическом сдвиге (τ_s) и гидростатическом сжатии (p_s) в зависимости от относительной плотности пористого материала (ρ) при известном пределе текучести компактного (матричного) материала [1].

В случае с механически легированными материалами оксидные пленки и интерметаллидные фазы могут препятствовать образованию прочных связей между частицами в отличие от порошков металлов. Опыт показал, что образующиеся при спекании рассматриваемых материалов связи на границе раздела между частицами — хрупкие, что свидетельствует о том, что данная связь образована не металлом, а его оксидной пленкой.

Для определения реологических характеристик такого материала следует рассматривать его как неспеченный порошковый материал, одна-

ко при этом необходимо учесть изменение механических характеристик при повышении температуры.

В отличие от пористого материала, механические характеристики которого удастся вычислить с той или иной степенью приближения, для неспеченного материала необходимо использовать экспериментальные методы.

Экспериментальное построение кривых предельного состояния порошковых материалов определенной плотности в осях «гидростатическое сжатие (первый инвариант тензора напряжений — p) — интенсивность касательных напряжений (второй инвариант девиатора — φ)» возможно по точкам, которые должны соответствовать различным схемам нагружения [2]. При наличии стандартного испытательного оборудования удастся реализовать 5 схем нагружения. На рис. 1 представлена геометрическая интерпретация эллиптического условия текучести для порошковых материалов и точки, соответствующие различным схемам нагружения: одноосному растяжению (точка 1), сдвигу (точка 2), одноосному сжатию (точка 3), сжатию в закрытой матрице (точка 4) и гидростатическому сжатию (точка 5).

Для корректного описания процессов деформирования порошковых материалов принципиальное значение имеет та часть кривой предельного состояния, которая относится к области уплотнения. Эта часть определяется точками одноосного сжатия, сжатия в закрытой матрице и гидростатического сжатия.

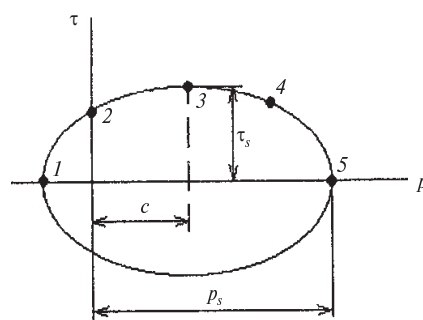


Рис. 1. Геометрическая интерпретация эллиптического условия текучести порошковых материалов:

p_s — предел текучести при гидростатическом сжатии; τ_s — предел текучести при пластическом сдвиге; c — предел уплотнения

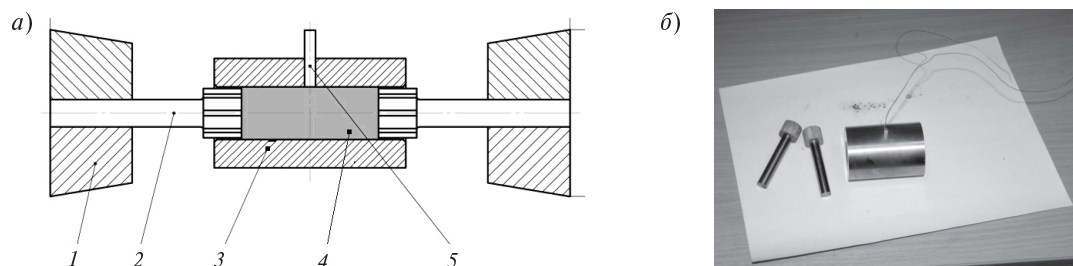


Рис. 2 Оснастка для обработки образцов диаметром 19 мм:

a — схема и *б* — общий вид перед испытанием;

1 — зажим, 2 — пуансон, 3 — матрица, 4 — образец, 5 — трубка для термопары

Если учесть те процессы обработки давлением, которым могут подвергаться исследуемые порошковые материалы, — прессование, прокатка, экструзия, РКУ-прессование, выбор схемы напряженного состояния — соответствующий прессованию в закрытой матрице, следует считать приемлемым.

Исследование процесса уплотнения в закрытой матрице осуществлялось на комплексе Gleeble 3800, для чего была изготовлена специальная оснастка (рис. 2). Предварительно скомпактированный образец 4 находится в матрице 3. В качестве изолятора, исключающего протекание электрического тока через образец при нагревании, выступало покрытие нитрида бора, наносимое непосредственно на пуансоны и на внутреннюю сторону матрицы. Для контроля температуры к образцу через керамическую трубку 5 подводилась термопара. Со стороны пуансонов 2, закрепленных в медных зажимах 1, создавалось необходимое усилие прессования. Нагрев образца осуществлялся посредством теплообме-

на с матрицей, которая разогревалась прямым пропусканием тока через захваты.

На рис. 3 представлена рабочая камера испытательного комплекса с установленной в нее дополнительной оснасткой. Рабочая камера соединена с вакуумной системой, обеспечивающей разряжение не менее $1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст. Для записи усилий, создаваемых со стороны пуансонов, использовались тензодатчики, а для записи деформаций — датчики перемещения траверсы.

Первой задачей было установление зависимости относительной плотности от температуры прессования при фиксированной нагрузке, чтобы определить рабочую температуру горячей деформации исследуемого порошкового материала.

После достижения в камере высокого вакуума на пуансоны подавалось усилие 20 кН (68 МПа) (усилие подпрессовки), которое поддерживалось постоянным до конца эксперимента. Нагрев образца (диаметром 19 мм) осуществлялся прямым пропусканием электрического тока через матрицу со скоростью нагрева $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температуры $580 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При повышении температуры происходит увеличение пластичности порошкового материала и под действием приложенной нагрузки он начинает уплотняться. На рис. 4 приведена зависимость плотности образца от температуры прессования. Необходимо заметить, что линия графика имеет перегибы в точках около 340 и $420 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Интервал между ними является зоной фазовых превращений [3]. На основании данного факта была выбрана рабочая температура процесса уплотнения — $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следующая серия опытов производилась при температуре $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Целью этого эксперимента было построение зависимости плотности

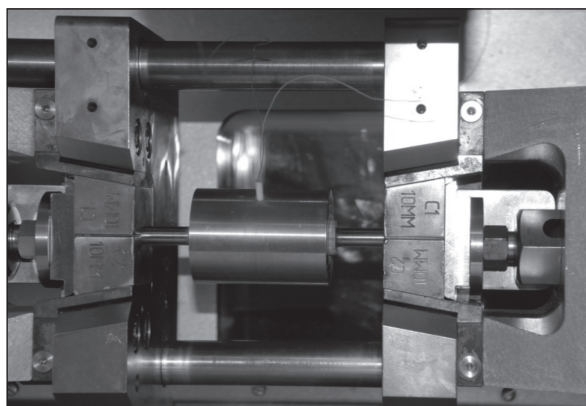


Рис. 3. Камера модуля комплекса Gleeble 3800, подготовленная для проведения испытания

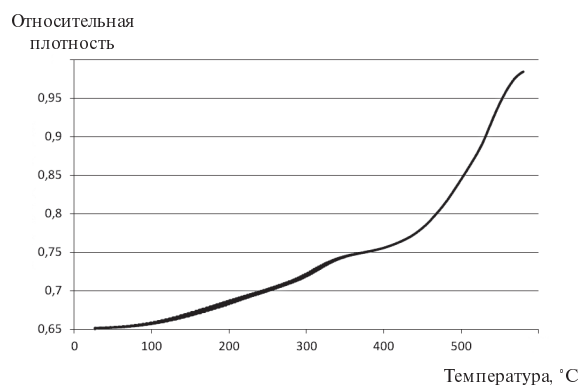


Рис. 4. Зависимость относительной плотности от температуры прессования

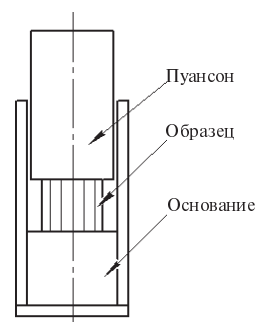


Рис. 5. Оснастка для проведения опытов на сжатие

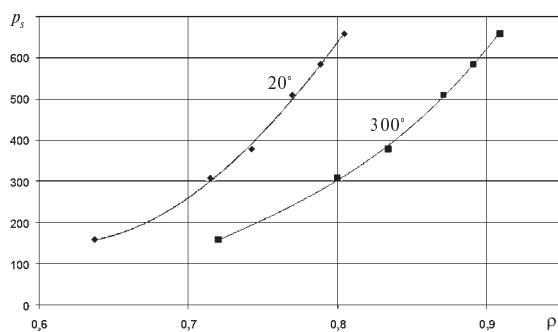


Рис. 6. Зависимость предела текучести при гидростатическом сжатии p_s от относительной плотности материала ρ

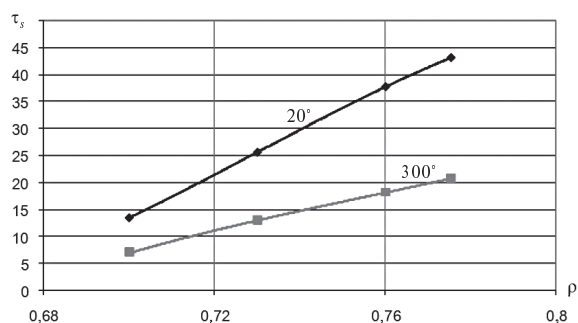


Рис. 7. Зависимость предела текучести при пластическом сдвиге τ_s от относительной плотности материала ρ

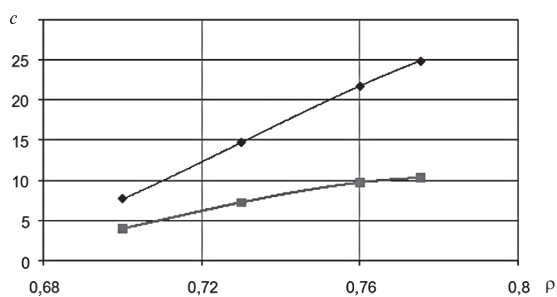


Рис. 8. Зависимость предела уплотнения c от относительной плотности материала ρ

от давления прессования при заданной температуре. После достижения вакуума образец нагревался прямым пропусканием тока через матрицу со скоростью нагрева $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Задавалась скорость перемещения захватов $0,1\text{ мм}/\text{мин}$. В ходе опыта фиксировалось перемещение захватов и усилие прессования в определенные моменты времени.

Следующей задачей было получение зависимости предела текучести при одноосном сжатии от относительной плотности образцов.

В отличие от нагрева образцов в закрытой матрице, нагрев образцов для проведения данного эксперимента на комплексе Gleeble 3800 возможен только за счет прямого пропускания тока через образец. Этот факт может существенно повлиять на результаты эксперимента. Поэтому испытания проводились на испытательной машине Р-10. Для этого была разработана и изготовлена специальная оснастка (рис. 5). Образцы для испытания диаметром 16 мм и высотой 20 мм получали холодным прессованием в закрытой матрице. Оснастка вместе с образцом выдерживалась в течение 30 минут в камерной печи, нагретой до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. После этого она помещалась в испытательную машину, работающую в режиме сжатия. Разрушение образцов происходило при достижении деформации около 1% .

Полученные экспериментальные данные были обработаны следующим образом: при одноосном нагружении сжимающее напряжение — $\sigma_3 = \sqrt{3}\tau$, а среднее напряжение — $\sigma_0 = \sigma_3/3$. Для этого вида нагружений в соответствии с эллиптическим ус-

ловием текучести $\tau = \tau_s$, $-\sigma_0 = c$. Для нагружения в замкнутой матрице производилась оценка τ и σ_0 . Среднее напряжение ($-\sigma_0$) в рамках допустимой погрешности принималось равным p_s .

Дополнительно к испытаниям при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ были проведены аналогичные испытания образцов из исследуемого материала при нормальной температуре. На рис. 6–8 приведены зависимости соответствующих характеристик от относительной плотности как для нормальных условий, так и для повышенной температуры. Из зависимостей видно, что повышение температуры пластической деформации до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ существенно снижает значения реологических характеристик порошкового материала в исследованном интервале плотностей.

Таким образом в настоящей работе была разработана методика проведения механических испытаний при повышенных температурах с использованием комплекса для физического моделирования Gleeble 3800 и испытательной машины Р-10. Получены реологические характеристики механически легированной порошковой композиции на основе алюминия при повышенных температурах, которые могут быть использованы для проведения математического моделирования различных технологических процессов деформирования исследованного порошкового материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ (грант № 2.1.2/6955).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской, А.И. Моделирование пластического деформирования пористого материала в металлической оболочке [Текст] / А.И. Рудской, Ю.И. Рыбин, В.Н. Цеменко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2007. № 3(51). — С. 26–31.
2. Цеменко, В.Н. Процессы порошковой металлургии. Теория и физические основы уплотнения порошковых материалов [Текст] / В.Н. Цеменко. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 116 с.
3. Котов, С.А. Влияние термической обработки на свойства механически легированных материалов на основе алюминия [Текст] / В.Д. Андреева, С.В. Ганин [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 12(630). — С. 25–29.

УДК 681.322

Г.Л. Атоян, И.И. Корбутов, А.И. Осадчий

ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Одним из актуальных направлений в области информационных технологий является создание нового вида сетевых систем — сенсорных сетей (СС). Сенсорная сеть — это беспроводная система, представляющая собой распределенную, самоорганизующуюся и устойчивую к отказам отдельных элементов сеть миниатюрных вычислительных устройств с автономным источником питания. Беспроводные сенсорные сети — БСС (их также называют специализированными, или многоточечными, сетями) — строятся из малых узлов — мотов. Моты — это небольшие автономные компьютеры с питанием от батарей и радиосвязью, которая позволяет им самоорганизовываться в специализированные сети, связываясь друг с другом и обмениваясь данными. Данные от отдельных узлов передаются по сети от узла к узлу (отсюда название «многоточечные сети») и обычно попадают на сервер, имеющий более высокую вычислительную мощность. Каждый мот устанавливает связь с соседними сразу после включения. Несмотря на то, что у отдельного сенсора мощность и вычислительные возможности ограничены, множество мотов, самопроизвольно организуясь в сеть, способно выполнять задачи, с которыми не в состоянии справиться обычная вычислительная система.

Узлы такой системы транслируют сообщения друг через друга, обеспечивая значительную площадь покрытия сетью при малой мощности передатчика. Исследования по созданию сетей автономных датчиков начали активно развиваться с середины 90-х годов и были активно поддержаны Агентством по перспектив-

ным оборонным научно-исследовательским работкам. Предполагалось, что миниатюрные датчики (сенсоры), снабженные контроллером и приемопередатчиком, будут разбрасываться с самолета, собирать необходимую информацию и передавать ее в центр обработки. Однако в предлагаемой нами системе оборудование будет монтироваться на специально подготовленные платформы, которые в свое время будут фиксировать не только положение датчиков, но и обеспечивать простейшую безопасность по отношению к погодным условиям, а также защиту от человеческого фактора.

Обмен информацией между узлами системы происходит по беспроводным каналам связи по протоколу ZigBee. Данный протокол предоставляет возможности реализации беспроводной связи с низким энергопотреблением для множества приложений, которые осуществляют функции наблюдения или управления.

Протокол ZigBee — это международный открытый стандарт, контролируемый объединением ZigBee Alliance. Он был создан на основе стандарта IEEE802.15.4 для пакетной беспроводной передачи данных. Протокол обеспечивает гибкие, расширяемые сетевые топологии, содержит встроенные функции для организации сетей и маршрутизации передаваемых данных. Также протокол обеспечивает простую установку и высокую устойчивость к сбоям, полноценные меры по безопасности, преодолевает традиционные ограничения маломощных беспроводных сетевых решений, такие, как малая дальность и ограниченное покрытие, а также уязвимость к сбоям в узле и в радиолинии.

Простота создания сетей сбора данных, возможность их оперативного развертывания и сворачивания, их интеллектуальность и дешевизна, легкость их расширения и сокращения, наконец, приложение сетей к разным профилям жизнедеятельности — вот принципы, заложенные в идеологию стандарта персональных сетей стандарта IEEE 802.15.4. Воплощение в жизнь этих принципов и составляет цель сетевой технологии ZigBee — программной надстройки для управления сетевыми устройствами (трансиверами) стандарта. Набор протоколов ZigBee является реализацией стека протоколов семиуровневой модели взаимодействия открытых систем.

Необходимость данной разработки определяется тем, что в различных сферах деятельности человека возникает потребность в использовании одних и тех же или однотипных устройств, а также задача рационального использования ресурсов. Экономия материальных средств обеспечивается за счет охвата широкого спектра решаемых задач в рамках одного устройства. Кроме того, универсальная платформа дает возможность быстрой переконфигурации системы, что позволяет применять платформу для различных целей за счет взаимодействия с датчиками часто используемого типа.

В состав платформы входят:

ZigBee координатор — центральное вычислительное устройство системы, собирающее данные со всех сенсоров сети, управляющее ее исполнительными устройствами, обеспечивающее инициализацию БСС и ее связь с внешним миром через подключенный компьютер;

ZigBee маршрутизатор — устройство для построения больших сетей (до 1000 сенсоров), осуществляющее передачу пакетов по узлам сети и выбирающее оптимальный маршрут для поддержания качественной связи;

ZigBee устройство управления — устройство для подключения различных датчиков и исполнительных устройств, работающее с наиболее популярными интерфейсами;

ZigBee устройство управления с обратной связью, имеющее компактный размер 50×30×10 мм и четыре клавиши управления для связи с узлами сети;

ZigBee интеллектуальный шлюз, позволяющий осуществлять стыковку ZigBee сетей с дру-

гими беспроводными сетями, работающими в нелицензируемом диапазоне 2,4 ГГц (WiFi, WiMax и др.).

Краткие характеристики платформы ZigBee: совместимость с 2,4 ГГц IEEE802.15.4 и ZigBee;

рабочее напряжение 2,7–3,6 В;

ток потребления в спящем режиме (при активном таймере сна) 2,8 мкА;

дальность связи 1–4 км на открытом пространстве (определяется типом модуля и антенны);

время автономной работы от двух батарей типа AAA до 2 лет;

габариты опытного образца 35×75 мм (определяются размерами батарей);

32-битный RISC-процессор с тактовой частотой 16(32) МГц;

96 кБ RAM, 192 кБ ROM;

шина I2C;

возможность организации до 10 цифровых входов/выходов.

Достоинства систем на основе сенсорных сетей:

возможность расположения в труднодоступных местах, куда сложно и дорого тянуть обыкновенные проводные решения;

оперативность и удобство развертывания и обслуживания системы;

надежность сети в целом; в случае выхода из строя одного из них информация передается через соседние элементы;

возможность добавления или исключения любого количества устройств из сети;

высокий уровень проникновения сквозь препятствия (стены, потолки) и стойкость к электромагнитным помехам (благодаря высокой частоте работы системы — 2,4 ГГц);

длительное время работы без замены элементов питания.

Сенсорная сеть обладает способностью к ретрансляции сообщений по цепочке от одного к другому, что позволяет в случае выхода из строя одного из узлов организовать передачу информации через соседние узлы без потери качества. Сама сеть определяет оптимальный маршрут движения информационных потоков.

Наиболее оптимистичные варианты построения беспроводной сети обмена данными для системы мониторинга экологической обстанов-

ки могут иметь «многоскачковую», «гибридную» и «квазисотовую» схемы.

После уточнения структуры системы мониторинга экологической обстановки на основе рассмотренных вариантов могут быть предложены несколько реальных концепций построения беспроводной сети передачи данных с использованием оборудования различных производителей. После этого появляется возможность для расчета реальных функционально-экономических характеристик каждой из концепций и принятия решения по построению сети.

Обобщенный вариант построения многоскачковой сети передачи данных мониторинга экологической обстановки (например, на основе технологии ZigBee) можно представить в виде, показанном на рис. 1. Беспроводный сенсорный узел устанавливается на каждом звене. Предполагается, что звенья группируются таким образом, что составляют связанную группу. Для объе-

динения групп беспроводных датчиков и исполнительных устройств в единую сеть в нее дополнительно вводятся «связные» беспроводные сенсорные узлы. Места расположения беспроводных сенсорных узлов выбираются так, чтобы минимизировать общее их количество. При необходимости беспроводный сенсорный узел может устанавливаться на одном из пунктов управления (ПУ) и выполнять при этом функции оконечного узла для данного ПУ и транзитного по отношению к центральному пункту сбора и контроля информации уровня водных масс. Более полное представление варианта возможно после уточнения мест расположения пунктов управления и звеньев на местности.

Недостатком данного варианта является низкая надежность сети, вызванная большой протяженностью интервалов радиосвязи между пунктами управления и погрешностями самоорганизации. Самоорганизация сети может

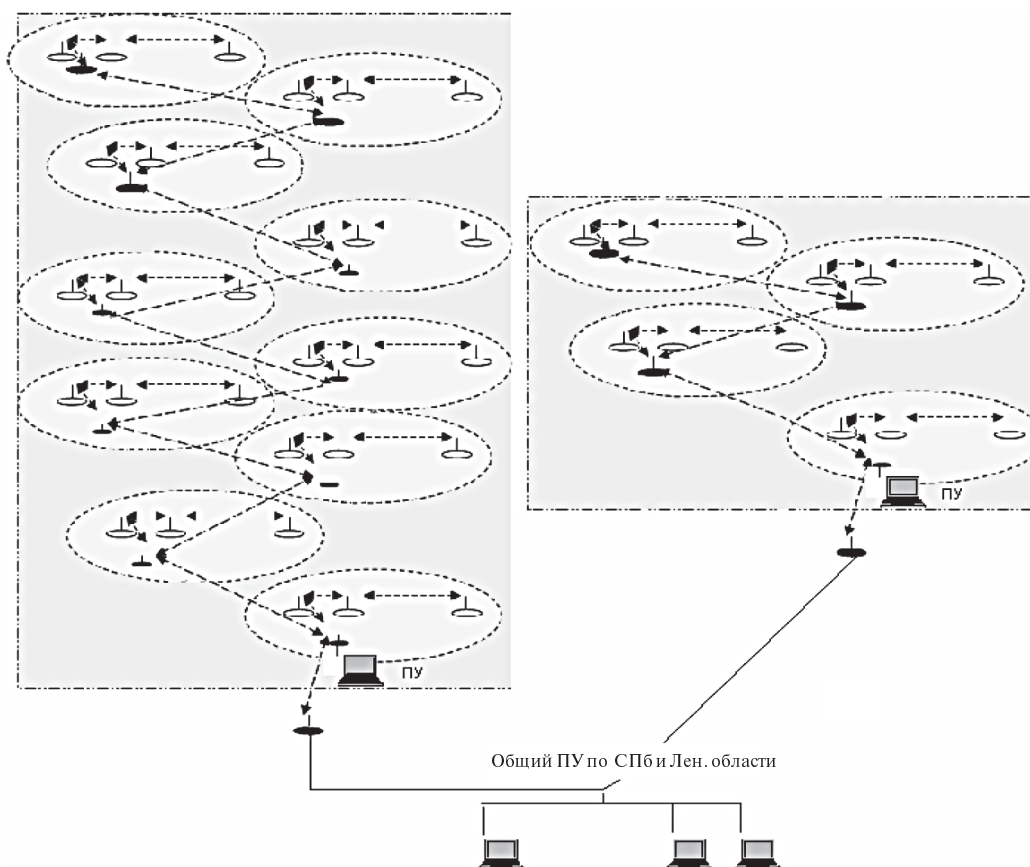


Рис. 1. Обобщенный вариант построения многоскачковой сети передачи данных системы мониторинга экологической обстановки

вызвать непредсказуемость ее поведения (непредсказуемость маршрутов) и повлечь за собой такие проблемы, как непредсказуемое распределение нагрузки, а как следствие — перегрузку отдельных узлов, приводящую к сложности маршрутных таблиц, увеличению времени доставки пакетов по сети и ее фрагментации в случае отказов.

Избежать этих неприятностей, уменьшить время доставки сообщения, а также организовать взаимодействие между устройствами, находящимися в отдаленных друг от друга частях

местности, позволяет применение мостов и построенных с их использованием радиорелейных устройств ZigBee. Радиорелейное устройство представляет собой мост, ZigBee устройство которого вмонтировано в облучатель узконаправленной параболической (или планарной) антенны. На рис. 2 показан вариант построения сенсорной сети с мостами и релейными устройствами ZigBee.

Более высокие возможности для повышения надежности сети передачи данных в системе мониторинга уровня водных масс открывает ис-

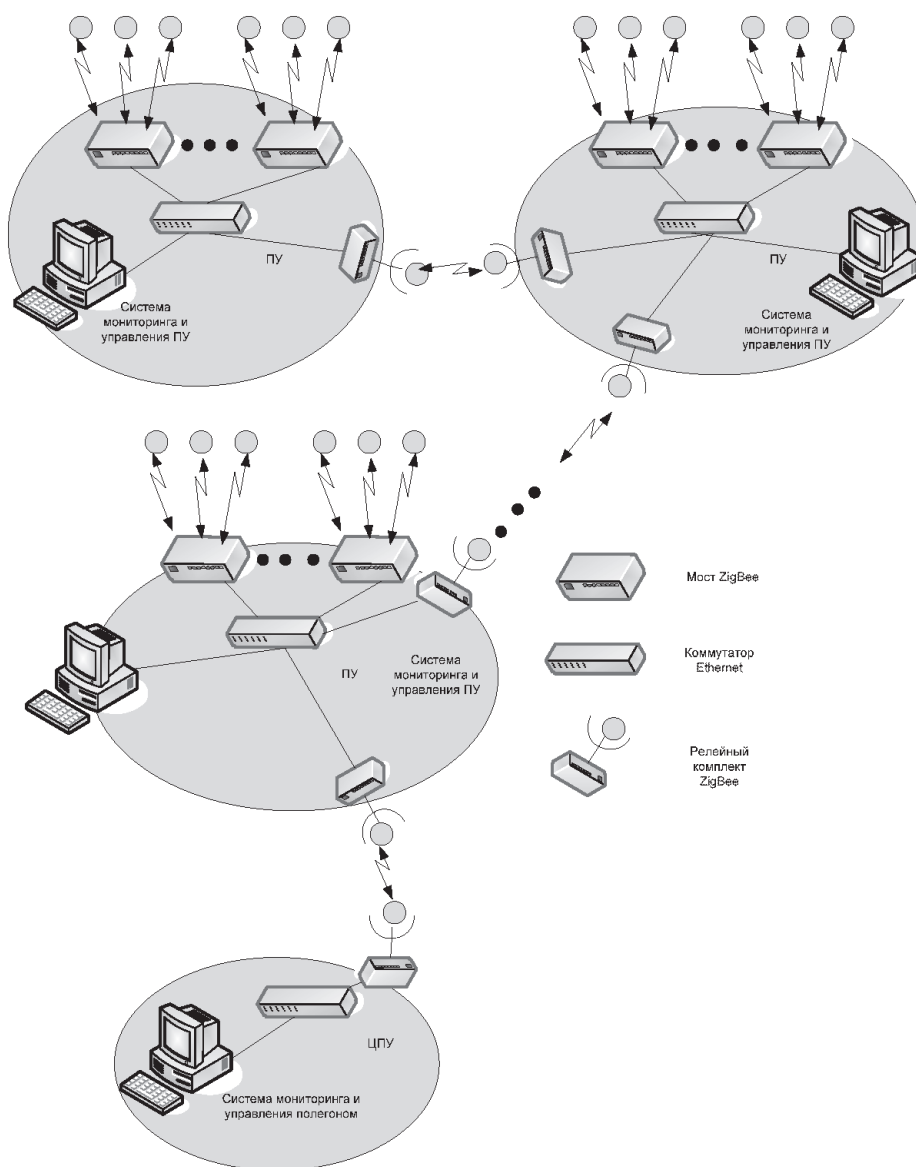


Рис. 2. Вариант построения сенсорной сети с мостами и релейными устройствами ZigBee

пользование пунктов ретрансляции, построенных на основе релейных устройств ZigBee.

Важную роль во всех рассмотренных ранее вариантах выполняет мост ZigBee. Мост ZigBee позволяет объединять сегменты ZigBee-сети при помощи сетей других типов; такие мосты могут выполнять функции ZigBee маршрутизаторов (то есть пересылать данные между узлами сети по радио) и брать на себя роль сетевого координатора. Использование мостов позволяет создавать сети со сложными топологиями, обслуживать большое число узлов и увеличить дальность связи.

На рис. 3 показан вариант построения сенсорной сети с ретрансляторами сигналов на ZigBee.

Актуальность предложений, изложенных в данной статье, обусловлена тем, что существующие системы сбора и обработки данных не могут полностью отвечать современным требованиям. Внедрение же беспроводных сенсорных сетей в систему сбора, контроля экологической обстановки будет дополнением существующих программно-технических комплексов, применяющихся в России.

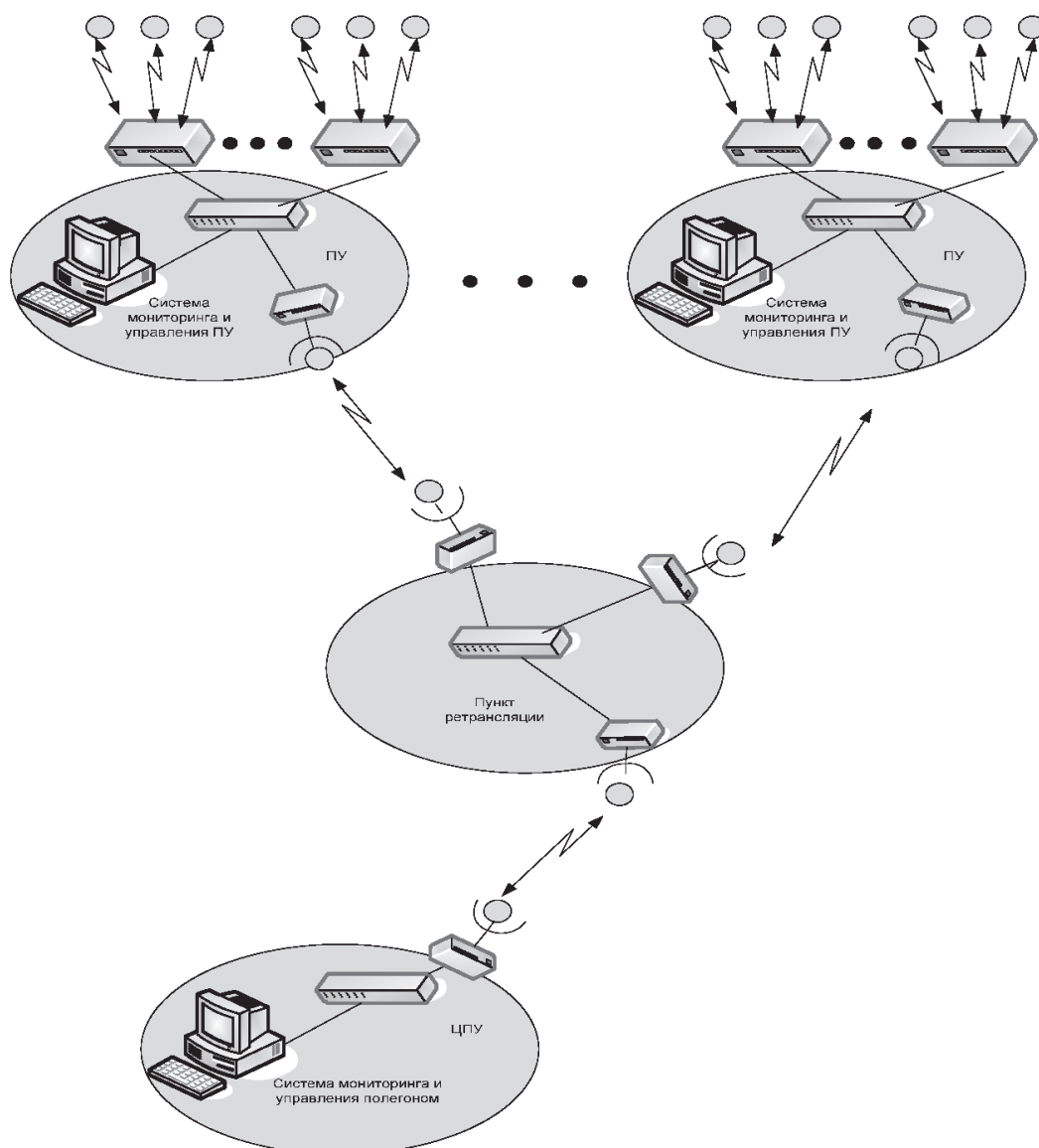


Рис. 3. Вариант построения сенсорной сети с ретрансляторами сигналов на ZigBee

УДК 543.426:539.16.04:556.53

В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Радионуклиды естественного происхождения — обязательный компонент биосферы. Они входят в состав горных пород, почвы, воздуха, воды, животных организмов. Только за счет природных радионуклидов, поступающих в организм, каждый житель нашей страны получает эффективную эквивалентную дозу около 40 мБэр/год [1].

Последствия испытаний ядерного оружия и аварий на АЭС также обусловили поступление в окружающее пространство большого количества долгоживущих α -активных радионуклидов, которые особо опасны при попадании в организм человека.

Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой канцерогенной активности α -излучателей. В исследованиях [2] отмечается, что уран и его соединения относятся к сильнейшим протоплазматическим ядам, его токсичность может быть сравнима с сулемой. Трансурановые радионуклиды воздействуют на организм человека в первую очередь как токсичные химические вещества, а влияние их радиационных свойств становится заметно в более отдаленные сроки.

Химическая токсичность α -активных радионуклидов зависит от характера их поступле-

ния в организм человека, от физико-химических свойств, от особенностей метаболизма данного человека, от характера распределения радионуклидов в критических органах.

«Всасывание» урана в организме при различных путях поступления зависит от растворимости его соединений в биологических жидкостях. При хроническом поступлении урана с водой у взрослых людей в организме задерживается в среднем 1,1 %, а у подростков — 1,8 % суточного поступления [3].

Анализ допустимых концентраций некоторых α -активных радионуклидов в воде (табл. 1) показывает, что предельно допустимые содержания радионуклидов в воде составляют микроколичества [4].

Следовательно, одна из важнейших задач в решении проблем радиационной безопасности состоит в определении зараженности воды и почвы α -активными радионуклидами.

В настоящее время отсутствуют быстродействующие, легкие в управлении приборы для определения α -активной зараженности воды выше допустимых норм. Процесс идентификации α -активных радионуклидов включает сложную

Таблица 1

Допустимые концентрации некоторых радионуклидов в воде

Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$, лет	Критический орган	Допустимая концентрация радионуклида в воде, Бк/л
Уран-235	$7,04 \cdot 10^8$	Почки Кости Легкие ЖКТ	85,1 (1,02 мг/л)
Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$	Почки Кости Легкие ЖКТ	21,8 (1,8 мг/л)
Плутоний-239	24 000	Кости Легкие ЖКТ	81,4 ($3,5 \cdot 10^{-6}$ мг/л)



пробоподготовку, заключающуюся в экстракции радионуклидов, нанесении раствора на подложку, выпаривании растворителя, и дальнейшее определение радионуклида [3]. При этом точность измерений не лучше 25–30 %. Мы считаем возможным создать на основе известных хемилюминесцентных реакций достаточной простую методику определения равновесной концентрации перекиси водорода, образующейся при радиоллизе воды под действием α -излучения трансурановых радионуклидов в концентрациях, превышающих фоновые значения.

Известно [5], что при попадании α -активных радионуклидов в воду излучаемые ими частицы при прохождении через вещество теряют свою энергию сравнительно небольшими порциями на относительно малых расстояниях (< 1 мкм). Основным механизмом взаимодействия зараженных частиц с веществом является электромагнитное взаимодействие с электронами вещества (ионизация и возбуждение) и кулоновским полем ядра и электронов (тормозное излучение).

При радиоллизе воды ионизирующим излучением протекают три стадии — физическая, физико-химическая и химическая [6].

На физической стадии происходят только электронные процессы. После прохождения ионизирующей частицы к моменту времени $\sim 10^{-16}$ с в результате процессов ионизации и возбуждения в воде образуются сверхвозбужденные (H_2O^{**}) и возбужденные (H_2O^*) молекулы воды, ионы H_2O^+ , возбужденные ионы H_2O^{+*} , вторичные электроны.

Примерно с момента времени 10^{-14} с начинается физико-химическая стадия радиолиза, к концу которой ($10^{-12} - 10^{-11}$ с) в воде существуют гидратированные электроны (e_{aq}^-), OH^- , H_{aq}^+ , O и H .

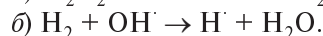
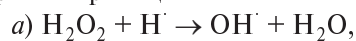
На химической стадии указанные выше частицы диффундируют от мест своего образования и реагируют друг с другом и растворенными веществами. В случае разбавленных растворов начало данной стадии обычно относится к 10^{-11} с. Сначала протекают преимущественно реакции частиц друг с другом, а с растворенными веществами — позднее (к моменту времени $\sim 10^{-7}$ с).

К моменту окончания реакций в шпорах в нейтральной воде находятся O , H , H_2O_2 , H_2 , OH^- , e_{aq}^- , H_{aq}^- , H_{aq}^+ .

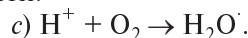
В случае излучений с большими значениями линейной передачи энергии — ЛПЭ — (в случае α -излучения) шпоры сразу после своего возникновения сливаются в сплошную цилиндрическую колонку. Это приводит к более высокой концентрации свободно-радикальных продуктов радиолиза воды в треках, что в свою очередь приводит к большему расходу этих продуктов для образования H_2O_2 и H_2 .

Следовательно, в случае α -излучения выходы молекулярных продуктов после завершения реакций в треках выше, а выходы свободно-радикальных продуктов ниже, чем для излучений с низкими величинами ЛПЭ.

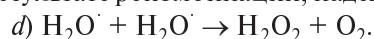
Еще в тридцатых годах XX века было показано [5], что даже весьма большие дозы рентгеновского излучения образуют в чистой воде лишь малые концентрации водорода и перекиси водорода ($\sim 10^{-16}$ моль/л), не меняющиеся с увеличением экспозиции. Это связано с наличием обратных реакций:



Введение кислорода (даже в следовых количествах) делает невозможной реакцию (a) из-за конкурентного захвата H в процессе (c), имеющем несравненно более высокую константу скорости:



Поэтому перекись водорода, образующаяся в результате рекомбинации, надежно защищена:



В случае α -излучения при радиоллизе воды перекись водорода образуется в значительно больших количествах, что обусловливается большей ионизирующей способностью α -частиц по сравнению с рентгеновским излучением.

Процесс накопления H_2O_2 в воде идет вплоть до полного удаления кислорода, что позволяет предложить для экспресс-контроля ее концентрации хемилюминесцентный метод. На рис. 1 показана зависимость $[\text{H}_2\text{O}_2] = f(D)$, где D — поглощенная доза ионизирующего излучения для деаэрированной и аэрированной воды.

Хемилюминесцентный метод анализа основан на явлении хемилюминесценции, которая возникает в результате химической реакции при смешении люминола с анализируемой пробой. Этот вид свечения не требует внешнего источника излучения, а возникает за счет энергии,

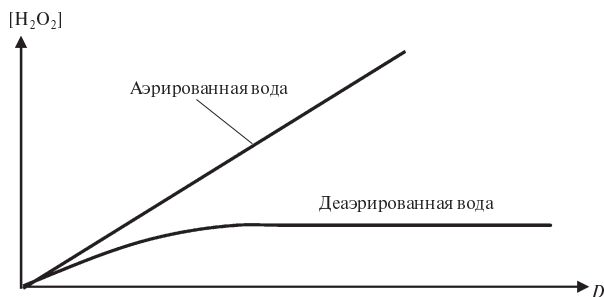
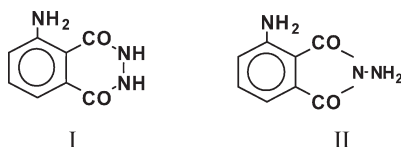


Рис. 1. Зависимость равновесной концентрации перекиси водорода от поглощенной дозы D

выделяющейся при протекании химических процессов.

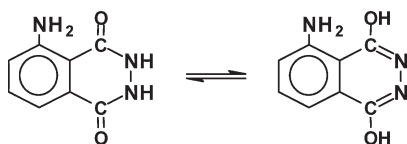
Чаще всего хемилюминесценцию сопровождают радикально-цепные реакции, в том числе окислительно-восстановительного характера.

В качестве хемилюминесцентных реагентов нами выбран наиболее часто используемый — люминол [7]. Он существует в виде двух изомеров — белого (I) и желтого (II):

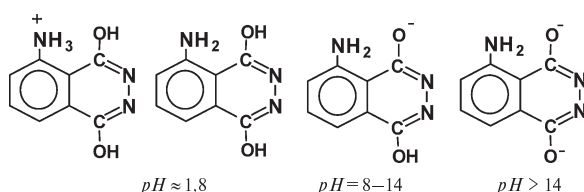


Белый изомер — это активная форма. При взаимодействии его щелочных растворов с перекисью водорода в присутствии катализаторов возникает яркая люминесценция в области 470 нм.

Люминол обнаруживает способность к кето-енольной таутомерии:

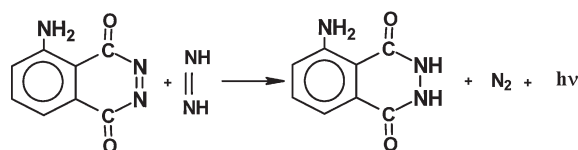
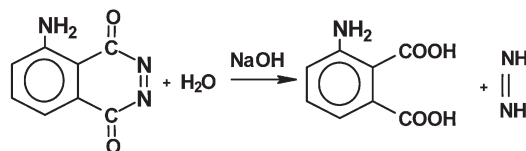
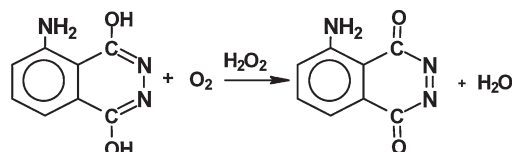


В зависимости от pH люминол может существовать в разных формах:



По мнению авторов [7], к флуоресценции способна молекулярная (вторая) форма, к хемилюминесценции — анионная (четвертая) форма.

Механизм хемилюминесценции люминола окончательно не установлен. Предложено несколько гипотез процесса его хемилюминесценции [8]. Так, например, по Альбрехту, процесс хемилюминесценции люминола обусловлен следующими тремя последовательно протекающими реакциями:

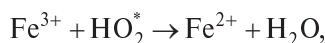


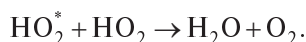
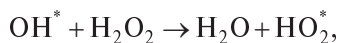
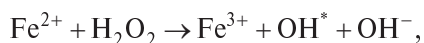
В процессе реакций молекула люминола как бы претерпевает ряд превращений, приводящих к накоплению энергии. Эта избыточная энергия, по-видимому, возбуждает продукты реакции, дезактивация которых происходит с выделением кванта света.

В свою очередь этот процесс возможен только при наличии катализатора, который является необходимым компонентом при хемилюминесцентной реакции, так как при взаимодействии очищенных от тяжелых металлов препаратов люминола и перекиси водорода хемилюминесценция вообще не наблюдается.

Наибольший выход хемилюминесценции наблюдается в реакциях люминола с перекисью водорода в присутствии органического катализатора — гемина (порфириновый комплекс железа), который присутствует практически в любом живом организме (табл. 2).

Авторы [7, 8] полагают, что железо, входящее в состав гемина, катализирует процесс разложения перекиси водорода по следующей схеме:





В результате образуется активный кислород, который вступает во взаимодействие с люминолом, сопровождающееся образованием кванта света с длиной волны $\lambda \approx 470$ нм.

Разработан способ определения световыхода люминольной реакции путем измерения фотоэмиссии на анализаторе жидких проб типа ЛИК-2 [9]. Принцип действия анализатора заключается в регистрации интенсивности хемилюминесценции, возникающей в результате реакции люминола с активным кислородом, который образуется при распаде перекиси водорода в присутствии гемина, являющимся катализатором последнего процесса.

В свою очередь, интенсивность хемилюминесценции прямо пропорциональна равновесной концентрации перекиси водорода в воде, которая, образуясь при радиолизе под действием α -излучения, может свидетельствовать о наличии трансурановых радионуклидов.

Следовательно, данный прибор позволяет без изменения в конструкции детектора отработать методику экспресс-анализа равновесной концентрации перекиси водорода в воде. Это, по нашему мнению, позволит проводить определение радионуклидов в пресной воде непосредственно на объектах контроля и в полевых условиях.

Таким образом, известные данные о механизме радиолиза воды под действием α -активных радионуклидов и накоплении перекиси водорода в совокупности с достаточно воспроизводимой хемилюминесцентной реакцией на основе люминола позволяют создать методику экспресс-анализа α -активных радионуклидов в пресной питьевой воде, а также экспериментально определить верхний и нижний концентрационный предел, обеспечивающий оптимальный световыход хемилюминесцентной реакции.

Нами была предпринята попытка на основе имеющихся данных о механизме радиолиза воды [5, 6] и достаточно известных хемилюминесцентных реакций [7, 8] исследовать временную зависимость накопления перекиси водорода в воде от концентрации α -активного радионуклида на примере нитрата урана-238.

Таблица 2

**Абсолютные выходы люминесценции люминола
в реакциях с различными катализаторами
в водной среде**

Катализатор	<i>pH</i>	Выход люминесценции, Эйншт/моль
[NaOCl]	11,6	$4,1 \cdot 10^{-4}$
$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	11	$(1-2) \cdot 10^{-4}$
$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_6$	8	$8,1 \cdot 10^{-3}$
Гемин	11,6	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$
$[\text{Co}]^{2+}$	10,3	$6,1 \cdot 10^{-3}$

Все измерения равновесной концентрации перекиси водорода в водных растворах азотно-кислого урана разной концентрации проводились с помощью хемилюминометра ЛИК-2. Перед началом анализа разведений нитрата урана в воде был построен градуировочный график зависимости величины измеряемого сигнала от концентрации перекиси водорода в воде. Уточненную концентрацию перекиси водорода также определяли с помощью тиосульфатной методики, основанной на титровании йода, выделившегося в результате окисления йодида калия H_2O_2 , тиосульфатом натрия.

Из полученного исходного раствора методом разбавления готовили разведения H_2O_2 в дистиллированной воде концентрацией от 10^{-9} до 10^{-3} М с интервалом в один порядок. Приготовленные растворы перекиси водорода анализировали на приборе ЛИК-2 с помощью люминол-геминового реактива (концентрация гемина в реактиве составляет 1 мг/л [8]). По окончании анализа всех приготовленных разведений перекиси водорода был построен градуировочный график (рис. 2) в координатах «величина сигнала (мкА) — концентрация перекиси водорода (моль/л)». Средняя приведенная погрешность измерений не хуже 15 %.

После построения градуировочного графика были приготовлены разведения нитрата урана в дистиллированной воде, предварительно насыщенной кислородом воздуха.

Из приготовленного исходного раствора нитрата урана готовили разбавления концентрацией от 10^{-7} до 1 моль/л с интервалом в 1/3 порядка. Разведения анализировались на хемилюмино-

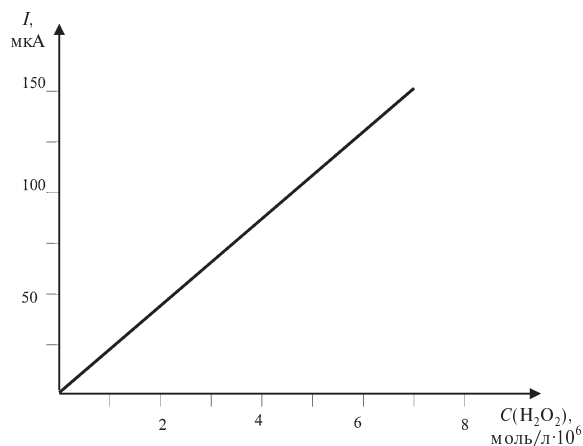


Рис. 2. Зависимость величины сигнала анализатора ЛИК-2 от концентрации C перекиси водорода в воде

метре ЛИК-2 по аналогии с разведениями перекиси водорода сразу после приготовления, через 1, 2, 5 и 10 часов.

Полученные результаты (табл. 3) показывают, что процесс накопления перекиси водорода в воде зависит от концентрации радионуклида и времени действия α -излучения на изучаемую систему. При этом определяемые количества перекиси водорода образуются при концентрации нитрата урана начиная с $1,9 \cdot 10^{-6}$ моль/л ($\sim 0,5$ ПДК U-238 в воде) и времени выдержки около 5 ч.

Максимальные значения равновесной концентрации H_2O_2 наблюдаются при концентрации $U(NO_3)_4 \sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. При увеличении концентрации нитрата урана наблюдается уменьшение световыхода реакции. Одной из воз-

можных причин концентрационного тушения световыхода катионом U^{4+} , на наш взгляд, может быть окислительно-восстановительная конкурентная реакция U^{4+} с перекисью водорода и уменьшение концентрации последней. Это накладывает ограничение предлагаемой методики по верхнему пределу активности в 200 ПДК.

График зависимости величины сигнала хемиллюминометра от удельной активности урана в воде представлен на рис. 3.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что в качестве детектора для анализа α -активной зараженности воды возможно применение хемиллюминометра ЛИК-2; точность предлагаемой методики не хуже 0,5 ПДК по радионуклиду U-238; продолжительность одного аналитического определения не превышает 5 мин.

Для количественного определения соединений урана в природных водах важное значение имеют формы нахождения данных соединений в воде. Из литературных источников известно [8], что уран относится к металлам переменной валентности. В водной среде наиболее устойчивыми соединениями этого элемента являются шести- и четырехвалентные формы. Четырехвалентная форма урана находится преимущественно в восстановленной среде, а в окисленной он существует в виде шестивалентной формы. В природных водах, имеющих нейтральную или слабокислую среду ($pH = 6,5-7,0$), насыщенную кислородом, уран находится в виде иона уранила (UO_2^{2+}). Последний способен образовывать комплексные соединения с анионами

Таблица 3

Результаты анализа растворов нитрата урана в воде

Концентрация нитрата урана, моль/л	Удельная активность урана, Бк/л	Величина сигнала, мкА, с начала разведения (в часах)				
		1 час	2 час	3 час	5 час	10 час
0,037	$1,1 \cdot 10^5$	Фоновые значения	Фоновые значения	Фоновые значения	фон	фон
$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^4$				фон	фон
$4,12 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^4$				фон	фон
$1,37 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^3$				11	13
$4,47 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^3$				16	17
$1,52 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^2$				160	162
$5,1 \cdot 10^{-5}$	150				105	108
$1,7 \cdot 10^{-5}$	50,0				60	62
$5,6 \cdot 10^{-6}$	16,7				33	35
$1,9 \cdot 10^{-6}$	5,6				10	13
$6,3 \cdot 10^{-7}$	1,9				фон	фон



различных кислот, которые хорошо растворимы в воде. Соли уранила устойчивы только в кислых средах, в нейтральных они способны гидролизаться, при этом скорость гидролиза возрастает в зависимости от степени разбавления. Известно [3], что гидролиз четырехвалентного урана протекает легче, чем шестивалентного, особенно в сильно разбавленных растворах. Гидратированный ион уранила ($\text{UO}_2(\text{UO}_3)\text{OH}^+$) в слабокислых средах существует в форме псевдоколлоида, который при $pH = 5,0-6,0$ перезаряжается и несет уже на себе отрицательный заряд. Такое образование способно формировать в воде в присутствии HCO_3^- и CO_3^{2-} отрицательно заряженные карбонатные комплексы типа $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ и $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$, устойчивые в интервале $pH = 7,5-10$. Закисление воды до $pH = 5,0-6,5$ приводит к разрушению карбонатных комплексов и образованию коллоидов гидроокиси уранила. Повышенная жесткость воды способствует образованию труднорастворимых солей уранила типа уранотоллита, бейлита и др.

Соли уранила могут взаимодействовать и с органическими соединениями (например, с гуминовыми кислотами), находящимися в водной среде, с образованием уранорганических соединений.

Таким образом, преобладание той или иной формы урана в водной среде будет определяться главным образом ее гидрохимическим составом, количеством и характером твердой взвеси, окислительно-восстановительным потенциалом и показателем кислотности среды.

Наиболее устойчивые водорастворимые соединения уранила в воде существуют при $pH = 2,0-4,2$. В этих условиях соли урана не подвергаются гидролизу и имеют наименьшую сорбционную активность по отношению к взвешенным примесным частицам [3].

Анализ физико-химического поведения урана в водных средах показывает, что экспрессный контроль природных вод на наличие в ней солей уранилов методически выгоднее проводить в сильноокислых средах ($pH = 2,0-4,2$), в которых основное количество урана находится в растворенном негидрализованном состоянии.

Как было отмечено выше, в водных растворах уран наиболее устойчив в состоянии окисления +6 в виде UO_2^{2+} , в меньшей степени для

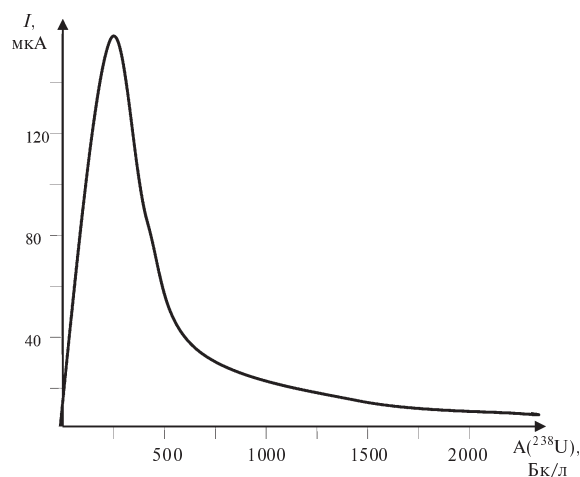


Рис. 3. График зависимости величины сигнала хемилюминометра от удельной активности урана в воде

него характерно состояние U^{4+} . В то же время в зависимости от состояния водной среды он может находиться даже в виде U^{3+} . Кроме того, уран в воде может существовать как ион UO_2^+ , однако это состояние редко наблюдается в природных водах из-за склонности солей урана к диспропорционированию и гидролизу в слабокислых и слабощелочных средах.

Водные растворы U^{3+} неустойчивы и реагируют с водой, образуя водород и U^{4+} . Качественные данные, основанные на измерении pH растворов U^{3+} , указывают, что гидролиз этих ионов протекает по тому же механизму, что и для положительного трехзарядного иона. Для U^{4+} , подвергающегося интенсивному гидролизу, как и для U^{3+} , обнаружено существование негидролизированных форм U^{4+} , гидролиз которых протекает в пять основных стадий [10].

В работе [3] показано, что состояние уран V является промежуточной формой в процессах фотохимического окисления урана IV. В водных растворах фотоактивированные ионы урана взаимодействуют с углеводородами и рядом родственных соединений, при этом уран VI восстанавливается до урана IV. Такой механизм подтверждается экспериментально при фотохимическом восстановлении UO_2^{2+} до урана V с последующим диспропорционированием на U^{4+} и UO_2^{2+} .

По данным работы [11] константы кислотной диссоциации UO_2^+ составляют менее 10^{-3} .

Подобная степень гидролиза уранила соответствует константе гидролиза для большого положительного однозарядного иона урана.

Наиболее устойчивым состоянием в водных растворах является уран U^{6+} . Растворы солей уранила имеют кислую реакцию. В водных растворах солей уранила растворяются большие количества UO_3 , при этом резко повышается электропроводность, особенно в очень разбавленных растворах. Для объяснения этих фактов в работе [10] предполагается, что в разбавленных растворах уранила формируются полимерные частицы типа $UO_2(UO_3)^{2+}$.

Авторами данной работы показано, что наряду с положительными полимерными образованиями в воде присутствуют и отрицательно заряженные полимерные частицы $U_3O_8(OH)_3^-$ и $U_3O_8(OH)_4^{2-}$, константы устойчивости которых составляют $(2-3) \cdot 10^{-4}$.

Образование полимерных комплексов подтверждено в работе [11]. На наш взгляд, образование полимерных комплексов урана в воде вызвано процессами ассоциирования молекул воды вблизи иона урана, что подтверждается также результатами работы [12].

Важная роль в фазовых состояниях урана в воде отводится комплексным соединениям шестивалентного урана. Известно [3], что UO_2^{2+} образует комплексы с очень многими анионами,

при этом лиганды образуют с ураном комплекс, для которого координационное число в соединениях больше шести.

В работе [12] на основе изучения процессов экстракции UO_2^{2+} 2-теноилфтороацетоном в присутствии различных анионов рассчитаны константы устойчивости комплексов уранила в водных средах и показано, что наиболее устойчив комплекс уранила с сульфат-анионом $UO_2(SO_4)_2^{2-}$, который при $pH < 2,5$ имеет состав $UO_2(SO_4)_3^{4-}$, а при $pH > 2,5$ — гидролизованную форму $U_2O_5(SO_4)_3^{4-}$. Константы устойчивости остальных комплексных соединений урана уменьшаются в порядке $UO_2SO_4 > UO_2Cl_2 > UO_2(NO_3)_2 > UO_2F_2$. Комплексные соединения урана, образованные слабыми кислотами (H_2CO_3 , H_2SiO_3 и т. д.), неустойчивы и способны распадаться при подкислении.

По данным работы [3] при значении водородного показателя воды $pH = 2,5-3,0$ уран практически полностью находится в неассоциированном состоянии UO_2^{2+} .

Таким образом, в сильнокислых водных растворах уран может находиться в четырех состояниях окисления: U^{3+} , U^{4+} , U^{5+} , U^{6+} .

В последние годы в научной литературе появились данные, что вода имеет гетерогенный состав, в котором в качестве твердой фазы выступает ее ассоциированное (связанное) состояние [13], формируемое особыми двумерными структурами аллотропных форм льда.

В работе [14] приведены данные исследований по ассоциации молекул воды в водно-солевых и водно-органических растворах; показано, что в солевых растворах ионы растворенного вещества находятся на поверхности связанных состояний воды. Это позволяет предположить, что ионные переходы урана в водной среде вызваны фазовой перестройкой в ассоциированных состояниях воды. В то же время в пределах фазового перехода имеет место локальное изменение диэлектрических и электрохимических параметров, которые могут оказывать влияние на растворитель — ассоциированную воду, вызывая распад связанного состояния. Эти процессы должны сопровождаться генерацией АФК в растворе и приводить к увеличению содержания пергидроксильных ион-радикалов $HO^2-(*).$

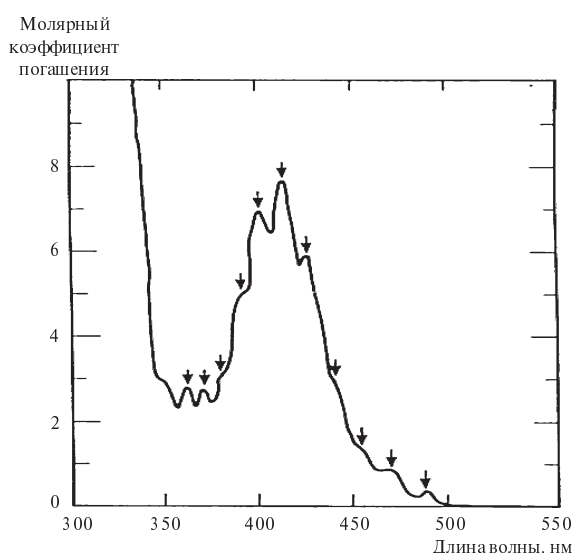


Рис. 4. Тонкая структура спектра оптического поглощения уранил-ионов UO_2^{2+} в 1 М $HClO_4$

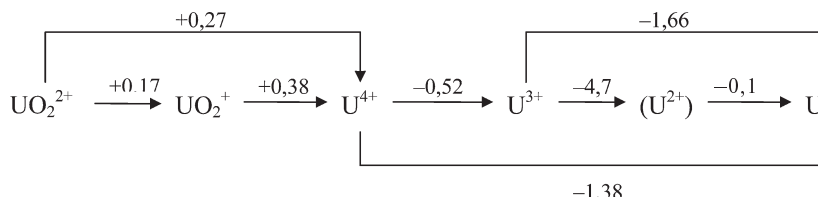


Рис. 5. Стандартные восстановительные потенциалы ионов урана в кислых ($pH = 0$) водных растворах (величины указаны в вольтах относительно стандартного водородного электрода)

По данным работы [10] в спектре с тонкой структурой UO_2^{2+} (рис. 4), помимо основной полосы поглощения (максимум ~ 410 нм), имеется ряд экстремумов, связанных с переходом урана из одной ионной формы в другую, что обусловливается электронными переходами между отдельными энергетическими уровнями. На рис. 5 приведены потенциалы переходов урана одной ионной формы в другую в кислых средах.

Таким образом, изменение энергетических параметров среды в точках фазовых переходов ионов урана приводит к трансформации одной ионной формы в другую вследствие перестройки в ассоциатах воды; в результате данного процесса в водной среде генерируются активные формы кислорода. При этом в водных растворах урана должно наблюдаться резкое повышение концентрации свободных радикалов и ион-радикалов, связанных с фазовыми переходами II

рода в исследуемых растворах (перестройка поверхностных стабилизирующих слоев ассоциатов воды).

Следовательно, на формирование фазовых состояний урана в воде влияет изменение водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала среды, флуктуация ионной силы в водной среде. В точках фазового перехода, как следует из тонкой структуры спектра UO_2^{2+} , происходит резкое (нелинейное) изменение физико-химических параметров водной среды, что приводит к изменению содержания активных форм кислорода в воде. В результате в точке фазового перехода наблюдается увеличение содержания активных форм кислорода, что делает возможным при достаточной простой пробоподготовке определять количественное содержание урана в воде хемилюминесцентным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухоненченко, Д.С. Изменение естественного радиационного фона в пределах урбанизированных и промышленных комплексов [Текст] / Д.С. Сухоненченко // Экологические системы и приборы.— 2008. № 2.— С. 22–25.
2. Ядерная энциклопедия [Текст].— М.: Изд-во «Благотворительный фонд Ярошинской», 1996.— 656 с.
3. Бекман, И.Н. Уран [Текст]: учебное пособие / И.Н. Бекман.— М.: МГУ, 2009.— 300 с.
4. Справочник помощника санитарного врача и помощника эпидемиолога [Текст] / Под ред. Д.П. Никитина, А.И. Заиченко.— М.: Медицина, 1990.— 512 с.
5. Аллен, А.О. Радиационная химия воды и водных растворов [Текст] / А.О. Аллен / Пер с англ. под ред. П.И. Долина.— М.: Атомиздат, 1963.— С. 203.
6. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиолит жидкостей и газов [Текст] / А.К. Пикаев.— М.: Наука, 1986.— С. 440.
7. Головина, А.П. Химический люминесцентный анализ неорганических веществ [Текст] / А.П. Головина, Л.В. Левшин.— М.: Химия, 1978.— С. 248.
8. Биохемилюминесценция [Текст] / Под ред. А.И. Журавлева. М.: Наука, 1983.— С. 345.
9. Гаврилов, А.В. Хемилюминесцентное определение цианид-ионов [Текст] / А.В. Гаврилов [и др.] // Журнал аналитической химии.— 2005. Т. 60, № 11.— С. 1157–1163.
10. Химия актиноидов: в 3 томах [Текст]: Т. 1 / Пер. с англ.; Под ред. Дж. Каца, Г. Сибборга, Л. Морсса.— М.: Мир, 1991.— С. 525.
11. Виноградов, А.П. Аналитическая химия урана [Текст] / А.П. Виноградов.— М.: Изд-во АН СССР, 1962.— С. 433.
12. Аналитическая химия урана и тория [Текст] / Под ред. К.Дж. Роддена.— М.: Изд-во ино-

странной литературы, 1956.— С. 336.

13. Вода— космическое явление [Текст] / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАЕН.— М.: Изд-во РАЕН, 2002.— С. 427.

14. Ло, Ш. Наноструктуры в очень разбавленных водных растворах [Текст] / Ш. Ло, В. Ли // Российский химический журнал.— 1999.— Т. 43, № 5.— С. 40–48.

УДК 543.52.054:546.791:556.53

В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ УРАНИЛОВ

Аварии на АЭС и все более широкое использование ядерно-энергетических установок на промышленных объектах вызывают необходимость создания системы контроля радиоактивных элементов в окружающей среде как в районах самих объектов, так и на прилегающих территориях.

Современные требования экологической и радиационной безопасности объектов, входящих в состав ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), обуславливают необходимость повышенного внимания к контролю миграции и утечек высокотоксичных урановых соединений.

Для урана и его соединений, обладающих высокой токсичностью, характерна способность к миграции в объектах окружающей среды и к аккумуляции в почвах, иловых отложениях. Возможно загрязнение больших площадей окружающей среды, особенно при аварийных ситуациях на объектах, содержащих ядерно-энергетические установки (ЯЭУ). Для отслеживания путей миграции этих соединений требуется создание экспрессных методов их контроля в природных водах. Данная задача весьма актуальна в современных условиях, так как решает проблему безопасности населения в районах расположения ЯЭУ.

Имеется достаточная приборная база, позволяющая проводить высокочувствительный контроль наличия урана в объектах окружающей среды, однако существующие методы анализа урана сложны и длительны по времени выполнения [1]. Кроме того, данные методы не позволяют количественно определять содержание урана

непосредственно на месте загрязнения и требуют доставки проб в лабораторию. За время транспортировки и хранения пробы ее химический состав в результате адсорбционных и окислительно-восстановительных процессов меняется, что приводит к получению недостоверных данных о степени загрязнения природных вод. В связи с этим понятна актуальность создания полевого экспрессного метода оценки радиационного загрязнения окружающей среды, прежде всего — воды как среды, способствующей наиболее быстрому распространению радиоактивного заражения местности.

Известно [2], что действие ионизирующих излучений на воду приводит к формированию в ней перекисных соединений, при этом величина наработки перекиси пропорциональна содержанию в ней радионуклидов. Для определения образующихся в воде кислородных соединений разработан высокочувствительный анализатор жидких проб типа «ЛИК» [3], позволяющий проводить количественное измерение этих соединений *in situ* с высокой чувствительностью и специфичностью за время анализа не более 5 мин. Высокая чувствительность прибора связана с использованием в нем хемилюминесцентного метода определения, который позволяет обнаруживать кислородные соединения в воде с концентрацией 10^{-12} моль/л. В ряде последних работ по изучению структуры воды показано, что вода — неоднородная среда, представляющая собой двухфазную систему из объемной и ассоциированной (связанной) воды, а изменение параметров химической системы приводит к фазо-



вым превращениям в ассоциированной воде [4]. В момент фазового перехода система нестабильна и в воде могут генерироваться активные формы кислорода. По их концентрации можно судить о наличии в исследуемых растворах соединений металлов переменной валентности, к которым относится и уран.

Известно [5], что в водных растворах под действием различных факторов происходят процессы генерации АФК с последующим их диспропорционированием в перекись водорода. При этом в работе [6] указано, что в водной среде генерация кислородных форм радикалов осуществляется по трем основным каналам: фотохимическому, радиационно-химическому и каталитическому.

Фотохимический процесс генерации свободных радикалов в воде происходит при поглощении водной средой солнечного излучения, которое приводит к возбуждению молекул воды, инициирующих затем вторичные реакции образования ион-радикалов ($\text{O}_2^{-(*)}$, $\text{HO}_2^{-(*)}$), свободных радикалов (H^* , OH^* , O^*) и молекул (H_2 , H_2O_2). Скорость и характер фотохимических реакций зависит от длины волны излучения.

Радиационно-химический канал генерации перекиси водорода связан с передачей энергии ионизирующего излучения молекулам воды. Как и при фотохимических процессах, в результате радиолиза воды за счет возбуждения молекулы в среде образуются радикалы, приводящие к формированию ионных пар электронов и ионов, которые затем генерируют новые свободные радикалы и атомы. Радиохимические процессы определяются общим количеством поглощенной энергии. Начальные процессы, протекающие под действием ионизирующих излучений, приводят к одновременному образованию заряженных и незаряженных частиц (свободных радикалов и ион-радикалов).

Так, еще в 30-х годах было установлено [2], что при попадании радионуклидов в воду ионизирующее излучение (ИИ) теряет энергию сравнительно небольшими порциями на относительно малых расстояниях (менее 1 мкм). Основным механизмом взаимодействия ИИ с молекулами воды является электромагнитное взаимодействие с электронами вещества (ионизация и возбуждение) и кулоновским полем ядра и электронов (тормозное излучение).

Радиолиз воды протекает в три стадии - физическая, физико-химическая и химическая [2].

На физической стадии после прохождения ионизирующей частицы к моменту времени $\sim 10^{-16}$ с в результате процессов ионизации и возбуждения в воде образуются сверхвозбужденные ($\text{H}_2\text{O}^{(**)}$) и возбужденные ($\text{H}_2\text{O}^{(*)}$) молекулы воды, ионы H_2O^+ , возбужденные ион-радикалы $\text{H}_2\text{O}^{+(*)}$ и вторичные электроны.

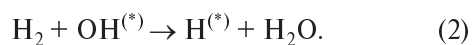
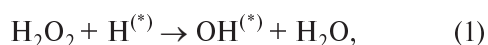
Примерно с 10^{-14} с начинается физико-химическая стадия радиолиза, к концу которой (10^{-12} – 10^{-11} с) в воде существуют гидратированные электроны (e_{aq}^-) и радикалы $\text{OH}^{(*)}$, $\text{O}^{(*)}$ и $\text{H}^{(*)}$.

На химической стадии указанные выше частицы диффундируют от мест образования и реагируют друг с другом и растворенными веществами. В случае разбавленных растворов начало данной стадии обычно относится к 10^{-11} с. В начальный момент протекают преимущественно реакции частиц между собой, а с растворенными веществами — только к моменту времени $\sim 10^{-7}$ с.

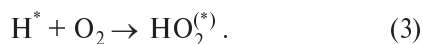
При излучениях с большими значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ) (например, α -излучения) шпоры сразу после возникновения сливаются в сплошную цилиндрическую колонку. Это приводит к более высокой концентрации свободно-радикальных продуктов радиолиза воды в треках, т. е. увеличивает расход этих продуктов на образование H_2O_2 и H_2 .

Следовательно, при α -излучении в результате химических превращений выходы молекулярных продуктов реакции в треках выше, чем свободно-радикальных продуктов, формируемых в результате излучений с низкими величинами ЛПЭ.

В работе [2] показано, что действие даже весьма больших доз рентгеновского излучения на чистую воду приводит к образованию низких концентраций водорода и перекиси водорода ($\sim 10^{-16}$ моль/л), которые не изменяются с увеличением экспозиции облучения. Это вызвано наличием в системе реакций, приводящих вновь к образованию воды и свободных $\text{OH}^{(*)}$ и $\text{H}^{(*)}$ радикалов:



Введение кислорода (даже в следовых количествах) делает невозможной реакцию (1) из-за конкурентного захвата $H^{(*)}$ в процессе, имеющем значительно более высокую константу скорости:

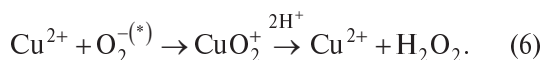
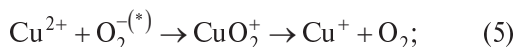


Большая часть перекиси водорода образуется в результате рекомбинации $HO_2^{(*)}$ -радикала:

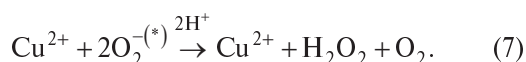


Образование перекиси водорода по каталитическому направлению осуществляется с участием ионов металлов переменной валентности. Примером каталитических процессов в водной среде может служить инициирование супероксидных ион-радикалов $O_2^{(*)}$ при наличии в ней ионов меди в присутствии органических лигандов [5]. При этом молекулы воды, претерпевая диспропорционирование на ионах металла переменной валентности, приводят к образованию молекул кислорода и перекиси водорода.

Считается, что реакция диспропорционирования протекает по двум направлениям с промежуточным образованием кислородного комплекса и иона металла в восстановленной форме:



Возможно также взаимодействие $O_2^{(*)-}$ с CuO_2^{+} как с комплексом за счет частичного переноса заряда [5]:



В последние годы при изучении влияния внешних излучений на водные растворы уранила было обнаружено, что в воде формируются активные формы кислорода и нарабатываются значительные количества H_2O_2 . Так, в работе [7] при облучении азотным лазером, ртутной или ксеноновой лампой, а также видимым светом растворов уранила в 0,01–4,0 М H_2SO_4 , $HClO_4$ или в 0,1–1,0 М Na_2SO_4 , $NaClO_4$ в присутствии «не-

насыщенного» гетерополивольфрамата калия (ГПВК) — $K_{10}P_2W_{17}O_{61}$ или $K_8SiW_{11}O_{39}$ — происходит образование иона четырехвалентного урана U^{4+} . Одновременно в растворе появляется H_2O_2 . Квантовый выход реакции возрастает с повышением кислотности и солевого состава водных растворов. Авторами показано, что при использовании светового потока с $\lambda = 337,1$ нм в азированных растворах 1 М H_2SO_4 и 1 М $HClO_4$ квантовый выход U^{4+} близок к $(1,5 - 2,0) \cdot 10^{-3}$. Многодневное облучение урановых водных растворов с $pH \approx 4$ приводит почти к количественному переходу UO_2^{2+} в U^{4+} . При фотооблучении растворов в отсутствие ГПВК зарегистрировать U^{4+} не удалось, хотя пероксид-ион в растворе обнаружен.

Анализ известных способов образования кислородных радикальных форм в водных системах показывает, что они имеют эндотермический характер, а реакция прямого окисления воды растворенным кислородом крайне затруднительна. Это обусловлено высоким энергетическим барьером ($Q = -47$ ккал/моль) и высокой энергией активации данной реакции ($E_a > 50$ ккал/моль) [8].

Опубликован ряд работ о возможности генерации в воде супероксидного ион-радикала $O_2^{(*)-}$ и гидроксильного радикала OH), которые формируются по неизвестным ранее каналам генерации перекиси водорода. Так, авторы работ [8, 9] выдвинули гипотезу о возможности диссоциации воды в жидкой фазе под действием механической энергии с малой удельной плотностью. При этом механические деформации структуры воды (сдвиги, растяжения) приводят к реакциям между образовавшимися радикалами. Можно предположить, что диссоциация воды при механической обработке является следствием коллективных эффектов перестройки ассоциатов воды, подобно тому, как это происходит в механохимии полимеров и их растворов. Известно [9], что вода (от 0 до +65 °С) по сумме признаков классифицируется как динамически нестабильная полимерная (ассоциированная) система, для которой характерны кооперативные явления. Диссоциация воды вследствие механической обработки была подтверждена и в опытах, когда через воду пропусклся звук (докавитационной интенсивности) или вода протекала через фильтры (течение Пуазейля).



Химическая неустойчивость воды при таянии, а также в конденсированной фазе после ее испарения в вакууме исследовалась в работе [10]. Протекание процесса фиксировалось по изменению содержания образующегося пероксида водорода ($\text{C}_{\text{H}_2\text{O}_2}$) как наиболее устойчивой АФК.

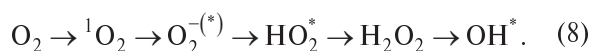
В результате проведенных исследований во всех образцах талой и переконденсированной в вакууме воды обнаружено значительное увеличение содержания H_2O_2 , которое не зависит от степени освещенности. Была также выявлена зависимость, связанная с монотонным уменьшением концентрации H_2O_2 при увеличении температуры воды в процессе испарения. Показано, что с увеличением температуры эффективность механохимической диссоциации воды уменьшается, что, вероятно, вызвано структурной перестройкой свойств ассоциатов воды при нагреве. Когда температура выше $+65^\circ\text{C}$, т. е. ассоциированная часть воды более плотная, при анализе конденсата практически не обнаружено H_2O_2 , что, вероятно, вызвано упрочнением связей между молекулами H_2O_2 и кристаллической частью H_2O .

Перекись водорода в химических превращениях воды при определенном соотношении возникает в реакциях рекомбинации, поэтому характер данного процесса определяется рядом факторов, в том числе диффузионными. Следовательно, содержание H_2O_2 может служить энергетической мерой протекания реакций при фазовых переходах. Структура воды по данным [8] сильно дефектна, а дефектность ее возрастает при фазовых переходах, поэтому, наряду с дефектами места (вода в междоузлиях, вакансии воды), молекулярно-поверхностными и ионными, в воде возникают нейтральные дефекты (гидратированные H^* и OH^*), рекомбинация которых приводит к образованию молекулярного водорода и пероксида водорода.

Образование H_2O_2 под действием механохимической диссоциации может служить доказательством формирования определенных уровней концентрации H_2O_2 в воде. Однако следует отметить, что основным классическим механизмом, объясняющим существование H_2O_2 во льдах и в снеге на Земле, а также в аэрозольной составляющей атмосферы, в настоящее время принято считать фотодиссоциацию воды.

Теми же авторами [10] были проведены исследования влияния акустических полей низкой интенсивности и СВЧ-излучения на воду. В результате исследований было показано, что образование перекиси водорода и активных форм кислорода при действии звуковых колебаний на воду происходит в докавитационном режиме. При облучении воды электромагнитным полем на частотах 2,5 и 10 ГГц зафиксированы всплески концентрации H_2O_2 , что указывает на диссоциацию воды под действием электромагнитной волны с образованием радикалов H^* и OH^* за счет поглощения СВЧ-излучения водной средой.

Изучение образования активных форм кислорода под действием теплового поля проводилось в работах [11, 12], когда под действием тепла на водные растворы дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК) наблюдалось их повреждение. В этих условиях ДНК претерпевала односторонние разрывы гликозидных связей с преимущественным освобождением пуринов и дезаминирование цитозина. Анализ результатов работы [12] привел авторов к выводу о возможности индуцирования активных форм кислорода в воде тепловым полем и в отсутствие ДНК. В результате изучения процессов генерации перекиси водорода в 10^{-3} М фосфатном буфере ($\text{pH} = 6,8$) под действием тепла было установлено, что данный процесс происходит в результате тепловой активации растворенного в воде атмосферного кислорода и представляет собой последовательность реакций образования активных форм кислорода вследствие его восстановления, образования синглетного кислорода, супероксид-радикалов, перекиси водорода, гидроксильных радикалов:



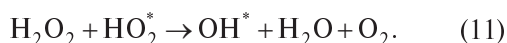
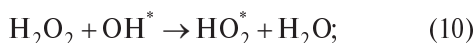
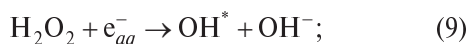
При этом уровень H_2O_2 в дополнительно насыщенный кислородном буфере возрастает примерно в 1,8 раза и уменьшается приблизительно в 2 раза в среде азота или аргона. На основании проведенных исследований было высказано предположение, что предшественником образования H_2O_2 является синглетный кислород ${}^1\text{O}_2$, из которого образуется супероксидный радикал, а донорами электронов — примесные ионы металлов переменной валентности (железо, медь), присутствующие в фосфатном буфере. В данном процессе образование перекиси водорода при

нагревании носит колебательный характер, что указывает на неравновесный механизм наработки пероксидного радикала.

В работе [12] показано, что образование H_2O_2 происходит эффективно и в бидистиллированной воде, насыщенной воздухом, при изменении кислотности среды. Так, увеличение pH приводит к увеличению концентрации перекиси водорода в воде, что, по мнению авторов, обусловлено образованием молекул H_2O_2 не из молекул растворенного кислорода, а из гидроксильных ионов через дисмутацию гидроксильных радикалов.

Схематически механизм наработки перекиси водорода под действием тепла представлен на рис. 1. Авторы также отмечают, что в реакции спонтанной дисмутации $\text{O}_2^{-(*)}$ возникает кислород в электронно-возбужденном синглетном состоянии, который способствует развитию цепного процесса формирования перекиси водорода за счет присоединения к молекуле H_2O_2 гидратированного электрона с образованием супероксид-анион-радикала.

Кинетика образования H_2O_2 в чистой воде носит квазиколебательный характер, что связано с механизмом разложения H_2O_2 при определенных условиях:



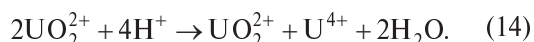
Таким образом, в работе [12] экспериментально показано, что в воде, насыщенной воздухом, под действием тепла формируются все основные виды активных форм кислорода: $^1\text{O}_2$, $\text{O}_2^{-(*)}$, HO_2^* , H_2O_2 и OH^* . По мнению авторов, это дает основание предположить, что при радиоли-

зе воды возможно образование тех же форм радикальных образований, что и в результате теплового воздействия. В то же время в результате действия ионизирующих излучений в водной среде возможно образование гидратированного электрона, атомарного и молекулярного водорода по реакциям



Однако данный подход — проблематичный, так как не отвечает на вопрос, откуда при одноактном взаимодействии излучения с одиночными молекулами возникают высокие значения квантозахваченной энергии, которой не обладает тепловая энергия. В то же время существует альтернативный подход к исследованию механизма генерации перекиси водорода, связанный с кооперативным поведением совокупности ионов, имеющих сопряженные связи с ассоциированными структурами воды и характеристичными однополярными зарядами [4].

Известно [13], что переход одной ионной формы урана в другую сопровождается передачей электрона:



В работе [14] на основе изучения структуры межмолекулярных водородных связей, формирующихся в процессе комплексообразования в водных и органических системах, авторы показали, что подобные связи могут образовываться как за счет формирования анионных самоассоциатов (алифатические спирты), так и за счет свободных ионных пар (фенолы). Кроме того, в результате исследований установлено влияние электронного распределения в структуре вещества на образование водородной связи, особенно в сложных полимерных матрицах, а констан-

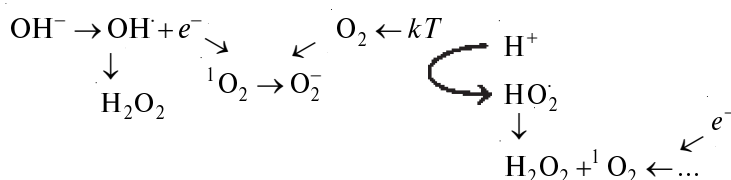


Рис. 1. Схема совокупности реакций, происходящих при образовании H_2O_2 под действием тепла



та роста полимерной цепи определяется составом водноорганических смесей, точнее, концентрационным распределением в ней компонентов. Таким образом, введение в равновесную систему примесей изменяет в ней электронное распределение, переводя систему в неравновесное состояние. В результате этого процесса в системе возникают новые ассоциированные состояния (структурированные), возбуждение которых приводит к появлению в водной среде активных форм кислорода.

Наличие структурообразования в водных системах подтверждается и в работе [15], в которой исследовалась электропроводность разбавленных растворов неорганических соединений (NaCl и KCl) и органических, содержащих аминокислоты. Авторами показано, что в основе формирования частотного спектра водного раствора соединения лежит спектр самой воды. При этом в зависимости от введенного в нее соединения возникают осцилляционные пики в разных частотных областях (низкие концентрации). Повышение содержания вещества в пробе вызывает как возрастание основных осцилляционных пиков, так и появление новых, что связано с наличием примесей в составе основного соединения. В то же время введение в водный раствор соединения другого вещества приводит к сдвигу осцилляционных пиков основного соединения в более высокую частотную область, т. е. появление нового соединения в воде как бы «занимает в растворе свою нишу», вытесняя (или сжимая) ранее находившиеся в нем соединения, создавая для них более узкие частотные области (рис. 2).

В работе [4] авторами предложена кластерная модель воды, в основу которой положены нематически связанные состояния воды (ион-кристаллические ассоциаты). Согласно данной теории между нематической частью и поверхностной пленкой ассоциата находится структурированная жидкость с плоскими доменами кубического или тетрагонального льда, стабилизированными структурным давлением адсорбированной жидкости.

Согласно работе [4] ассоциаты, принадлежащие различным фазам кристаллического состояния воды, отличаются диэлектрическими характеристиками, а их ван-дер-ваальсово взаимодействие проявляется как притяжение для

спектрально подобных молекул вводимого в жидкость вещества. В свою очередь, наличие сил притяжения для протоноакцепторных веществ у ассоциата положительной полярности и протонодонорных свойств — у ассоциата отрицательной полярности создает условия для направленной диффузии веществ в соответствии со знаком их дальнего действия взаимодействия. Следовательно, разрешенные направления диффузии веществ в полярной жидкости — это направления к центральной части нематика и вдоль границ нематика ассоциата. Посредством дальнедействующих сил в системе постоянно устанавливается неоднородное распределение растворяемых в жидкости веществ. При этом структурированные слои, содержащие кристаллическую фазу, ведут себя как центры адсорбции, создавая избыточное насыщение растворяющимися веществами относительно свободной жидкости.

Введение в структурированные слои веществ иной природы по сравнению с молекулами воды сопровождается изменением потенциалов межмолекулярного взаимодействия, что вызывает изменение параметров дальнего действия взаимодействия, а следовательно, термодинамического и структурного равновесия. Так, при введении сильных электролитов структурированность сильно уменьшается, а при добавлении в воду поверхностно-активных веществ, наоборот, увеличивается. Появление в воде соединений урана приводит, как и при добавлении поверхностно-активных веществ (ПАВ), к повышению ее структурируемости. В то же время наличие в водной среде ПАВ, как и металлов переменной валентности, вызывает изменение физико-химических характеристик среды ассоциатов, что в свою очередь способствует их перестройке и усилению процесса наработки активных форм кислорода в воде. Следовательно, ассоциированные состояния в воде и водных растворах обладают особыми электрофизическими свойствами. В работе [4] предполагается, что процессы перезарядки ионов как в самом ассоциате, так и между ассоциатами осуществляются посредством туннелирования электронов, носящего кооперативный характер. Это означает, что обмен электронами между макроскопическими структурами ассоциатов может рассматриваться как перенос магнитной энергии.

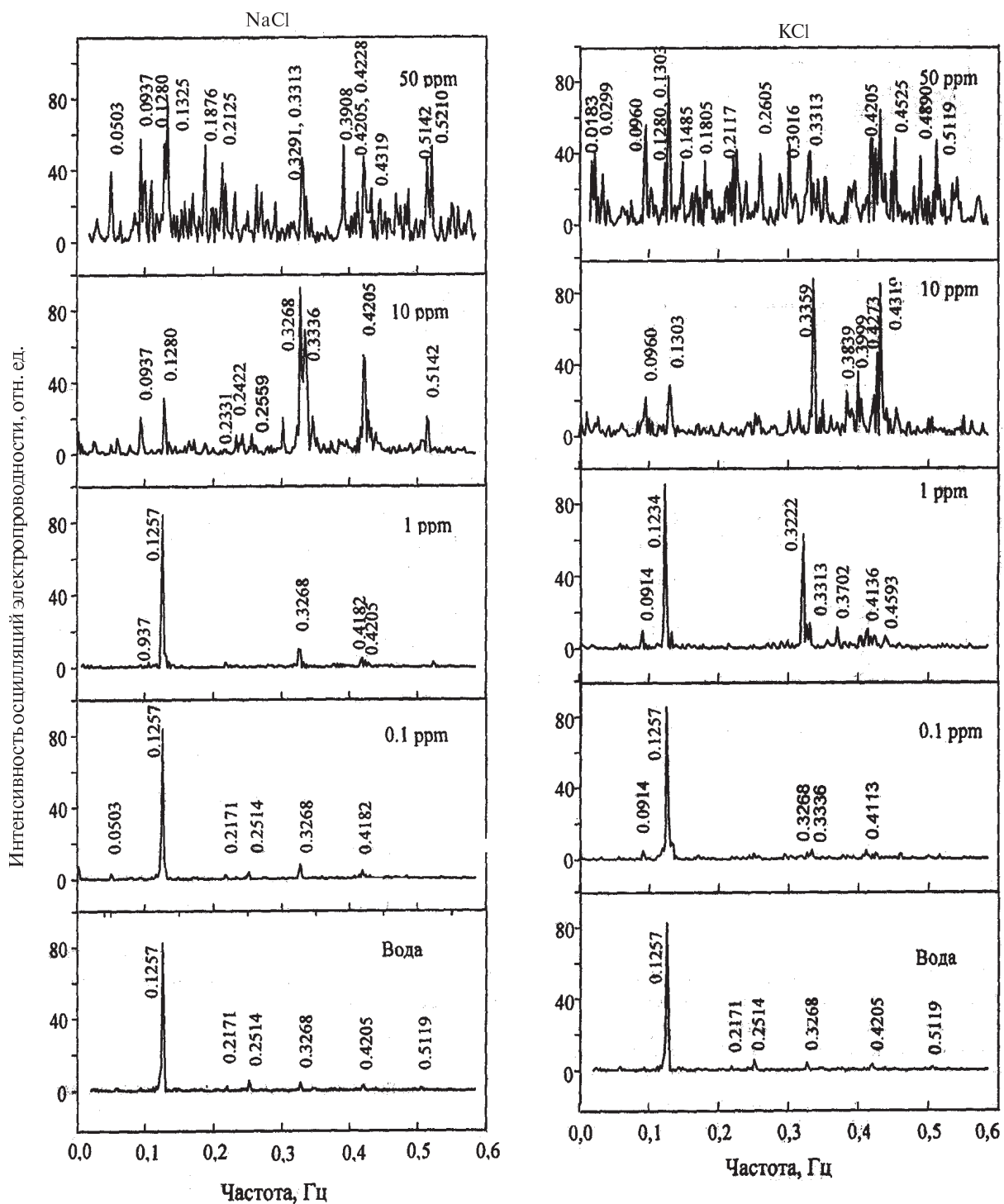


Рис. 2. Частотные спектры осцилляций электропроводности разбавленных растворов NaCl и KCl



Таким образом, анализ возможных механизмов генерации активных форм кислорода в воде показывает, что существующие классические представления, основанные на прямых химических образованиях (фотохимический, радиационно-химический и каталитический каналы генерации радикалов), при описании не учитывают возможность наработки радикальных форм за счет процессов фазовой трансформации связанной воды. Однако, как следует из изложенного выше, формирование активных форм кислорода под действием изменения внешних физических полей в ряде случаев приводит к усилению степе-

ни их наработки в водной среде. При этом величина концентрации активных форм кислорода, возникающих вследствие фазовой перестройки ассоциатов, во много раз превосходит значение величины содержания радикальных форм, получаемых по классическим химическим механизмам генерации. Таким образом, для оценки влияния структурно-физических неустойчивостей ассоциатов среды на самоиндукцию активных форм кислорода необходимо исследовать механизм данного процесса и выявить наиболее информативные показатели, указывающие на наличие в воде соединений урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман, И.Н. Уран [Текст]: учебное пособие / И.Н. Бекман. — М.: Изд-во МГУ, 2009. — 300 с.
2. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Радиоллиз жидкостей и газов [Текст] / А.К. Пикаев. — М.: Наука, 1986. — С. 440.
3. Гаврилов, А.В. Хемилюминесцентное определение цианид-ионов [Текст] / А.В. Гаврилов [и др.] // Журнал аналитической химии. — 2005. Т. 60, № 11. — С. 1157–1163.
4. Вода — космическое явление [Текст] / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАЕН. — М.: Изд-во РАЕН, 2002. — С. 427.
5. Эрнестова, Л.С. Образование и превращения свободных радикалов OH^* и $\text{O}^{2-}(*)$ в природных водах [Текст] / Л.С. Эрнестова, Ю.И. Скурлатов // ЖФХ. — 1995. Т. 69, № 7. — С. 1159–1166.
6. Шамб, У. Перекись водорода [Текст]: пер. с англ. / У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, Р. Вентворс / Под ред. А.И. Горбанева. — М.: Иностран. лит., 1958. — 578 с.
7. Юсов, А.Б. Восстановление фотовозбужденного уранила водой. Сообщение 1: Образование U^{IV} и H_2O_2 [Текст] / А.Б. Юсов, В.П. Шилов // Известия АН. Сер. «Химическая». — 2000. № 2. — С. 282–287.
8. Гуринов, Ю.В. Природная вода как окислительная среда [Текст] / Ю.В. Гуринов, Н.И. Бондаренко // ЖФХ. — 2001. Т. 15. — С. 1221–1224.
9. Домрачев, Г.А. Роль звука и жидкой воды как динамически нестабильной полимерной системы в небиогенном происхождении кислорода и возникновении жизни на Земле [Текст] / Г.А. Домрачев, Д.А. Селивановский / ИМХ АН СССР. — Препринт № 1. — Горький, 1990. — 19 с.
10. Вакс, В.Л. Диссоциация воды под действием СВЧ-излучения [Текст] / В.Л. Вакс, Г.А. Домрачев, Ю.Л. Родыгин [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1994. № 1. — С. 149–154.
11. Брусков, В.И. Образование активных форм кислорода под действием тепла при восстановлении растворенного кислорода воздуха [Текст] / В.И. Брусков, Ж.К. Масалимов, А.В. Черников // ДАН. — 2001. Т. 381, № 2. — С. 262–264.
12. Брусков, В.И. Образование активных форм кислорода в воде под действием тепла [Текст] / В.И. Брусков, Ж.К. Масалимов, А.В. Черников // ДАН. — 2000. Т. 384, № 6. — С. 821–824.
13. Стехин, А.А. Туннельный перенос электронов из водяной среды [Текст] / А.А. Стехин, Г.В. Яковлева, А.Ю. Кармишин, Е.И. Кантырева // Сб. матер. 5-го Междунар. конгресса «АКВАТЭК-2002: Вода, экология, технология». Москва, 4–7 июня 2002 г. — М., 2002. — 948 с.
14. Богачев, Ю.С. Спектрально-структурные закономерности формирования водородных связей в концентрированных водных и органических системах [Текст]: Автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук / Ю.С. Богачев. — М., 1992. — 46 с.
15. Ло, Ш. Наноструктуры в очень разбавленных водных растворах [Текст] / Ш. Ло, В. Ли // Российский химический журнал. — 1999. Т. 43, № 5. — С. 40–48.

УДК 621.9.048.7

*Г.А. Туричин, И.А. Цибульский,
М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов*

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Высокая концентрация энергии лазерного излучения предопределяет значительную интенсификацию процессов обработки материалов. Концентрированный ввод энергии позволяет обрабатывать материалы с более высокими скоростями, меньшими остаточными тепловыми деформациями. Достижения последних лет в области физики и техники позволили создать новые источники лазерного излучения с существенно более высокой энергетической эффективностью.

При сварке сплавов, особенно легких сплавов на основе алюминия, проблема расчета параметров сварного соединения, предсказания его химического состава и механических свойств достаточно сложна из-за необходимости учитывать испарение легколетучих добавок (магний, литий или цинк), определяющих весь комплекс механических свойств. При сварке часть этих добавок испаряется, в результате чего химический состав и механические свойства металла шва могут отличаться от состава и свойств основного материала.

Система Al-Mg — одна из самых перспективных при разработке свариваемых сплавов. Механические свойства сварных соединений, как и основного металла, в основном зависят от содержания магния в сплаве: увеличением содержания магния прочность сплава возрастает.

Для повышения эффективности разработки технологии лазерно-дуговой сварки применена компьютерная модель данного процесса. Модель построена на основе технологически применимых математических описаний процессов, протекающих при лазерно-дуговой сварке [1].

Процессы гибридной лазерно-дуговой сварки с глубоким проплавлением часто сопровождаются

появлением пористости и формированием корневых пиков в сварных швах [2]. В соответствии с современными представлениями о физической природе процессов лазерной сварки причиной этого считают развитие автоколебаний парогазового канала и сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением [3].

Многочисленные экспериментальные результаты подтверждают, что процесс сварки с глубоким проплавлением нестационарен даже при стабилизации всех внешних факторов, влияющих на сварочную ванну [4]. В частности, высокоскоростная киносъемка лазерной сварки составных образцов из металла и оптически прозрачного материала [5] показала непрерывное изменение формы канала, квазипериодическое движение зоны с максимальной яркостью по глубине канала, а также наличие таких зон на задней стенке канала. Съемка плазменного факела также показывает наличие его квазипериодических флуктуаций [6].

Сравнительные исследования движения жидкого металла на поверхности сварочной ванны и процесса образования корневых пиков подтверждают соответствие между пикообразованием и выплескиванием расплавленного металла из сварочной ванны. Такие же результаты были получены позднее при рентгеновской съемке [7].

Экспериментальная установка для исследования технологического процесса лазерно-дуговой сварки

В экспериментах была использована гибридная лазерно-дуговая сварочная установка, разработанная и собранная в ИЛИСТ СПбГПУ при участии компании «Центр лазерных технологий».

В качестве источника лазерного излучения использовался иттербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт. Излучение транспортировалось по волоконному кабелю к оптической сварочной головке лазерно-дугового модуля. Для фокусировки излучения использовалась сварочная головка YW50 ZK фирмы Precitec с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,4 мм, оснащенная однокоординатным сканатором DC-Scanner с максимальной частотой 600 Гц и амплитудой до 10 мм.

Экспериментальная установка также укомплектована источником питания дуги EWM Phoenix 520 RC PULS и ВДУ-1500ДС. Для подачи присадочного материала использовался механизм подачи проволоки PHOENIX DRIVE 4 ROB 2 и ПДГО — 601 соответственно.

В ходе экспериментов проплавливались и сваривались в стык плоские образцы размерами 100×50 мм из сплавов АМг3 и АМг6 толщиной соответственно 4 и 10 мм. Сварка осуществлялась прямолинейными стыковыми швами в нижнем пространственном положении. Для защиты сварочной ванны и металла шва применялся аргон и смесь аргона с гелием. В качестве присадочного материала в экспериментах использовалась проволока марки AlMg6.Zr.

Качество всех сварных швов оценивалось визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов. Определялись глубина проплавления и микротвердость сварного соединения.

Для определения временных характеристик динамических процессов в зоне гибридного разряда над поверхностью изделия применялись система регистрации плазменного факела, включающая в себя блок оптической регистрации

с объективом, кассетой для светофильтров и CCD матрицей для регистрации сигнала, модуль цифровой обработки сигнала, а также высокоскоростная видеокамера CENTURIO C100, позволяющая производить съемку со скоростью до 100 000 кадров/с. Для исследования спектра оптической эмиссии плазменного факела использовался линзовый спектрограф с компенсацией астигматизма SL100M (рис. 1).

Планирование экспериментов

Кромки зачищались до металлического блеска для удаления грязи, масла и окисного слоя на ширине не менее 10 мм от стыка.

Сборка пластин под сварку осуществлялась с применением сборочных приспособлений.

Прихватки производились с торцов пластин и выполнялись на тех же режимах и по той же технологии, что и сварка. Сварка производилась при комнатной температуре.

Постоянные параметры лазерно-дуговой сварки пластин из сплава АМг3 следующие:

Наименование параметра	Значение
Наклон луча лазера от вертикали, град	15
Направление сварки	Углом луча лазера назад
Материал присадочной проволоки	AlMg6Zr
Диаметр присадочной проволоки, мм	1,2
Фокусное расстояние, мм	—9
Вылет проволоки, мм	11
Газовая защита верхнего и обратного валиков	+
Защитный газ	Ar
Расход защитного газа, л/мин	25

Варьируемые параметры: $P_{\text{л}}$ — мощность лазерного излучения (от 5 до 15 кВт); $V_{\text{св}}$ — ско-



Рис. 1. Оптический блок системы «Регистратор» (слева), цифровая высокоскоростная камера CENTURIO C100 (в центре), линзовый спектрограф SL100M (справа)

рость сварки (от 40 до 120 мм/с); ΔL — расстояние между дугой и лучом лазера (от 0 до 15 мм); $V_{\text{ппр}}$ — скорость подачи присадочной проволоки (от 2 до 20,4 м/мин).

Результаты экспериментов и моделирования

Результаты компьютерного моделирования, полученные с помощью динамической модели, показывают, что, несмотря на стабилизацию всех параметров технологического режима, процесс высокоскоростной сварки металлов больших толщин существенно нестационарен (рис. 2). При этом наиболее нестабильна прикорневая часть пароголового канала и канала проплавления. На рис. 2 также представлено фото поперечного сечения сварного шва, выполненного лазерной сваркой при тех же параметрах режима. На фото видно характерное сужение шва, которое может привести к образованию дефекта. Застабилизировать сварочную ванну возможно введением кругового сканирования лазерного луча с небольшими (до 0,5 мм) радиусами и высокой (свыше 300 Гц) частотой сканирования (рис. 3). При отсутствии такой стабилизации в результате коллапса пароголового канала возможно формирование пор большого диаметра и корневых пиков.

Экспериментами показано, что для динамики яркости излучения расплава характерны низкочастотные колебания. Их частоты определялись с помощью компьютерного моделирования с использованием динамической модели, а также экспериментально с помощью фотодиодов, направленных на сварочную ванну. Характерный частотный спектр сигнала с фотодиодов приведен на рис. 4.

Скорость видеосъемки определяется частотой колебаний расплава. Анализ динамического поведения ванны расплава показал, что здесь отсутствуют колебания с частотами более 500 Гц. Таким образом, можно сделать вывод, что для наблюдения за поверхностью сварочной ванны необходимо проводить съемку со скоростью не менее 1000 кадров/с.

Анализ кадров скоростной видеосъемки (рис. 5) позволил определить положение электрода относительно лазерного луча.

Расчет количества легирующих элементов проводился в программе LaserCAD. Результаты такого расчета для различных толщин и параметров режима для алюминиево-магнелиевых сплавов приведены на рис. 6.

Уменьшение скорости сварки приводит к увеличению потерь легколетучих легирующих

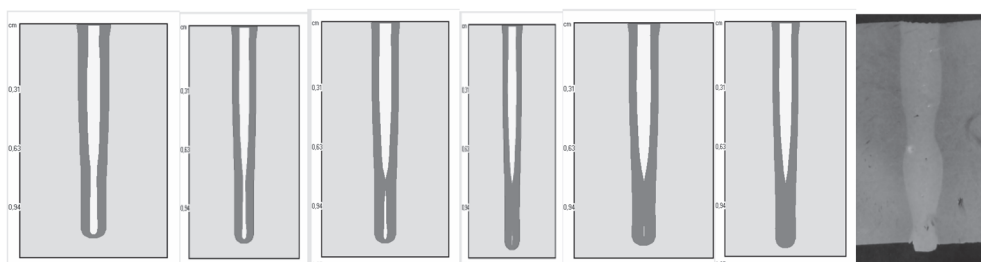


Рис. 2. Результаты расчетов через 1 мс ($N = 15$ кВт, $V_{\text{св}} = 10$ см/с)

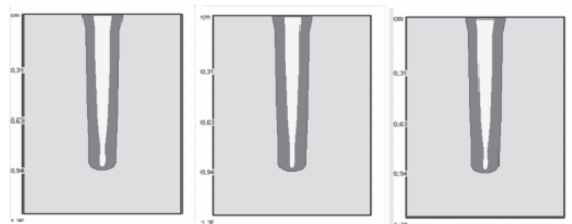


Рис. 3. Результаты расчетов через 3 мс ($N = 12$ кВт, $V_{\text{св}} = 10$ см/с)

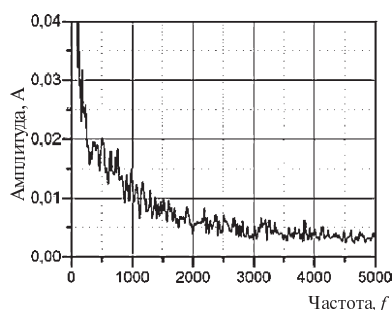


Рис. 4. Частотный спектр колебаний расплава

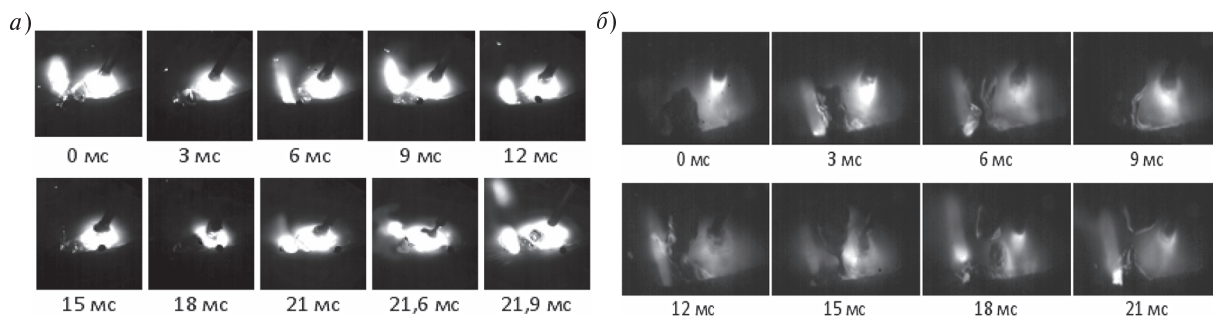


Рис. 5. Видеосъемка процесса формирования и отрыва капли: $N = 15$ кВт, $V_{св} = 6$ м/мин, $I_{св} = 120$ А; источники питания дуги: EWM Phoenix 520 RC PULS (а) и ВДУ-1500ДС (б)

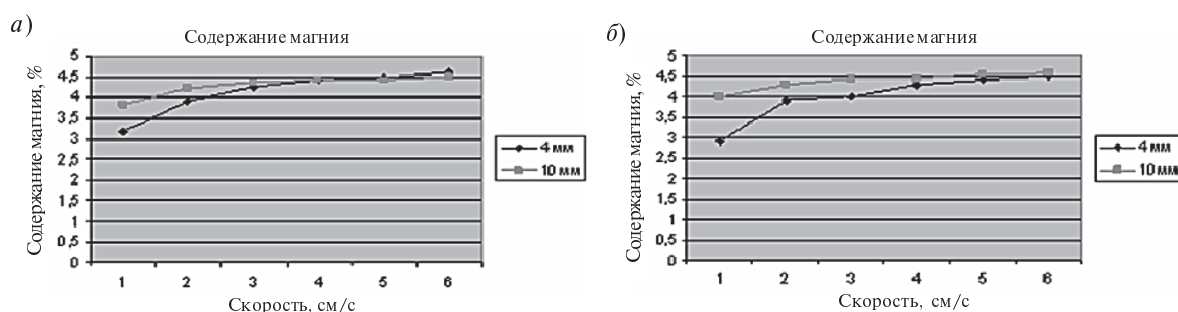


Рис. 6. Расчет изменения содержание магния в металле шва на поверхности образца при лазерной сварке: а — $N = 3500$ Вт, $d = 0,3$ мм; б — $N = 3000$ Вт, $d = 0,3$

элементов, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики сплавов, что и приводит к разупрочнению сварного шва.

Содержание примесей в металле шва при сварке на пониженных скоростях за счет испарения существенно отличается от их содержания в основном металле, особенно в верхней части расплавленной зоны, где радиус канала максимален. Поскольку верхняя часть парогазового канала — определяющая для процесса многократных переотражений в канале, испарение примесей приводит к значительному из-

менению формы и размеров зоны проплавления. Пример такого уширения можно увидеть на рис. 7. Увеличение погонной энергии привело к существенному росту ширины зоны проплавления при лазерной сварке с присадочным материалом.

Для определения положения электрода относительно лазерного луча помимо высокоскоростной видеосъемки проводились расчеты термических циклов и измерения микротвердости в зоне лазерного воздействия. Результаты представлены на рис. 8.

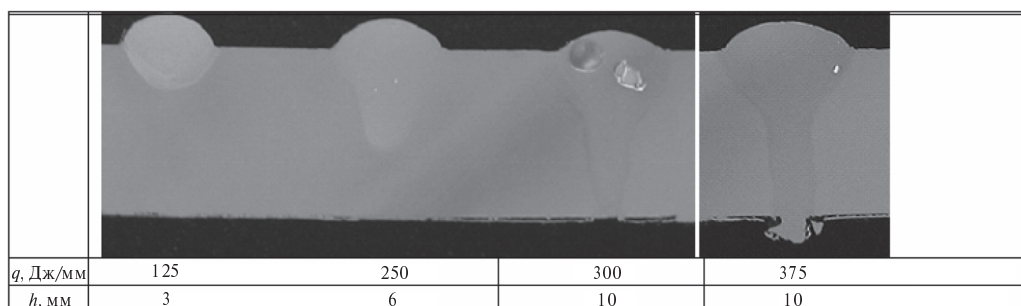


Рис. 7. Результаты лазерного проплавления с присадочной проволокой пластины из АМг6, $V_{пп} = 19$ м/мин

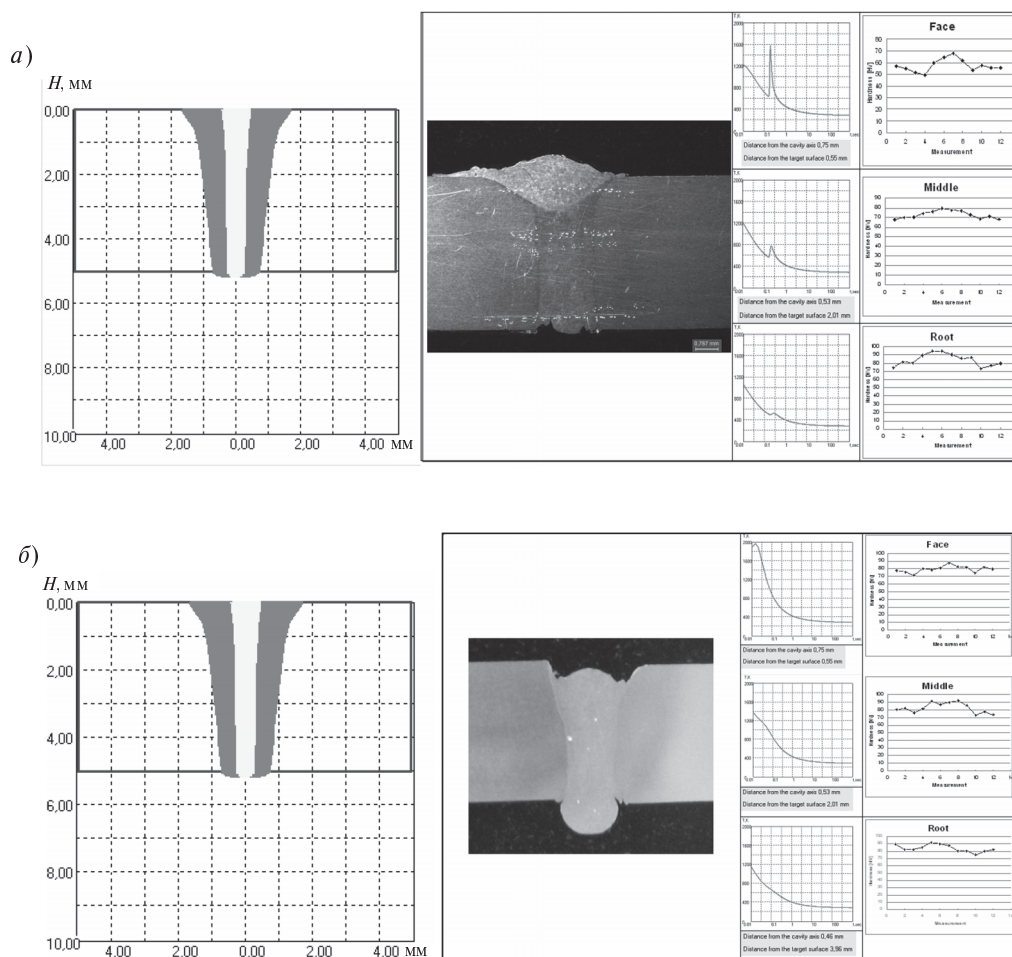


Рис. 8. Результаты расчетов формы поперечного сечения и термических циклов сварного шва и измерений микротвердости после ЛДС сплава АМгЗ:
 а — расстояние между лазерным лучом и электродом — 15 мм; $q = 100$ Дж/мм;
 б — расстояние между лазерным лучом и электродом — 2 мм, $q = 100$ Дж/мм

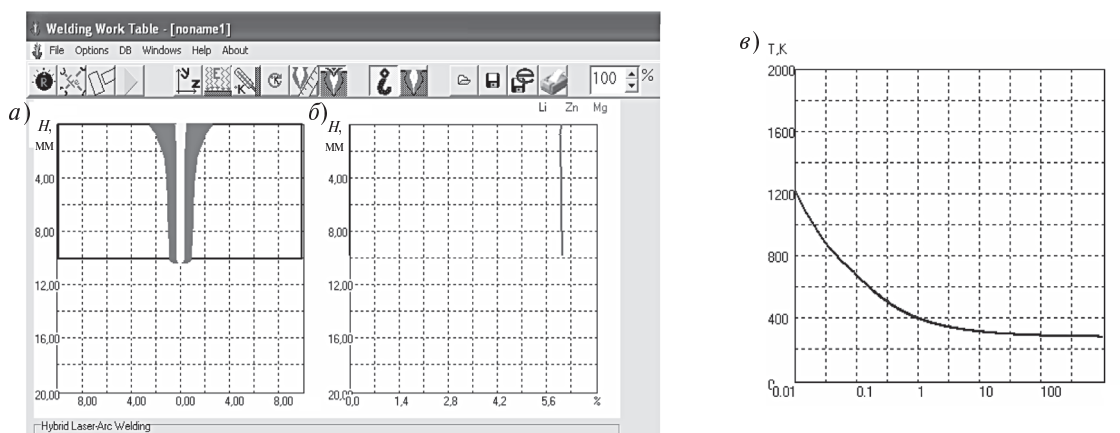


Рис. 9. Рассчитанные поперечное сечение зоны проплавления (а),
 распределение Mg по глубине шва (б) и термический цикл (в)

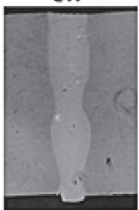
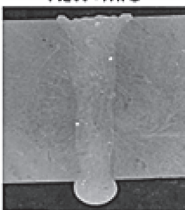
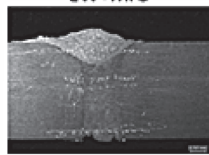
	LW	Mg, %W HLW+MIG	LW+MIG
			
Face	5,298	6,485	3,135
Middle	4,624	5,871	3,274
Root	5,710	5,510	3,279
Base metal		6,442	2,648
Filler wire		6,25	

Рис. 10. Распределение количества магния по глубине сварного шва при сварке алюминиевых сплавов

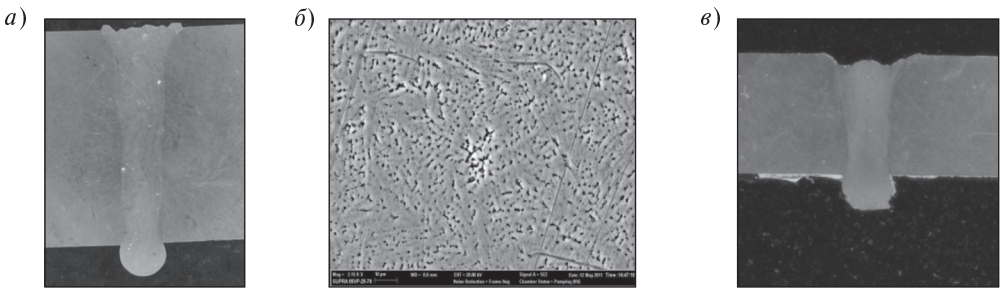


Рис. 11. Поперечное сечение сварного шва (а) и микроструктура металла шва (б) при ЛДС сплава АМг6, $q = 175$ Дж/мм. Поперечное сечение сварного соединения при ЛДС (в) сплава АМг3, толщина — 4 мм, $q = 100$ Дж/мм

При гибридной сварке наблюдается однородная по всему сечению металла шва структура, состоящая из мелких дендритов. Увеличенное расстояние между тепловыми источниками приводит к более продолжительному пребыванию металла шва при повышенных температурах и, как следствие, увеличению размеров дендритов в верхней части шва. В случае гибридного процесса микротвердость металла шва приближается к микротвердости основного металла, что обусловлено как его мелкодендритной структурой, так и более высоким содержанием магния.

Дальнейшие эксперименты проводились при максимальных скоростях сварки и расстоянии между лазерным лучом и электродом, равном 2 мм.

Далее приведен пример моделирования гибридной сварки сплава АМг6. На рис. 9 представлены результаты расчета

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (рис. 10) подтвердили рассчитанные значения.

Из представленных на рис. 10 результатов видно, что использование присадочного материала позволяет компенсировать потери легирующих.

На рис. 11 показаны поперечное сечение и микроструктура металла шва стыкового сварного шва со сквозным проплавлением пластин из сплава АМг6, и АМг3.

В результате проведенных исследований:

- показана возможность повышения качества сварных швов с помощью сканирования;
- установлены требуемые частоты сканирования, соответствующие флуктуациям сварочной ванны;
- показана зависимость характера проплавления и свойств металла шва от расстояния «лазерный луч — дуга»;
- показано, что количество легирующих элементов в металле шва убывает с уменьшением скорости сварки;

подтверждено, что присадочный материал компенсирует потери легирующих элементов при лазерно-дуговой сварке;

получены сварные соединения сплавов на основе алюминия с высоким отношением глу-

бины к ширине, характеризующиеся высоким качеством и малыми деформациями.

Исследования проводились в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Turichin, G.** Model of laser welding for technology application [Текст] / G. Turichin // Proceedings of the Academy of Sciences. Phys. Ser.— 1997. Vol. 61, № 8.— P. 1613–1618.

2. **Matsunawa, A.** Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto // Welding International.— 2003. № 17 (6).— P. 431–437.

3. **Lopota, V.** Theoretical description of the dynamic phenomena in laser welding with deep penetration [Текст] / V. Lopota, G. Turichin, I. Tzibulsky [и др.] // Bellingham / Wash.: SPIE, 1999 (SPIE Proceedings Series 3688).— P.98–107.

4. **Forsman, T.** Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration [Текст] / T. Forsman, J. Powell, C. Magnusson

// Journal of Laser Applications.— 2001. Vol. 13. Issue 5.— P. 193–198.

5. **Bashenko, V.V.** Peculiarities of heat and mass transfer in welding using high energy density power sources [Текст] / V.V. Bashenko, E.A. Mitkevich, V.A. Lopota // 3-d Int. Coll. on EBW.— Lion.— 1983.— P. 61–70.

6. **Лопота, В.А.** Структура материала и его параметры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением [Текст] / В.А. Лопота, В.С. Смирнов // ФиХОМ.— 1989. № 2.— С. 104–115.

7. **Matsunawa, A.** Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, Jong-Do Kim, Naoki Seto [и др.] // Journal of Laser Applications.— 1998. Vol. 10, Issue 6.— P. 247–254.

УДК 004.946

Н.Н. Шабров, Н.Н. Куриков

АНАЛИЗ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Интерпретация результатов научных исследований — важный этап работы над изучением объекта или процесса. Как процесс преобразования данных к форме, легко воспринимаемой человеком, современные технологии визуализации приобретают особое значение. Стремительно усложняющиеся объекты научных исследований и растущие объемы получаемой информации делают традиционные способы визуализации данных недостаточными для быстрого и полного восприятия и понимания результатов. Технологии виртуальной (Virtual) и дополненной (Augmented) реальности — перспективные средства, позволяющие упростить процесс восприятия и понимания результатов исследований, а также ускорить процесс при-

нятия решений и обезопасить его от возможных ошибок.

В настоящее время в России формируется национальная суперкомпьютерная технологическая платформа по созданию и развитию суперкомпьютерных технологий экзотического класса. Обеспечение экзотических вычислений — ключевая проблема, решением которой занимается все мировое вычислительное сообщество. При этом предполагается, что объемы данных, генерируемые экзотическими вычислениями, достигают уровня экзотбайт. Это означает, что для анализа результатов экзотического моделирования в режиме real time системы виртуального окружения типа CAVE 3D — едва ли не единственное эффективное средство осмысления огромного объема данных.



Программно-аппаратный комплекс виртуальной реальности CAVE 3D

В 2007 году в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Компьютерные технологии проектирования и моделирования в системах виртуальной реальности» механико-машиностроительного факультета на кафедре «Компьютерные технологии в машиностроении» СПбГПУ создан и введен в эксплуатацию программно-аппаратный комплекс CAVE 3D (Computer Aided Virtual Environment) виртуальной реальности. Эта система — одна из первых систем подобного типа в российских вузах. CAVE 3D включает следующие основные компоненты: проекционно-экранное оборудование (три просветных экрана и шесть проекторов), высокопроизводительный видеокластер, оптическую трекинг-систему, систему видеоконференцсвязи с удаленными клиентами, специализированное программное обеспечение (COVISE [1]).

Назначение и области применения системы CAVE 3D. Созданию виртуальных сред распределенного совместного моделирования, научного анализа и интерактивной визуализации на основе систем виртуальной реальности типа CAVE 3D (Computer Aided Virtual Environment) в мире уделяется растущее внимание. Достаточно указать, что на ежегодной международной конференции WINVR 2010 по инновационным технологиям в системах виртуального окружения, организованной ASME в университете штата Айова, было представлено 27 тематических направлений. Это свидетельствует об огромном интересе в мире со стороны научных организаций и промышленных предприятий к развитию технологий виртуального прототипирования практически во всех областях знаний, включая и гуманитарные.

Виртуальное прототипирование — это современный подход к разработке новой продукции, представляющий собой **инновационные** технологии воспроизведения виртуального образа изделия при создании конкурентоспособной продукции машиностроения. Особенностью систем типа CAVE 3D является возможность полного погружения наблюдателя в киберпространство виртуального мира объекта или физического процесса.

Актуальность создания таких сред осознана всеми ведущими суперкомпьютерными центрами мира и крупными промышленными компа-

ниями. Несмотря на высокую стоимость, спрос на такие системы очень велик. Эти среды наиболее востребованы в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, авиационная, автомобильная, судостроительная, при анализе результатов моделирования сложных процессов газодинамики, химии, биологии, горения, геомеханики и т. д. Главная цель создания таких сред — компьютерная поддержка совместной географически распределенной работы (Collaborative work) по моделированию, анализу и визуализации результатов на основе систем виртуальной реальности типа CAVE 3D. В последнее время системы CAVE 3D часто называют центрами принятия решений (Immersive Decision Making). Уже сейчас системы виртуального окружения используются в ведущих промышленных компаниях мира как место и средство принятия решений путем погружения в исследуемый объект или процесс. Именно в этих центрах целесообразно проводить совместные совещания разработчиков, решающих судьбу создаваемого ими изделия, когда в режиме real time возможно протестировать параметры изделия на примере его виртуального образа.

Задачам создания новых технологий визуализации отведено заслуженное место в подготовленном мировым сообществом разработчиков программного обеспечения документе IESP Roadmap по кардинальному пересмотру стратегии развития и разработки программного обеспечения для высокопроизводительных вычислительных систем на 2010—2019 годы.

На заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России 31 августа 2009 года Президент РФ указал на приоритеты в области стратегических информационных технологий. Одним из приоритетов является создание отечественных суперкомпьютеров и на их базе создание виртуальных моделей самолетов, автомобилей и других наукоемких изделий. Технологии визуализации в виртуальных средах в настоящее время претерпевают интенсивное развитие в сторону расширения интерактивной функциональности виртуальных сред, когда наблюдатель оперирует с виртуальным образом объекта так, как он оперировал бы с реальным физическим объектом. Составной частью современных систем виртуального окружения становится высокопроизводительный видеокластер, который



Рис. 1. Виртуальный макет
Петропавловской крепости

выполняет часть вычислительной работы по обработке видеоизображения в режиме постпроцессинга. В перспективе видеокластеры примут на себя функции быстрой декомпрессии данных с использованием процессоров, установленных на графических ускорителях, функции реконструкции визуального представления объекта на основе редуцированных данных моделирования, параллелизации рендеринга и т. д. Первые установки таких систем были созданы в МФТИ и СПбГПУ. Работы по созданию таких установок постоянно поддерживаются грантами РФФИ. В 2007 году в СПбГПУ введена в эксплуатацию система CAVE 3D с тремя просветными экранами, оптической трекинг системой и многопроцессорным видеокластером.



Рис. 2. Анализ полей
температурных напряжений
в блоке цилиндров дизельного двигателя

Главное назначение комплекса CAVE 3D — исследования в области виртуального прототипирования как изделий машиностроения, так и объектов гражданского строительства в режиме реального времени. Виртуальное прототипирование — это современный подход к разработке новой продукции, представляющий собой инновационные технологии воспроизведения виртуального образа продукта и полного погружения в его виртуальный мир перед запуском в реальное производство. В сочетании с физическим моделированием объекта технологии виртуального прототипирования позволяют существенно сократить сроки создания и стоимость конкурентоспособной продукции машиностроения.

Комплекс CAVE 3D необходим при визуализации результатов моделирования сверхбольших моделей, содержащих огромное количество данных, и приобретает ключевое значение не столько для визуализации, сколько для понимания результатов моделирования физических процессов, выполненных на вычислительных кластерах, к которым в первую очередь следует отнести сложные процессы в физике, химии и биологии.

Система CAVE 3D совершенно необходима для инженеров-дизайнеров, активно использующих методы компьютерного проектирования зданий, ландшафтов и объектов машиностроения с помощью CAD-систем.

Диапазон применения подобных систем весьма широк и охватывает такие области, как трехмерная визуализация при исследованиях объектов и физических процессов в области авиастроения, ракетостроения, автомобилестроения, при моделировании и визуализации трехмерных процессов газодинамики, химии, биологии, горения, геомеханики и т. д. (рис. 1, 2).

Электронные модели объектов машиностроения создаются предварительно при помощи соответствующих CAD-систем, например таких, как Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks. Моделирование физических процессов и поведения конструкций выполняется при помощи CAE/CFD-систем, таких, как ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, FLUENT, и прикладного программного обеспечения собственной разработки (in-house software). Кафедра «Компьютерные технологии в машиностроении» механико-машиностроительного факультета СПбГПУ располагает пе-



речисленными выше специализированными программными системами и имеет многолетний опыт их использования при выполнении исследований для российских и зарубежных промышленных компаний.

Представители промышленности Санкт-Петербурга активно внедряют передовые технологии проектирования и проводят в ЦКП апробацию технологий виртуального прототипирования при создании совершенных образцов изделий машиностроения. Конструкторы промышленных предприятий Санкт-Петербурга совместно с сотрудниками кафедры «Компьютерные технологии в машиностроении» СПбГПУ используют систему CAVE 3D при создании и доводке новых образцов промышленных изделий. По заданиям промышленности на кафедре также выполняются исследования по созданию многопроцессорных вычислительных систем, интегрированию технологий моделирования процессов газодинамики на вычислительных кластерах и технологий интерактивной визуализации результатов моделирования в системе CAVE 3D.

Интерактивная визуализация в системе CAVE 3D результатов моделирования крэш-тестов автомобилей и деталей трансмиссии автомобилей (рис. 3, 4) дает возможность сотрудникам

кафедры своевременно формулировать рекомендации по совершенствованию конструкций, что позволяет существенно сократить время выхода в серию модели автомобиля и изделия.

Система CAVE 3D плодотворно используется сотрудниками кафедр Политехнического университета при моделировании объектов архитектуры, ландшафтов, гидротехнических сооружений и геоинформационных систем.

В мае 2008 года в ЦКП впервые в России осуществлен сеанс международной распределенной совместной работы в двух системах CAVE 3D. Одна из этих систем установлена в суперкомпьютерном центре (HLRS) университета Штутгарта в Германии. Связь осуществлялась в виде видеоконференц-связи. Коллеги из Германии удаленно управляли объектом в системе CAVE 3D, расположенной в СПбГПУ, а сотрудники СПбГПУ управляли объектом в системе CAVE 3D в университете Штутгарта в Германии. Компьютерные технологии совместной работы в виртуальных средах — это инновационные формы работы исследовательских групп, расположенных удаленно в различных географических точках. Работа осуществляется так, как будто группы исследователей, участвующие в сеансе распределенной работы находятся в помещении одного офиса.

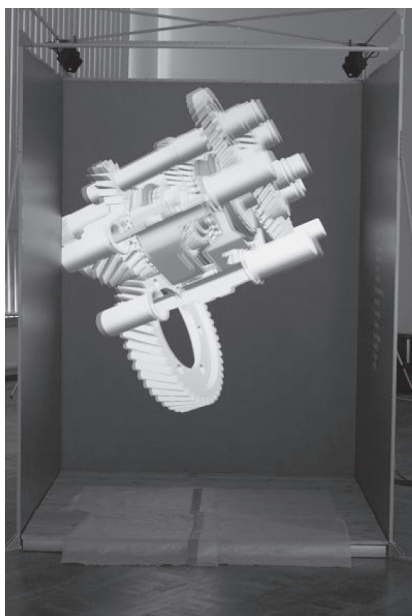


Рис. 3. Визуализация CAD модели коробки передач автомобиля

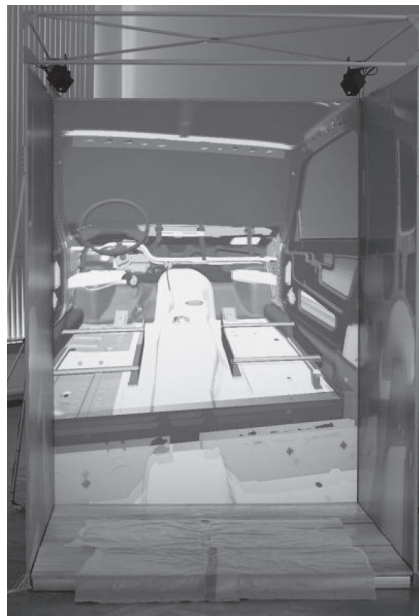


Рис. 4. Визуализация результатов моделирования крэш-теста автомобиля в системе CAVE 3D



Рис. 5. 3D сканирование поверхности модели автомобиля

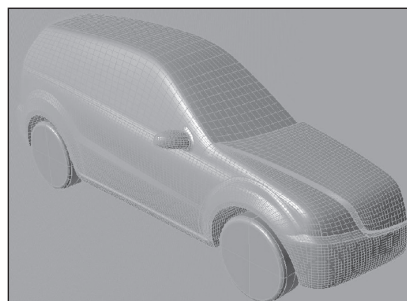


Рис. 6. Восстановленная форма поверхности кузова

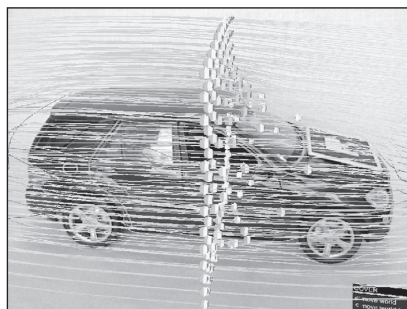


Рис. 7. Визуализация результатов компьютерного CFD моделирования структуры набегающего потока, совмещенная с видеоизображением реального объекта

Применение технологий дополненной реальности к созданию гибридных прототипов

Гибридный прототип — комбинация реального физического объекта и некоторого объема электронных данных, представляющих результат компьютерного моделирования процессов, связанных с этим объектом. Наличие реального объекта позволяет человеку максимально полно воспринимать его и исследуемый процесс.

Технология создания гибридных прототипов заключается в совмещении изображения визуализированного объема данных и изображения, регистрируемого видеокамерой. Взаимное положение этих изображений однозначно задается с помощью специальных маркеров, закрепленных на объекте или в непосредственной близости с ним. Регистрация маркера в системе происходит путем задания его типа и шести его координат в условной системе координат объекта. Видеопоток, поступающий от видеокамеры, обрабатывается специальным программным

обеспечением (ARToolkit [1]) покадрово. На каждом кадре происходит обнаружение маркера и определяется его положение относительно видеокамеры. Накладываемое на видеопоток изображение преобразуется с помощью вновь определенных преобразований.

Первый эксперимент по использованию дополненной реальности. Весной 2009 года на кафедре «Компьютерные технологии в машиностроении» СПбГПУ был проведен эксперимент по созданию гибридного прототипа. Было осуществлено моделирование процесса обтекания автомобиля встречным потоком воздуха. Работа состояла из ряда этапов:

Этап 1. Пространственное сканирование масштабной модели автомобиля (рис. 5).

Этап 2. Восстановление формы кузова автомобиля, получение электронной модели (рис. 6).

Этап 3. Моделирование процесса обтекания автомобиля набегающим потоком воздуха.

Этап 4. Визуализация линий тока набегающего на автомобиль потока воздуха с наложением



ем на видеоизображение реальной модели автомобиля (рис. 7).

Представлены промежуточные результаты работы по использованию, развитию и внедре-

нию систем виртуальной реальности типа CAVE 3D для визуализации больших объемов данных научных исследований в различных областях знаний, а также результатов технического проектирования и моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
2. **Шабров, Н.Н.** Программно-аппаратные комплексы виртуальной реальности предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях [Текст] / Н.Н. Шабров // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности, М.: Изд-во МГУ, 2009.— С. 183–189.
3. **Шабров, Н.Н.** Моделирование и визуализация в виртуальных и индуцированных средах [Текст] / Н.Н. Шабров, С.Г. Орлов, Н.Н. Куриков // Междунар. науч. конф. «Параллельные вычислительные технологии 2010», 29 марта — 1 апреля 2010.— г. Уфа.— С. 640–642.

УДК 621.313

А.Г. Калимов, С.А. Шиманский

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Метод пространственных интегральных уравнений [1] часто используется для расчета трехмерных магнитных полей, создаваемых катушками с током и намагниченными объектами. Основные достоинства этого метода — относительная простота реализации, ограничение расчетной области пространством, занятым ферромагнитным материалом, возможность моделирования магнитного поля катушек сложной конфигурации. Однако традиционные способы реализации метода ПриУ обладают и существенными недостатками. К ним относятся, в частности, относительно высокая погрешность расчета магнитного поля в области, занятой материалом ферромагнетика. Особенно сильно точность теряется в системах с замкнутым магнитопроводом и при больших значениях магнитной проницаемости ферромагнетика, что характерно, в частности, для электрических трансформаторов.

В настоящей статье производится исследование точности моделирования магнитного поля с использованием метода ПриУ на примере расчета характеристик Ш-образного трансформатора.

В качестве объекта исследований был выбран промышленный силовой трансформатор марки ТБС2-0.25, на центральном стержне которого была сохранена только первичная обмотка с общим числом витков, равным $w = 335$. Конфигурация рассматриваемой системы и ее основные геометрические параметры представлены на рис. 1

Магнитопровод этого трансформатора изготовлен из электротехнической стали типа Э11, кривая намагничивания которой показана на рис. 2 [2].

В процессе экспериментального исследования характеристик трансформатора по его первичной обмотке пропускался постоянный электрический ток. Его значения изменялись в пределах от 0,1 А до 2 А, что соответствовало изменению индукции в магнитопроводе в диапазоне между 0,5 и 1,4 Тл. В ходе эксперимента измерялись основной магнитный поток в центральном стержне магнитопровода, магнитный поток, проходящий по боковым стержням, а также их разность. Эта разность характеризует поток, замыкающийся по воздуху, и может интерпретироваться как по-

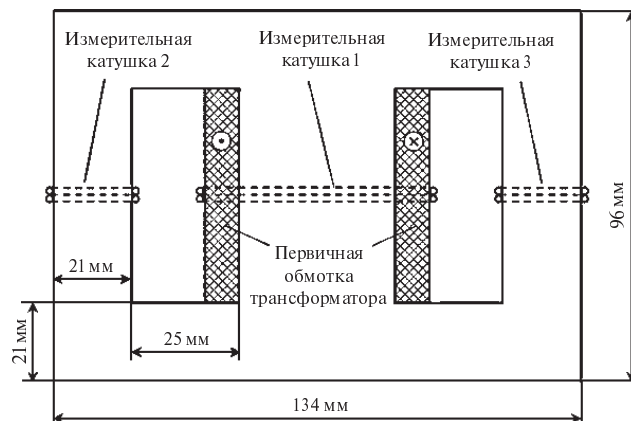


Рис. 1. Продольное сечение трансформатора с первичной обмоткой и измерительными катушками

ток рассеяния первичной обмотки трансформатора. Более детально эксперимент описан в [3].

Математическая формулировка метода пространственных интегральных уравнений. Рассмотрим ферромагнитный объект, находящийся в поле сторонних источников. С учетом известных соотношений между основными векторами магнитного поля [4] $\vec{B} = \mu \vec{H}$ и $\vec{B} = \mu_0 \vec{M} + \mu_0 \vec{H}$ выразим намагниченность ферромагнетика через напряженность магнитного поля:

$$\vec{M} = \vec{H}(\mu_r - 1), \quad (1)$$

где $\mu_r = \mu/\mu_0$ — относительная магнитная проницаемость материала ферромагнетика. Магнитное поле в любой точке пространства можно представить в виде суммы двух полей, одно из которых с напряженностью $\vec{H}_c(\vec{r})$ создано сторонними источниками, а другое — $\vec{H}_m(\vec{r})$ — намагниченным ферромагнетиком:

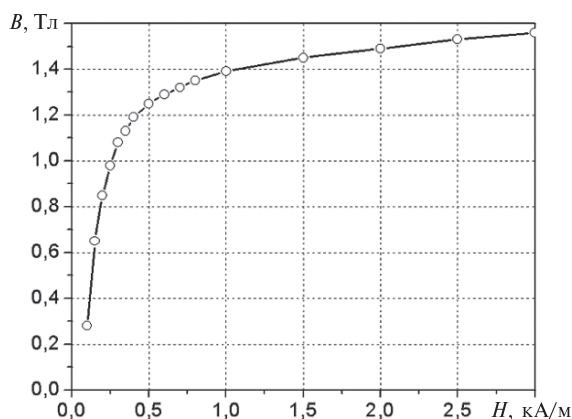


Рис. 2. Кривая намагничивания стали Э11

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_c(\vec{r}) + \vec{H}_m(\vec{r}). \quad (2)$$

Напряженность поля, создаваемая ферромагнитным массивом V_m , может быть найдена с помощью интегрального соотношения

$$\vec{H}_m = -\vec{\nabla} \left[\frac{1}{4\pi} \int_{V_m} \frac{\vec{M}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv \right], \quad (3)$$

где \vec{r} — радиус-вектор точки наблюдения, \vec{r}' — радиус-вектор точки интегрирования. Интегрирование ведется по объему V_m , занятому материалом ферромагнетика.

Объединяя соотношения (1), (2) и (3), в конечном итоге получаем известное интегральное уравнение Фредгольма второго рода относительно вектора намагниченности $\vec{M}(\vec{r})$:

$$\frac{\vec{M}(\vec{r})}{\mu_r - 1} + \frac{\vec{\nabla}}{4\pi} \int_{V_m} \frac{\vec{M}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv = \vec{H}_c(\vec{r}). \quad (4)$$

Это же уравнение при необходимости может быть трансформировано к другому виду, если в качестве базовой переменной использовать не намагниченность материала магнитопровода, а напряженность магнитного поля:

$$\vec{H}(\vec{r}) + \vec{\nabla} \int_{V_m} \frac{(\mu_r - 1) \vec{H}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv = \vec{H}_c(\vec{r}). \quad (5)$$

Решение каждого из этих уравнений позволяет найти характеристики магнитного поля в любой точке пространства на основе соотношений (2)–(3). Процедуру расчета магнитного поля с использованием метода ПРИУ можно условно разбить на ряд этапов:



расчет поля сторонних источников;
разбиение исходного объекта на элементы (дискретизация);
аппроксимацию интегрального уравнения системой алгебраических уравнений;
решение системы алгебраических уравнений;
определение характеристик поля по найденному распределению вектора намагниченности в объеме магнитопровода.

Расчет магнитного поля сторонних источников. Выбор методики расчета характеристик стороннего поля определяется типом источников (токи, магнитные заряды) и их расположением в пространстве. Создаваемое распределенным в объеме V_c током с плотностью \vec{J} магнитное поле может быть рассчитано, например, на основе закона Био-Савара:

$$\vec{H}_c(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_c} \frac{\vec{J} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv. \quad (6)$$

В рассматриваемой нами системе расположенная на магнитопроводе прямоугольного поперечного сечения катушка может быть представлена в виде набора токовых элементов стандартной формы. К таким элементам относятся прямоугольный брусок и дугообразный элемент с прямоугольным поперечным сечением. Магнитное поле первого из них — бруска с постоянной плотностью тока внутри — рассчитывалось аналитически. Для дугообразного элемента была использована двухступенчатая процедура расчета напряженности поля. Прежде всего, аналитическим интегрированием определялись характеристики поля сектора обмотки с бесконечно малым углом раскрытия. На втором этапе применялось однократное численное интегрирование полученного выражения по угловой координате, что позволяло эффективно и с высокой точностью определять напряженность магнитного поля как элементов рассматриваемого типа, так и всей обмотки.

Аппроксимация интегрального уравнения системой алгебраических уравнений. Для решения интегрального уравнения (4) и последующего расчета характеристик магнитного поля трансформатора необходимо, прежде всего, преобразовать это уравнение в систему алгебраических уравнений. На первом этапе этой процедуры объем, занятый материалом ферромагнетика, разбивается на простейшие элементы, в преде-

лах которых используются различные способы аппроксимации неизвестной величины. Чаще всего на практике для этой цели используются элементы с постоянной намагниченностью (ЭПН). При таком подходе составляющие вектора намагниченности внутри всех элементов рассматриваются в качестве независимых переменных. В нашей работе было проведено исследование точности моделирования потоков в сердечнике трансформатора с применением элементов такого типа. Аппроксимация исходного интегрального уравнения (4) проводилась с помощью метода взвешенных невязок. В качестве весовых функций использовались векторные константы, определенные внутри каждого отдельно взятого элемента. В результате исходное интегральное уравнение сводится к системе N векторных уравнений с таким же количеством векторных неизвестных:

$$\frac{\vec{M}_k}{\mu_{rk} - 1} + \sum_{i=1}^N \int_{V_k} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{M}_i}{4\pi} \int_{V_i} \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_k}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|^3} dv \right) dv = \hat{\vec{H}}_c;$$

$$\hat{\vec{H}}_c = \int_{V_k} \vec{H}_c dv,$$

где N — количество элементов дискретизации. Поскольку внутри каждого отдельно взятого элемента намагниченность не меняется, то и магнитная проницаемость каждого из них также постоянна. В свою очередь, магнитная проницаемость материала ферромагнетика зависит от величины напряженности магнитного поля, поэтому полученная алгебраическая система нелинейна. Для ее решения использовалась итерационная схема с одновременным пересчетом намагниченности элемента и соответствующей магнитной проницаемости на каждой итерации. Итерационная процедура считалась завершенной, когда суммарная невязка системы уравнений снижалась на 6 порядков по отношению к исходной. Обычно для этого было достаточно совершить 1–2 тысячи итераций.

Векторные конечные элементы. В теории метода конечных элементов для аппроксимации различных распределений широкое применение нашли узловые финитные функции [5]. Одним из свойств таких функций является то, что они обращаются в единицу в одном из узлов базового элемента и равны нулю в остальных узлах.

Выберем в качестве базового конечного элемента тетраэдр. Простейшими финитными функциями для него будут полиномы первого порядка. Любая скалярная функция внутри объекта, разбитого на такие конечные элементы, может быть приближенно представлена в виде разложения

$$F(x, y, z) = \sum_n F_n \varphi_n(x, y, z).$$

Важное свойство такого представления состоит в том, что аппроксимируемая функция непрерывна и дифференцируема во всей области ее определения. Однако в такой форме удобно аппроксимировать только скалярные величины. При работе с векторными переменными часто бывает удобнее использовать векторные финитные функции, которые частично обладают специфическими свойствами аппроксимируемой переменной. В частности, если рассматриваются уравнения относительно напряженности магнитного поля, то при переходе от одного элемента к другому желательно сохранять непрерывность для тангенциальной компоненты вектора. При этом нормальная компонента финитной функции может скачком меняться, что характерно для ситуации, когда магнитная проницаемость двух соседних элементов различна. Такими свойствами обладают векторные функции Уитни [6]. В простейшем случае внутри тетраэдрального элемента они выражаются в виде

$$\vec{L}_{kn} = \frac{\varphi_n \vec{\nabla} \varphi_k - \varphi_k \vec{\nabla} \varphi_n}{l_{kn}},$$

где k и n — номера узлов тетраэдра, а l_{kn} — расстояние между этими узлами. Очевидно, что функции \vec{L}_{kn} ассоциируется не с узлами конечного элемента, а с его ребрами. Для этих функций характерны следующие свойства:

касательная компонента функции равна единице во всех точках ребра тетраэдра, соединяющего узлы с номерами k и n ;

касательная компонента функции равна нулю на всех остальных ребрах рассматриваемого элемента;

функция линейно меняется внутри тетраэдра; касательная компонента функции непрерывна на общей границе двух тетраэдров;

внутри каждого отдельно взятого тетраэдра эти функции тождественно удовлетворяет равенству $\text{div}(\vec{L}_{kn}) = 0$;

внутри каждого отдельно взятого тетраэдра ротор функции \vec{L}_{kn} постоянен и, вообще говоря, не равен нулю:

$$\text{rot}(\vec{L}_{kn}) = \frac{\vec{\nabla} \varphi_k \times \nabla \varphi_n - \vec{\nabla} \varphi_n \times \nabla \varphi_k}{l_{kn}} = \text{const}.$$

В дальнейшем для удобства заменим двойную нумерацию ребер тетраэдральной сетки (k, n) на простую (m) . Представим напряженность магнитного поля внутри ферромагнитного объекта, предварительно разбитого на тетраэдры, в виде разложения по векторным финитным функциям $\vec{L}_m = \vec{L}_{kn}$:

$$\vec{H}(x, y, z) = \sum_m H_m \vec{L}_m(x, y, z). \quad (7)$$

Суммирование здесь ведется по всем ребрам тетраэдральной сетки. Очевидно, что не все коэффициенты H_m являются независимыми в случае, если внутри рассматриваемой области отсутствуют неизвестные заранее электрические токи. В частности, если мы выберем последовательность ребер, которые составляют замкнутый контур, то в силу закона полного тока [4] должно выполняться условие

$$\sum_m H_m I_m = 0. \quad (8)$$

Общее число таких дополнительных условий равно количеству независимых контуров, образованных ветвями тетраэдральной сетки.

Для разработки надежной процедуры выбора независимых переменных воспользуемся теорией графов. Будем рассматривать совокупность всех ребер тетраэдральной сетки в качестве единого связного графа. Построим дерево этого графа. Вошедшие в него ветви соединят все узлы тетраэдральной сетки, а их общее количество будет на единицу меньше, чем число узлов сетки. Все оставшиеся ветви будут связями.

Как известно, замыкание каждой связи приводит к образованию независимого контура, и, следовательно, тангенциальная компонента напряженности магнитного поля на таком ребре может быть выражена через значения напряженности магнитного поля на ветвях дерева. Таким образом, независимыми переменными останутся только тангенциальные компоненты напряженности магнитного поля на ветвях дерева, а количество независимых переменных в этой си-



туации на единицу меньше количества узлов тетраэдральной сетки.

Любопытно отметить, что при таком выборе независимых переменных каждый отдельно взятый тетраэдр будет намагничиваться однородно, несмотря на то, что аппроксимирующие функции \vec{L}_m внутри каждого элемента изменяются как по величине, так и по направлению. Это свойство следует из того, что интегралы от напряженности магнитного поля для всех замкнутых контуров, состоящих из ребер отдельного элемента, равны нулю, а следовательно, в силу теоремы Стокса и соотношения (7) нулю будет равен и ротор напряженности магнитного поля внутри тетраэдрального элемента:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \sum_{m=1}^6 H_m \text{rot}(\vec{L}_m) = 0.$$

Учитывая то обстоятельство, что дивергенция напряженности магнитного поля внутри элемента также равна нулю, существует единственная функция, одновременно удовлетворяющая этим условиям. Эта функция представляет собой постоянный по величине и направлению вектор. Необходимо отметить, что это свойство характерно только для векторных финитных функций Уитни первого порядка.

Формирование системы уравнений. Применение векторных конечных элементов для аппроксимации интегрального уравнения (5) позволяет решить сразу несколько задач. Во-первых, существенно уменьшается количество неизвестных величин. При традиционном подходе к решению задачи в качестве базовых переменных выбираются векторы намагниченности (или векторы напряженности магнитного поля) внутри каждого элемента. Переход к скалярным переменным позволяет сократить число неизвестных величин, как минимум, в три раза. Если учесть, что в реальных задачах количество тетраэдров в несколько раз больше, чем число узлов тетраэдральной сетки, то этот выигрыш может стать еще более значительным. Вторая проблема, которая решается путем использования векторных конечных элементов, заключается в том, что решение задачи будет гарантированно удовлетворять уравнению Максвелла $\text{rot}(\vec{H}) = 0$ внутри материала ферромагнетика, что, как правило, не выполняется при традиционном подходе к реше-

нию пространственного интегрального уравнения (4), основанного на применении ЭПН.

При подстановке аппроксимации (7) в интегральное уравнение (5), применяя метод взвешенных невязок с константами в качестве весовых функций, мы получим систему алгебраических уравнений вида

$$H_m + \sum_{i=1}^{i_{\max}} H_i \sum_j \frac{\mu_r^{(j)} - 1}{4\pi l_m} \int_{V_j} \frac{\vec{L}_i^{(j)}(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv = H_{cm}.$$

Внутреннее суммирование в последнем выражении производится по всем тетраэдрам, в состав которых входит ребро с номером i .

Существенным обстоятельством, сопутствующим практической реализации рассматриваемого подхода к решению задачи, является то, что все интегралы в последнем выражении берутся аналитически. Это особенно важно ввиду сингулярности подынтегрального выражения. При формировании системы уравнений неизвестные величины H_i , относящиеся к ребрам — связям, заменялись суммами, включающими только базовые переменные и полученными из соотношения (8).

Особо необходимо отметить формирование уравнений для ребер, расположенных на плоскостях симметрии. На некоторых гранях напряженность магнитного поля имеет только нормальную компоненту, соответственно тангенциальные компоненты напряженности на этих же гранях автоматически приравнялись нулю. Кроме того, было использовано то обстоятельство, что полный интеграл от напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равен полному току в катушке. Поэтому одно из уравнений рассматриваемой системы было заменено суммой вида

$$\sum_m H_m l_m = \frac{I_c}{2},$$

причем начальный и конечный узел в цепочке ребер, входящих в сумму, располагались на горизонтальной плоскости симметрии трансформатора (см. рис.1), а сама сформированная цепочка охватывала первичную обмотку трансформатора.

Сравнение результатов математического моделирования с экспериментом. Результаты математического моделирования магнитных потоков в трансформаторе, выполненного с использованием метода ПриУ и аппроксимацией неизвест-

ных функций на базе ЭПН и ВКЭ, сравнивались с соответствующими экспериментальными данными. В частности, проводилось сопоставление магнитных потоков, проходящих в центральном стержне трансформатора, а также потоков рассеяния. Для расчета магнитного поля на базе ЭПН 1/8 часть сердечника трансформатора была разбита на 1620 элементов, что соответствует 4860 неизвестных проекций намагниченности. Моделирование на основе ВКЭ проводилось при сопоставимой дискретизации. Тетраэдральная сетка, на которой проводилась аппроксимация напряженности магнитного поля в 1/8 части сердечника, включала в себя 1290 узлов и 3750 тетраэдров. Общее количество неизвестных величин в этой постановке с учетом условий симметрии составило 1218.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при небольших токах катушки, соответствующих ненасыщенному магнитопроводу, расчетные значения основного потока, полученные с использованием ЭПН, значительно отличаются от экспериментально полученных величин. Разница между ними достигает уровня порядка 90 % (рис. 3). При более высоких значениях тока в обмотке относительная магнитная проницаемость сердечника снижалась до уровня нескольких сотен единиц и точность моделирования потока значительно улучшалась. Тем не менее даже при максимальном токе в обмотке погрешность расчета составляла величину порядка 10 %. Также значительна разница между экспериментальными и расчетными значениями потоков рассеяния практически во всем диапазоне изменения тока в обмотке трансформатора (рис. 4).

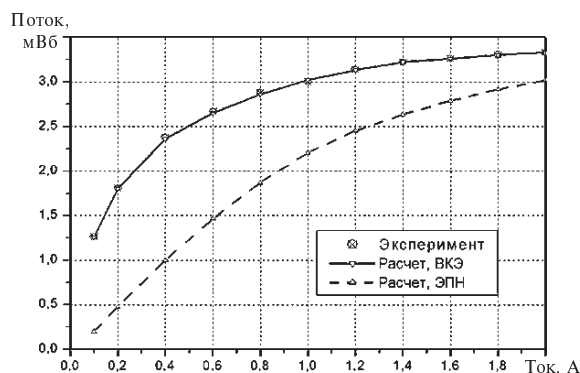


Рис. 3. Зависимость магнитных потоков центрального и боковых стержней сердечника от тока катушки

В то же время реализация метода ПриИУ с применением ВКЭ позволила достичь существенно более высокой точности даже при меньшей дискретизации расчетной области. Особенно наглядно разница в получаемых результатах видна на примере сравнения потоков рассеяния. При расчете этой характеристики методом ПриИУ — ЭПН ошибка достигает нескольких сотен процентов. Применение же ВКЭ снижает различие в расчетных и экспериментальных данных до величины порядка 1 %, что практически совпадает с погрешностью самих измерений.

Приведенные на рис. 3 данные позволяют сделать вывод о том, что точность расчета основных магнитных потоков в стержнях трансформатора при использовании ВКЭ находится на уровне порядка нескольких десятых долей процента, что является хорошим результатом для метода, относящегося к группе интегральных методов расчета магнитного поля.

Основные результаты

В работе рассмотрены особенности применения метода пространственных интегральных уравнений для моделирования магнитного поля токонесущих катушек постоянного тока с замкнутым магнитопроводом. Показано, что применение векторных конечных элементов для аппроксимации напряженности магнитного поля значительно увеличивает точность моделирования при одновременном уменьшении числа неизвестных величин. Выполнено сравнение результатов численного моделирования потока в центральном стержне трансформатора, а также потока рассеяния с данными физического эксперимента, показав-

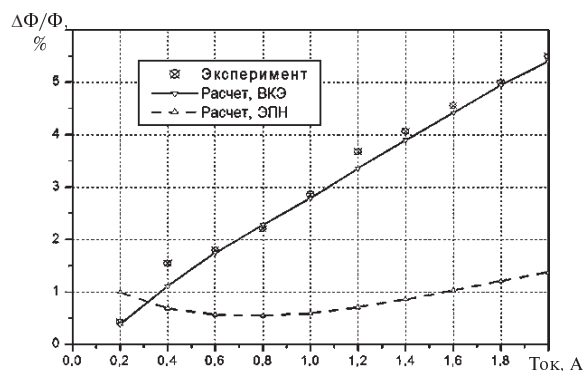


Рис. 4. Зависимость потока рассеивания от тока катушки



шее их удовлетворительное совпадение. Максимальная погрешность составила величину порядка 0,5 % от полного магнитного потока в сердечнике трансформатора. Показано, что применение

классического метода пространственных интегральных уравнений для решения той же задачи приводит к недопустимо высоким ошибкам при сравнимых затратах вычислительных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатов, П.А. Численный расчет электромагнитных полей [Текст] / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин.— М.: Энергоатомиздат, 1984.

2. Справочник по магнитным и электрическим свойствам горячекатаной стали [Текст].— М.: Изд-во Госкомстата, 1971.

3. Важнов, С.А. Применение пространственных интегральных уравнений для расчета магнитного поля и потоков рассеяния трансформатора с шихтованным ферромагнитным сердечником [Текст] / С.А. Важнов, А.Г. Калимов // Изв. РАН.

Энергетика.— 2009.— С. 27–35.

4. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.— СПб.: Питер, 2003.

5. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич.— М.: Мир, 1975.

6. Cendes, Z. Vector Finite Elements for Electromagnetic Field Computation [Текст] / Z. Cendes // IEEE Trans. on Magnetics.— 1991. Vol. 27. № 5.— P. 3958–3966.

УДК 004.89:004.045

*Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев,
А.И. Модягин, С.М. Панталеев*

РЕГИСТРАЦИЯ ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗА СЦЕНЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКИ

Автоматизация и роботизация любых динамических процессов, в частности функционирования автономных мобильных платформ и космических манипуляторов, базируется на эффективности сбора информации об окружающей среде. Для корректного представления робототехнических систем об окружающем пространстве необходимо зарегистрировать трехмерный портрет сцены с четким определением границ объектов и их разделением на движущиеся и стационарные.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

измерить двумерное угловое распределение дальности до препятствия;

провести сшивку границ объектов по признаку резкого изменения дальности;

осуществить векторизацию изображения за счет выделения объектов по замкнутости границ с присвоением номера и свойств (угловые габариты, форма границ, форма поверхности и т. д.).

Кроме того, для быстрого и адекватного реагирования на изменения в окружающей среде робототехническим системам необходимо получать не только достоверные, но и своевременные данные. В связи с этим одним из основных требований, предъявляемых к современным средствам сбора информации, является их функционирование в режиме реального времени. При этом желательно, чтобы сбор данных об окружающей среде осуществлялся независимо от освещенности рабочей зоны — как в условиях яркого освещения, так и при полном отсутствии источников света.

Механические методы измерения координат за счет определения расстояний не подходят для создания систем реального времени из-за их громоздкости, низкого быстродействия и отсутствия универсальности. Смена объекта исследований при использовании таких методов, как правило, требует полной перестройки схемы измерений.

Радиотехнические методы определения координат имеют ключевой недостаток, связанный с разрешающей способностью и, как следствие, высокой погрешностью измерения. Наиболее перспективными и универсальными, на наш взгляд, являются оптические методы построения трехмерного портрета сцены.

Существуют два основных оптических подхода к проблеме воспроизведения объемного образа рабочей зоны. Первый [1] базируется на использовании лазерного излучения, импульсного или модулированного, и измерении времени задержки между сигналами зондирующего и отраженного излучений.

На сегодняшний день лазерные сканирующие дальномеры, построенные по времяпролетному принципу, — самые прецизионные системы дистанционного осязания.

Основное преимущество радарных методов определения дальности до объектов заключается в слабой зависимости точности измерения расстояния от дальности. Уровень отраженного сигнала при этом уменьшается пропорционально квадрату расстояния, что предполагает использование приемников с большим динамическим диапазоном. Требуемая точность измерения расстояния в 2 см определяет допустимую погрешность измерения временной задержки 120 пс. Это означает, что полоса частот приемника и приемного усилителя при импульсном лазерном излучении должна составлять 10 ГГц, а длительность импульса лазерного излучения не должна превышать 100 пс.

В принципе, несмотря на высокие технические сложности, эта задача на сегодняшний день вполне разрешима. При помощи амплитудной модуляции непрерывного излучения можно попытаться упростить задачу, снизив частоту модуляции до нескольких сотен мегагерц. Но ключевой проблемой в этом случае остается относительно низкое быстродействие, связанное с необходимостью формирования прецизионной двумерной развертки в широком поле зрения (доступном на сегодняшний день исключительно для механических сканирующих устройств).

Учитывая тот факт, что сканирующая система должна работать одновременно на передающий и приемный тракт, размеры поворачиваемого зеркала нельзя выбирать малыми для обеспечения минимального момента инерции,

так как в этом случае падает эффективность сбора диффузно рассеянного излучения, что требует повышения мощности зондирующего излучения для обеспечения заданного уровня точности измерений. Но повышение мощности зондирующего излучения еще сильнее обостряет проблему безопасности для органов зрения обслуживающего персонала.

Другая проблема использования лазерных дальномеров в ближней зоне связана с подавлением диффузного рассеяния сигнала на оптических элементах приемно-передающего тракта. Даже зеркально отражающие поверхности из-за микрошероховатостей имеют коэффициенты диффузного отражения порядка 10^{-4} – 10^{-5} . А уж пропускающие поверхности (линзы, окна) имеют остаточное отражение после просветления на уровне нескольких десятых процента. При использовании импульсного излучения можно применять временное разделение сигналов с выключением чувствительности приемника на временной интервал мертвой зоны (в нашем случае величина мертвой зоны 1–2 м). Однако включение чувствительности приемника за единицы наносекунд представляет собой достаточно серьезную техническую проблему.

В случае амплитудной модуляции непрерывного излучения можно попытаться сбалансировать все отражения, т. е. настроить приемно-передающий тракт таким образом, чтобы в отсутствие отражающих объектов в рабочей зоне сигнал биений равнялся нулю. Однако это, с одной стороны, требует разработки специальной оптической схемы тракта с наличием элемента с малой и переменной отражательной способностью, а с другой, — не обеспечивает надежности измерений из-за высокой вероятности температурного дрейфа расстояний в тракте. Другой вариант решения проблемы засветки от оптических элементов — использование раздельных приемного и передающего трактов.

В этом случае ключевой проблемой становится синхронизация сканирования и обеспечение надежного перекрытия поля зрения приемной системы с областью подсветки. При этом опять возникает проблема быстродействия механических сканирующих устройств. Учитывая тот факт, что требуемая точность измерения составляет 2 см, а предельная дальность 20 м, количество точек измерения по одной координате долж-



но быть порядка 1000. Или порядка 1 000 000 точек при двумерном сканировании. При движении объекта со скоростью 0,5–1 м/с он проходит расстояние в 2 см за 20–40 мс. Ни одна сканирующая механическая система не способна обеспечить за такой временной интервал сканирование даже хотя бы десятка линий, не говоря уже о тысячах.

Высокая сложность и стоимость лазерных дальномеров препятствуют широкому применению в сервисной и персональной робототехнике. Большие массогабаритные параметры препятствуют оснащению автономных мобильных платформ, а наличие движущихся деталей сканаторов существенно ограничивают условия и области применения.

Второй [2] оптический подход базируется на широко используемом в природе стереоскопическом эффекте, когда пространственный разнос органов зрения у животных и человека позволяет осуществлять оценку дальности до предмета по триангуляционному принципу. Стереометрические телевизионные методы не требуют затрат на дополнительное освещение в дневных условиях и обладают хорошим быстродействием, но имеют значительную погрешность измерения расстояния. Самый же серьезный их недостаток с позиций автоматизации вычислений — сложность однозначной идентификации общих точек в двух изображениях сцены с различных ракурсов.

Типичный пример неоднозначности восстановления расстояния до объекта приведен на рис. 1, на котором продемонстрированы два случая — корректного и некорректного измерения расстояния. Если в случае ровной стены ее крайние точки, видимые разнесенными камерами, совпадают, то измерение дает корректное значение расстояния до стены. Если же в случае выпуклой формы объекта камеры принимают за границы объекта разные его точки, то расстояние определяется неправильно (в данном примере определяется расстояние до точек пересечения прямых лучей от камер, то есть существенно ближе, чем в реальности). Часто проблемы возникают из-за наличия бликующих поверхностей, чрезмерной освещенности отдельных областей или слабого текстурирования поверхности, что не позволяет выделить на ней реперные точки. Все это приводит к возникновению неопределен-

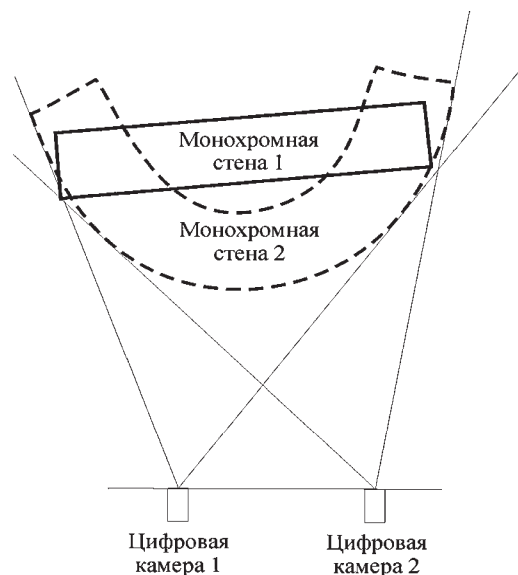


Рис. 1. Иллюстрация некорректности определения расстояния до края объекта методом триангуляции при сложной форме объекта

ностей, не позволяющих однозначно восстановить трехмерный портрет сцены.

Вариант, позволяющий избежать неоднозначности восстановления портрета и достижения требуемого быстродействия, на наш взгляд, заключается в комбинации пассивных и активных средств. В работе [3] для ускорения процедуры восстановления трехмерного образа сцены было предложено использовать пространственно-временную структурированную подсветку в сочетании с одной или двумя телевизионными камерами. С целью увеличения объемов информационных потоков и снижения требований к датчикам угловых скоростей предлагалось использовать несколько (от 5 до 10) генераторов лазерных линий подсветки. Необходимо отметить, что такая система не позволяет достичь требуемой скорости съемки кадров.

Для построения системы формометрии реального времени с учетом скорости человеческой реакции частота регистрации сцены должна быть не меньше 20 Гц. При этом для получения достаточного углового разрешения трехмерного изображения необходимо использовать большое количество (не менее 40–50) линий лазерной подсветки. Принимающая видеокамера, таким образом, должна снимать кадры с частотой 800 кадров в секунду. Подобная скорость видеосъемки обеспечивается, в частности, промышленной

скоростной видеокамерой Baumer (Германия) НХС40N1R. Она позволяет снимать с указанной скоростью при разрешении 2000×500 пикселей.

Для лазерной подсветки можно использовать полупроводниковый лазер или светодиод мощностью от 100 мВт до 1 Вт с рабочей длиной волны в диапазоне 800–850 нм. Для генерации подсветки можно использовать лазер Z50M18B-F-830 компании Z-Laser (Германия) с насадками, формирующими на выходе лазера либо прямую линию, либо несколько прямых, параллельных относительно друг друга линий.

Заметим, что для уклонения от неопределенности в один момент времени должна быть включена только одна линия подсветки и для получения 40 линий необходимо использовать либо механическое, либо электронное сканирование.

При механическом сканировании принцип действия измерительного комплекса может заключаться в использовании одного лазерного излучателя с веерной расходимостью луча, формируемой при помощи цилиндрического зеркального элемента оптического передающего тракта. Такой подход позволяет получить относительно дешевую систему формометрии, которая вполне пригодна для использования в наземных условиях.

Система с электронным сканированием включает в себя 40 лазерных диодов, расположенных под углом относительно друг друга. Такая система дороже механического варианта, но имеет ряд достоинств: отсутствие движущихся

механических деталей, компактность и возможность разрабатывать различные интеллектуальные алгоритмы управления системой формометрии. Например, она позволяет управлять мощностью лазерных излучателей либо в случае простой композиции сцены, которая допускает однозначное определение порядкового номера линии подсветки, для увеличения скорости работы системы включать не по одному, а по несколько лазерных излучателей одновременно.

Использовать ее целесообразно только в экстремальных условиях, например в космосе для стыковки космических кораблей или монтажа ферменных конструкций либо для формирования системы телеосязания различных робототехнических космических комплексов. Подобный подход позволяет решить первую задачу при построении систем эффективного сбора информации и перейти к решению второй задачи — векторизации полученных данных.

Что касается стратегии подхода к процессу оптимизации сбора визуальной информации, наиболее перспективной представляется тенденция разделения задач векторизации и идентификации не только на алгоритмическом, но и на аппаратном уровне. С целью высвобождения ресурсов центрального процессора для решения задач функционального назначения предварительную обработку по обоим каналам целесообразно вынести на отдельные процессоры, как это показано на рис. 2.



Рис. 2. Архитектура системы сбора и обработки координатной информации автономного робототехнического комплекса



Совместное использование пространственно-структурированной лазерной подсветки и разделения задач векторизации и идентификации позволит обеспечить самые высокие скорости обработки информационных потоков, что создаст предпосылки для реализации полноценных систем технического зрения реального времени.

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственным контрактам на выполнение научно-исследовательских работ от 12 мая

2011 г. № 16.518.11.7054, от 29 апреля 2011 г. № 16.552.11.7027 с Минобрнауки России, заключенным в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Межерис, Р.** Лазерное дистанционное зондирование [Текст] / Р. Межерис.— М.: Мир, 1987.— 550 с.

2. **Scharstein, D.** A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [Текст] / D. Scharstein, R. Szeliski // Technical report

MSR-TR-2001-81.— Microsoft Research.— 2001.

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,

УДК 532.529:536.24

Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПАРОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Развитие паротурбостроения идет по пути создания мощных установок, рассчитанных на работу с высокими начальными параметрами пара (рис. 1) [1 — 3]. В процессе эксплуатации паровых турбин при сверхкритических параметрах пара (СКПП) выявляется ряд проблем: образование трещин в элементах корпусов цилиндров высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД); рост остаточных прогибов роторов и коробление обойм концевых уплотнений ЦСД; износ гребней уплотнений и, как следствие, увеличение протечек; ограничения по скорости изменения параметров пара, что отрицательно отражается на маневренности.

Переход на суперсверхкритические параметры пара (ССКПП) делает актуальным применение системы принудительного парового охлаждения (СППО) наиболее горячих и напряженных деталей проточных частей паровых турбин (в ча-

стности, роторов), что позволяет продлить ресурс и повысить надежность работы турбоустановки.

Создание и внедрение СППО роторов требует решения ряда задач. К ним относятся: определение температуры и расхода омывающего ротор пара, обеспечивающих необходимое охлаждение металла ротора; определение оптимальных мест ввода охлаждающего пара, не вызывающих переохлаждения элементов турбины; проведение расчетов теплового состояния роторов в районе охлаждения, в том числе сравнительных — с охлаждением и без него; определение влияния охлаждения на термонапряжения роторов.

На рис. 2, а представлен эскиз двухпоточного цилиндра среднего давления (ЦСД) паротурбинной установки в районе первых двух ступеней с проточными частями правого и левого потока. По оси паровпуска через подводящий

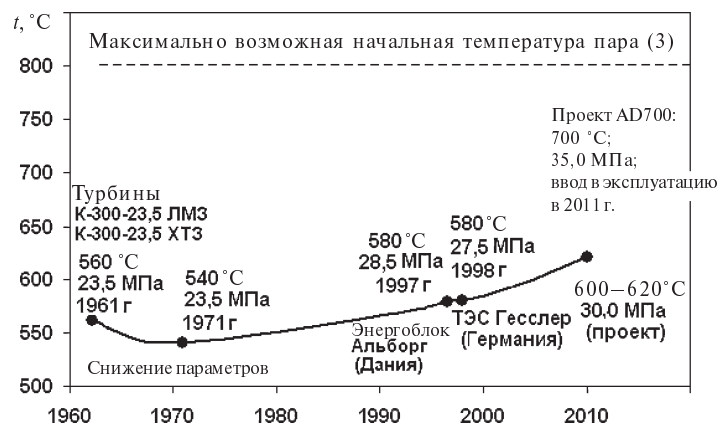


Рис. 1. Изменение начальных параметров пара в турбоустановках

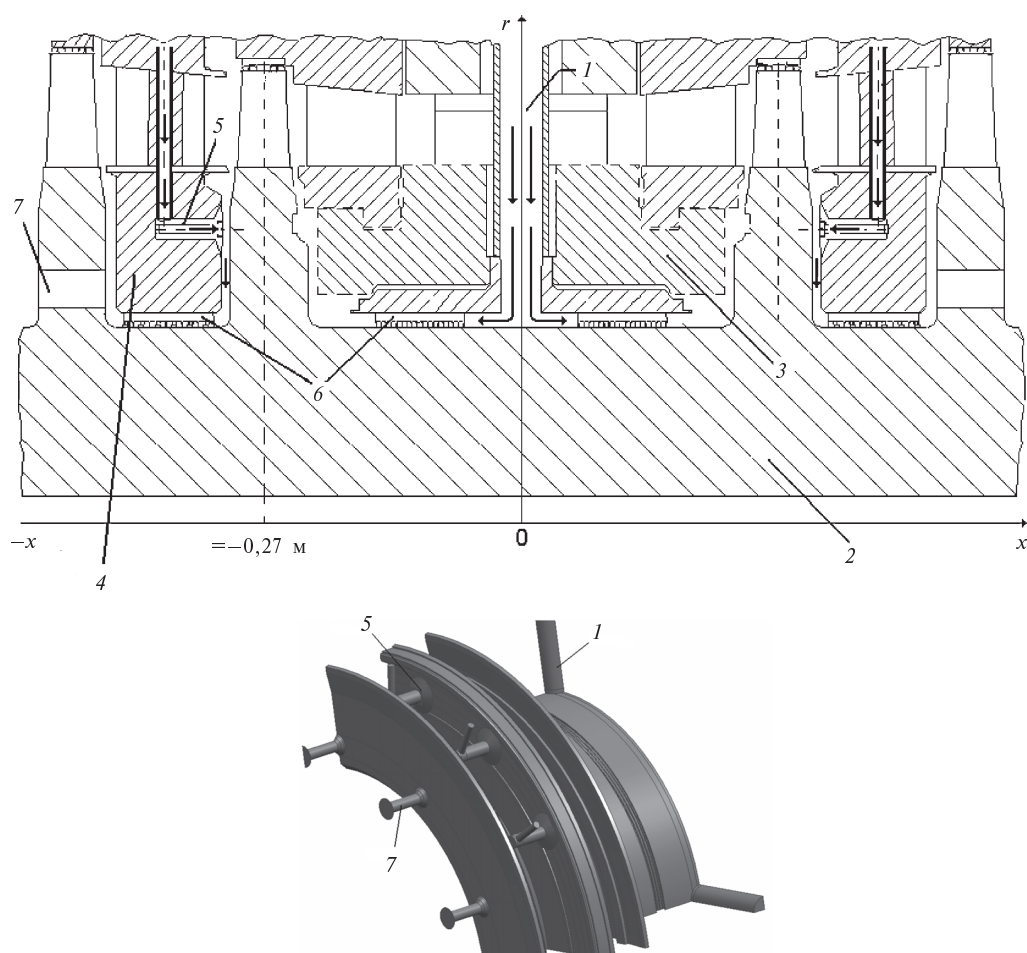


Рис. 2. Эскиз двухпоточного ЦСД (а) и проточная часть СППО (ротор не показан) (б):
1 — подводящий патрубок; 2 — ротор; 3 — направляющее кольцо;
4 — тело диафрагмы; 5 — форсунки; 6 — уплотнения; 7 — разгрузочные отверстия



патрубок 1 поступает охлаждающая среда: смесь пара холодного промежуточного перегрева (ХПП) и пара горячего промежуточного перегрева (ГПП). Этот охлаждающий пар омывает ротор 2 и направляющее кольцо 3, закрепленное на диафрагмах первых ступеней турбины, а затем через зазоры между кольцом и дисками первых ступеней возвращается в проточную часть турбины, охлаждая по ходу торцевые поверхности кольца и дисков. Пар ХПП, подаваемый из выхлопа цилиндра высокого давления (ЦВД) к диафрагмам вторых ступеней ЦСД, охлаждая обод диафрагмы, проходит через направляющие лопатки и тело диафрагмы 4. В зазор между диском первой ступени и телом диафрагмы холодный пар поступает через форсунки 5 и смешивается с более горячим паром, подсасываемым из проточной части, а затем проходит через уплотнения 6, охлаждая как диафрагму, так и ротор на этом участке.

Таким образом, проточная часть СППО турбины содержит участки с трехмерным характером течения, однако среди них можно выделить такие участки, которые либо периодически повторяемы, либо симметричны относительно выделенных плоскостей.

Рассматриваются два варианта конструкции СППО, один из которых (вариант №1) исключает использование форсуночного охлаждения торцевой поверхности второго диска ротора. Работа системы охлаждения роторов осуществляется посредством подачи охлаждающего пара с температурой 440–475 °С для снижения нагрева металла ротора ЦСД до уровня 450–460 °С и ротора ЦВД до 470–475 °С. Во втором варианте для охлаждения дополнительно используются форсуночные струи пара, имеющие температуру 310 °С (рис. 2, б).

В [4] расчет теплового состояния ротора и дисков паровых турбин опирается на использование несопряженной осесимметричной постановки, справочных данных по гидравлическим сопротивлениям и критериальным зависимостям для определения коэффициента теплоотдачи. При этом участок ротора под диафрагменными уплотнениями рассматривается в упрощенном виде, не учитывается изменение температуры омывающего пара на данном участке, влияние разгрузочных отверстий в дисках и т. д.

Цель нашего исследования — разработка трехмерного подхода к расчету теплового состо-

яния высокотемпературных элементов проточной части паровой турбины при наличии СППО с учетом сопряженности газодинамических и тепловых процессов.

Постановка задачи и вычислительные аспекты

Метод трехмерного расчета — составная часть CAD/CAE системы, которая позволяет проводить информационную поддержку как в процессе создания электронного чертежа с помощью Компас, AutoCAD или Unigraphics, так и при проведении газодинамических и тепловых расчетов. Для разработки проточных частей паровых турбин активно используются CFD (Computational Fluid Dynamics) коды [5], которые базируются на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье — Стокса и энергии.

Постановка задачи о тепловом состоянии высокотемпературных элементов проточной части паровой турбины предполагает, что течение и теплообмен описываются системой стационарных уравнений Навье — Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу в трехмерной постановке. Решение основных уравнений сохранения строится на основе метода контрольного объема в пакете Fluent [6].

Дискретизация пространственных операторов осуществляется по схеме второго порядка. В качестве сеточного генератора применяется пакет Gambit, являющийся препроцессором для Fluent. В качестве модели турбулентности выбрана SST $k-\omega$ (модель Ментера). Вращение отдельных элементов расчетной области задавалось с помощью подхода Single Reference Frame.

Главная проблема моделирования термозагазованности на основе CFD-кодов при ССКПП — существенная взаимосвязь между уравнениями сохранения импульса и энергии. Это обусловлено усилением нелинейности в уравнении состояния (в виде уравнения состояния водяного пара Я. Юзы [7]) и зависимости теплофизических свойств пара от температуры. Так, изменение теплопроводности, динамической вязкости и плотности водяного пара при давлении 2–3 МПа в диапазоне температуры 310–700 °С приводит к изменению в 1,78; 2,02 и 1,74 раз соответственно [8]. При этом массовую изобарную теплоемкость можно считать постоянной (ее изменение не превышает 0,4 %).

Свойства водяного пара моделируются с помощью разработанного модуля STEAM, который

интегрирован в пакет Fluent в качестве пользовательской функции UDF (user defined function), учитывающей изменения плотности и теплофизические свойства водяного пара.

Аппроксимация (1) для расчета плотности водяного пара $\rho(T, p)$, представленная в [7] и описывающая свойство пара с погрешностью, не превышающей 0,04 %, в диапазоне температур $200^\circ\text{C} \leq t \leq 700^\circ\text{C}$ и давлений $0,1 \text{ МПа} \leq p \leq 250 \text{ МПа}$, имеет вид

$$\rho(T, p) = [R(T/1000)/p + A_0(T) + A_1(T)p]^{-1}, \quad (1)$$

где $R = 0,46151 \text{ кДж/(кг К)}$; T — абсолютная температура, К; p — давление, МПа; ρ — плотность, кг/м^3 ; функции $A_0(T)$ и $A_1(T)$ в виде степенных полиномов от температуры приведены в [7].

Зависимости для определения коэффициентов теплопроводности λ и динамической вязкости μ имеют вид

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0(\tau) + \lambda_1(\delta) + \lambda_2(\tau, \delta), \\ \bar{\mu} &= \bar{\mu}_0(\tau) \bar{\mu}_1(\tau, \delta) \bar{\mu}_2(\tau, \delta). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\lambda_0(\tau) = \tau^{0,5} \sum_{k=0}^3 a_k \tau^k$ — теплопроводность

в идеально-газовом состоянии; $\bar{\mu}_0(\tau) = \tau^{0,5} /$

$\left(\sum_{i=0}^3 H_i / \tau^i \right)$ — динамическая вязкость в преде-

ле нулевой плотности; $\tau = T/T^*$, $T^* = 647,256 \text{ К}$;

$\delta = \rho/\rho^*$, $\rho^* = 317,7 \text{ кг/м}^3$; $\bar{\mu} = \mu/\mu^*$, $\mu^* =$

$55,071 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Вид функций $\lambda_1(\delta)$, $\lambda_2(\tau, \delta)$,

$\bar{\mu}_1(\tau, \delta)$, $\bar{\mu}_2(\tau, \delta)$ и значения коэффициентов a_k и H_i приведены в [8].

Погрешность аппроксимации для теплопроводности водяного пара составляет 3 %, а динамической вязкости — 2 %.

Решение задачи выполнено в сопряженной постановке, когда совместно решаются уравнения конвективного теплообмена для парового потока и теплопроводности для ротора и дисков, что подразумевает введение на границе сопряжения равенства температур и тепловых потоков (граничные условия четвертого рода). Численная реализация сопряженной постановки предполагает такое построение блоков, чтобы сетки сты-

ковались на их границах. При этом каждый блок должен (одной из своих граней) стыковаться только с одной стороной другого блока.

С целью экономии вычислительных ресурсов проточная часть СППО заменяется трехмерной моделью в виде сектора, на боковых гранях которого задается условие периодичности. Тогда в расчетной области прописывается геометрия лишь одной форсунки и одного разгрузочного отверстия, а также сектора канала паровпуска. Расчетная модель включает также условие симметрии по продольной координате, что предполагает уменьшение расчетной области в два раза за счет введения в рассмотрение только одного потока пара.

Два варианта конструкции СППО отличаются друг от друга тем, что в одном из них (первый вариант) запорты каналы форсунок. Расчетная сетка для газовой и твердотельной областей содержит 1,5 млн узлов. Сходимость итерационной процедуры достигается по прошествии 700 итераций.

Определяющими параметрами для обоих вариантов конструкции СППО являются: вращательное число Рейнольдса $Re_{\omega r} = \omega r_d^2 / \nu = 3,9 \cdot 10^7$, число Рейнольдса для области паровпуска $Re_{i1} = 2G_1 / \pi \mu D_{cp} = 1,3 \cdot 10^4$, где r_d — радиус диска; D_{cp} — средний диаметр кольцевого зазора между ротором и статором; G_1 — массовый расход охлаждающего пара.

Число Брьюна $B_{\omega r}$ для условий вращения

принимается в виде [9] $B_{\omega r} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{ст}}} \frac{b_d}{r_d} \text{Pr}^{0,6} \text{Re}_{\omega r}^{0,8} =$

$= 305$, где b_d — толщина диска, $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ — теплопроводность пара и металла поверхности дисков (ротора); Pr — число Прандтля для пара.

Для варианта №2 третьим режимным параметром является число Рейнольдса для форсуночных струй $Re_{i2} = 2G_2 / \pi \mu D_{\text{ф}} = 2,0 \cdot 10^4$, где $D_{\text{ф}}$ — средний диаметр кольцевой щели; G_2 — массовый расход пара через одну форсунку; μ , ν — динамическая и кинематическая вязкости пара при температуре перегретого пара $t_{\text{п}} = 565^\circ\text{C}$.

Результаты численного моделирования

Учет реальных свойств водяного пара, омывающего ротор и диски, приводит к снижению рассчитанной температуры металла ротора в радиальном и осевом направлениях (кривые 1,

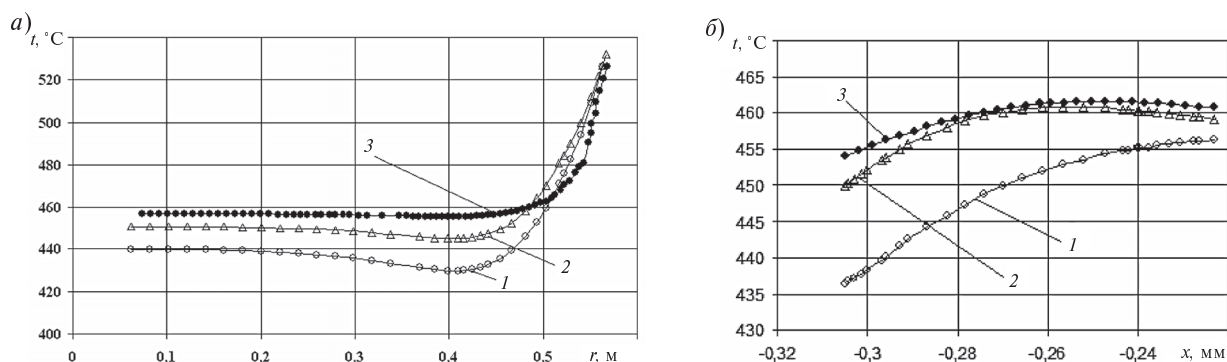


Рис. 3. Распределение температуры в радиальном направлении для сечения $x = -0,27$ м (а) и по толщине диска на радиусе $r = 0,5$ м (б): 1 — сопряженная модель с применением модуля STEAM; 2 — сопряженная модель с приближением совершенного газа; 3 — несопряженная постановка [4]

рис. 3, а, б) по сравнению с результатами расчета на основе модели совершенного газа (кривые 2). При этом различие в значении температуры металла диска может достигать $18\text{ }^\circ\text{C}$. Применение несопряженной осесимметричной постановки (методика РТМ [4]) демонстрируют отсутствие температурного перепада по толщине диска (рис. 3, б, кривая 3).

Результаты трехмерного расчета для варианта №1 с применением модуля STEAM показывают (рис. 4, а), что вращение ротора и дисков с угловой скоростью 3000 об/мин интенсифицирует процесс турбулентного перемешивания в проточной части и способствует выравниванию окружной неравномерности температуры.

При этом температура поверхности ротора превышает $490\text{ }^\circ\text{C}$ при подаче только через цент-

ральный паровпуск охладителя с температурой, равной $460\text{ }^\circ\text{C}$. Окружная неравномерность появляется только вблизи разгрузочного отверстия второго диска.

Усложнение конструкции СППО за счет дискретного подвода форсуночных струй к боковой поверхности диска первой ступени приводит также к небольшому искривлению в окружном направлении изотерм (рис. 4, б). Это связано с тем, что вращение ротора индуцирует слои пара, которые для варианта №2 СППО «размазывают» по окружной координате неоднородности в распределении температуры металла дисков и ротора.

При этом охлаждающий пар из форсунки не приобретает свойства струи, способной прямо взаимодействовать с поверхностью диска. В этом

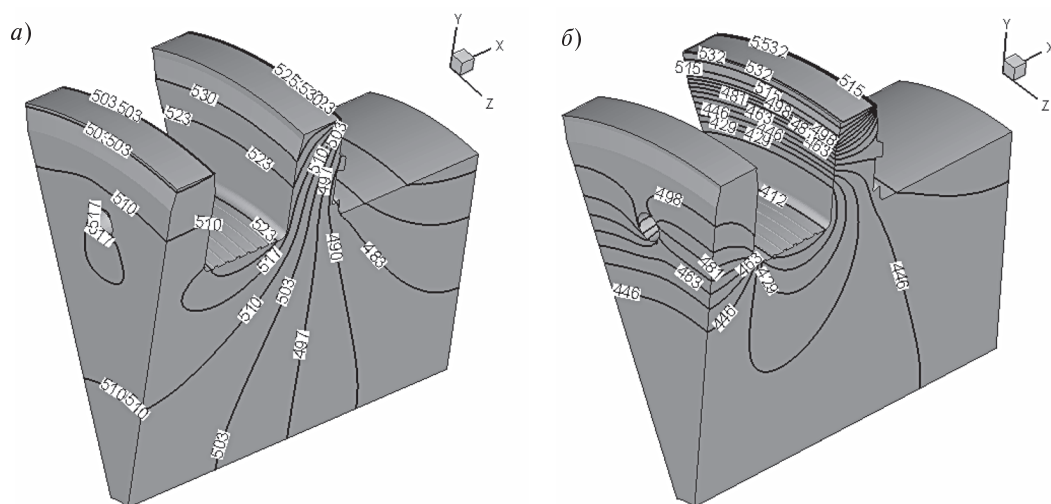


Рис. 4. Трехмерные изотермы для ротора и дисков первых двух ступеней:
а — вариант №1 СППО; б — вариант №2 СППО

случае охлаждающий эффект достигается вследствие стока теплоты в корпус форсунки, имеющей более низкую температуру.

Использование комбинированной системы принудительного парового охлаждения, включающей в себя радиальные каналы паровпуска и дискретный струйный обдув под углом к торцевой поверхности диска первой ступени, приводит к снижению температуры поверхности ротора, которая в этом случае не превышает $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, б).

Основные результаты работы:

1. Разработан метод трехмерного расчета теплового состояния высокотемпературных элементов проточной части паровой турбины на основе CFD-пакета FLUENT, в который интегрирован модуль STEAM (в качестве пользовательской функции UDF), учитывающий свойства водяного пара при суперсверхкритических параметрах.

2. Показано, что применение модели реального газа для расчета сопряженного теплообмена при течении водяного пара приводит к снижению температуры металла ротора турбины на $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по сравнению с моделью совершенного газа) и одновременному росту градиента температуры для диска первой ступени.

3. Рассмотрены два варианта конструкции системы принудительного парового охлаждения. Отмечено, что вращение ротора индуцирует слои пара, которые для обоих вариантов СППО «размазывают» по окружной координате неоднородности в распределении температуры металла дисков и ротора. Использование комбинированной СППО, включающей в себя радиальные каналы паровпуска и дискретный струйный обдув под углом к торцевой поверхности диска первой ступени, приводит к снижению температуры поверхности ротора до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний, А.Д. Паротурбинные энергоблоки нового поколения [Текст] / А.Д. Трухний, Б.М. Трояновский // Энергетик. — 1998. № 2. — С. 9–13.
2. Трухний, А.Д. Основные научные проблемы создания паротурбинных установок для энергоблоков нового поколения. Часть 1 [Текст] / А.Д. Трухний, Б.М. Трояновский, А.Г. Костюк // Теплоэнергетика. — 2000. № 6. — С. 13–19.
3. Костюк, А.Г. Концепция паровых турбин нового поколения для угольной энергетики России. Часть 1. Экономическое и техническое обоснование концепции [Текст] / А.Г. Костюк, В.Г. Грибин, А.Д. Трухний // Теплоэнергетика. 2010. № 12. — С. 23–31.
4. РТМ 108.020.16–83. Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин / М.: Минэнергомаш. — 1985. — 115 с.
5. Fakhari, K. Numerical investigation of unsteady blade row interactions with leakage flow in steam turbines [Text] / K. Fakhari, T. Hofbauer, A. Weber // Proc. of ASME Turbo Expo.— Orlando, Florida, USA, June 8–12, 2009.— GT2009–59613.— P 20.
6. FLUENT 6.3.26. User's Guide [Text] / Fluent Inc. USA.— 2003.
7. 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.
8. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст]: Справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев.— Рек. Гос. службой стандартных справочных данных.— ГСССД Р-776–98.— М.: Изд-во МЭИ,— 1999.— 168 с.
9. Миронова, М.В. Сопряженный теплообмен на вращающемся диске [Текст] / М.В. Миронова, Н.Н. Кортиков // Труды V-й Российской нац. конф. по теплообмену РНКТ-5. — М.: Изд-во МЭИ, 2010.— Т. 7.— С. 139–141.

УДК 533.6

А.Д. Гиргидов

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИНТА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

При анализе работы воздушных винтов летательных аппаратов (ЛА) в соответствии с [1, 2] будем различать: P — мощность, получаемую

винтом от двигателя; $P_{\text{пр}}$ — мощность, затрачиваемую винтом на преодоление трения лопастей о воздух, которая зависит от геометрических



характеристик винта (профиль лопастей); $P_B = P - P_{пр}$ — мощность, передаваемую винтом атмосферному воздуху, (мощность винта); $P_{\pi} = P_B - P_{окр}$ — мощность, затрачиваемая на создание тяги, т. е. осевого движения воздуха, (мощность пропеллера); $P_{окр}$ — мощность, идущая на закручивание потока; P_a — полезная мощность, или мощность, необходимая для преодоления силы лобового сопротивления движению ЛА

$$F_a = c\rho \frac{V^2}{2} A, \quad (1)$$

где V — абсолютная скорость ЛА; c — коэффициент лобового сопротивления; A — площадь проекции ЛА на плоскость, перпендикулярную направлению движения; ρ — плотность воздуха.

Эти мощности связаны между собой следующими соотношениями:

$$P_a = \eta P; \quad (2)$$

$$P_a = \eta_a P_{\pi}; \quad (3)$$

$$P_B = P - P_{пр} = \eta_{пр} P; \quad (4)$$

$$P_{\pi} = P_B - P_{окр} = \eta_{окр} P_B, \quad (5)$$

где η — полный КПД; η_a — идеальный или осевой КПД пропеллера, у которого нет никаких потерь, кроме возникающих из-за «податливости» воздуха, [1, с. 51]; $\eta_{пр}$ — профильный или механический КПД, который оценивает потери на трение лопастей винта о воздух, где $\eta_{окр}$ — окружный КПД, равный отношению мощности, получаемой воздухом от винта без затрат на закрутку, к полной мощности, передаваемой винтом атмосферному воздуху.

Часто формулы (4) и (5) объединяют и вводят относительный КПД:

$$\eta_0 = \eta_{пр} \eta_{окр}. \quad (6)$$

При этом

$$P_B = \eta_0 P. \quad (7)$$

Как правило, в соответствии с (2)–(7) полный КПД представляют в виде

$$\eta = \eta_0 \eta_a = \eta_{пр} \eta_{окр} \eta_a. \quad (8)$$

Рассмотрим следуя [4] взаимоотношения мощностей P_{π} и P_a . Для этого выделим контрольный объем, перемещающийся со скоростью V летательного аппарата. Сам аппарат неподви-

жен относительно контрольного объема. На рис. 1 представлен только винт, при вращении которого образуется круглое сечение (ометаемая поверхность) ω . Контрольный объем ограничен:

а) поверхностью тока, которая проходит через окружность сечения ω и представляет собой поверхность вращения относительно горизонтальной оси x , совпадающей с осью винта;

б) перпендикулярными к оси x сечениями $\omega_{вх}$ и $\omega_{вых}$, удаленными от винта настолько, что в них можно считать движение плавноизменяющимся, а скорость воздуха постоянной по сечению; скорость $v_{вх}$ в сечении $\omega_{вх}$ равна скорости V полета ЛА, которая является скоростью контрольного объема.

Примем следующие допущения:

а) давление на контрольной поверхности постоянно и равно атмосферному;

б) диссипация энергии внутри контрольного объема пренебрежимо мала по сравнению с мощностью, необходимой для полета;

в) сила, обусловленная касательными напряжениями на боковой поверхности контрольного объема (поверхность вращения), пренебрежимо мала по сравнению с тягой, создаваемой винтом;

г) потоком энергии через контрольную поверхность, обусловленным этими же напряжениями, а также вкладом энергии вращательного движения воздуха в выходном сечении (закручивание потока), пренебрегаем по сравнению с мощностью винта, необходимой для создания тяги.

Используя уравнение баланса количества движения [5], получим, что тяга F_{π} , создаваемая пропеллером и равная F_a , определяется зависимостью

$$F_{\pi} = \rho Q(v_{вых} - v_{вх}), \quad (9)$$

где $Q = v_{вх} \omega_{вх} = v_{вых} \omega_{вых}$ — расход воздуха; $v_{вых}$ — абсолютная скорость воздуха на выходе из контрольного объема.

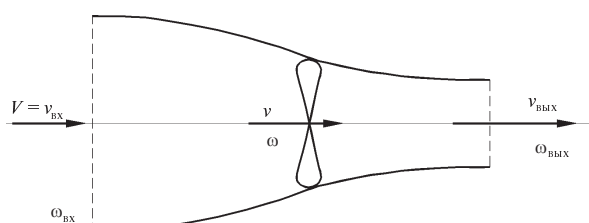


Рис. 1. Расчетный контрольный объем

Из уравнения баланса мощности найдем мощность, передаваемую винтом в контрольный объем (без учета закручивания потока):

$$P_{\pi} = \rho Q \left(\frac{v_{\text{ВВХ}}^2}{2} - \frac{v_{\text{ВХ}}^2}{2} \right). \quad (10)$$

Эта мощность P_{π} равна

$$P_{\pi} = F_{\pi} v, \quad (11)$$

где v — абсолютная средняя продольная скорость воздуха в ометаемой поверхности ω .

Подставим (9) в (11), а полученное при этом выражение — в (10); в результате найдем

$$v = \frac{v_{\text{ВХ}} + v_{\text{ВВХ}}}{2}. \quad (12)$$

Зависимость (12) известна [1] как теорема Фруд — Финстервальдера.

Полученные выше результаты позволяют сделать определенные заключения:

1. Из (9) и (12) следует, что тяга F_{π} при фиксированном расходе Q достигает наибольшего значения при $v_{\text{ВХ}} = 0$, при этом $v_{\text{ВВХ}} = 2v$. Горизонтальный полет в этом случае исключается, т. к. $V = v_{\text{ВХ}} = 0$. Вместе с тем такой режим работы пропеллера реализуется, например, при вращении вертолета; в этом случае $\omega_{\text{ВХ}}$ велико, а скорость мала и не по всему сечению направлена в положительную сторону оси x [5].

2. Если $v_{\text{ВХ}} = v_{\text{ВВХ}}$, т. е. если $\omega_{\text{ВХ}} = \omega_{\text{ВВХ}} = \omega$, то тяга равна нулю согласно (9).

Используя полученные результаты, рассмотрим, как изменяется мощность P_a , необходимая для преодоления лобового сопротивления, в зависимости от скорости полета V :

$$P_a = F_{\pi} V. \quad (13)$$

Подставив зависимость (9) в (11) и (13), а также используя (12), имеем

$$P_{\pi} = 2\rho Q(v - V)v; \quad (14)$$

$$P_a = 2\rho Q(v - V)V. \quad (15)$$

Зависимость (15) показывает, что при горизонтальном полете полезная мощность P_a равна нулю в двух крайних случаях:

1) если $V = 0$, т. е. когда ЛА неподвижен (например, он заторможен в начале взлетной полосы) и отсутствует полезный эффект;

2) если скорость V летательного аппарата становится равной скорости v потока, создаваемого пропеллером; при этом $v_{\text{ВХ}} = v_{\text{ВВХ}}$, и тяга F_{π} равна нулю согласно (9).

На рис. 2 представлены функции P_a , P_{π} и η_a в зависимости от V (при постоянных ω и v). При $v = 0$ мощность P_{π} имеет максимальное значение $P_{\pi}^0 = 2\rho Qv^2 = 2\rho\omega v^3$, от которого она линейно убывает до нуля при возрастании V от 0 до v . Согласно (8)

$$\eta_a = \frac{V}{v}. \quad (16)$$

В интервале $(0, v)$ функция P_a имеет максимум. Найдем значение V , отвечающее этому максимуму при условии, что не только ω постоянен, но и расход Q через сечение ω постоянен.

Положим $\frac{\partial P_a}{\partial V} = 0$ и найдем значение V , отвечающее максимуму P_a :

$$V_{\text{max}} = \frac{v}{2}. \quad (17)$$

При условии (16) получим значение $\eta_a = 0,5$, отвечающее максимуму P_a . Отметим, что это значение η_a найдено при условии постоянства размеров винта и расхода Q , а не при постоянной мощности P_{π} , которая при $V = v$ так же, как и P_a , равна нулю. Кроме того, значение $\eta_a = 0,5$ не является, конечно, максимально возможным значением КПД η_a .

Рассматривая другие частные КПД — $\eta_{\text{пр}}$, $\eta_{\text{окр}}$, η_0 , вводимые формулами (4), (5), (7), обратим внимание на следующее. Общепринятая при использовании понятия КПД структура формул (4), (5), (7) и (8) в случае воздушных винтов имеет существенный недостаток, неявно замеченный в [1] и заключающийся в том, что профильные (механические) потери, связанные с трением лопастей винта о воздух, определяются размерами и профилем лопастей винта, а также скоростью его вращения, но они слабо зависят от скорости V полета ЛА. Мощность P_{π} с увеличением скорости V уменьшается и (если пренебречь затратами на закручивание потока) при $V = v$ становится равной нулю, а при этом, как следует из формулы (4), $\eta_{\text{пр}} = 0$, так как $P = P_{\pi} \neq 0$. Такое значение $\eta_{\text{пр}}$ противоречит

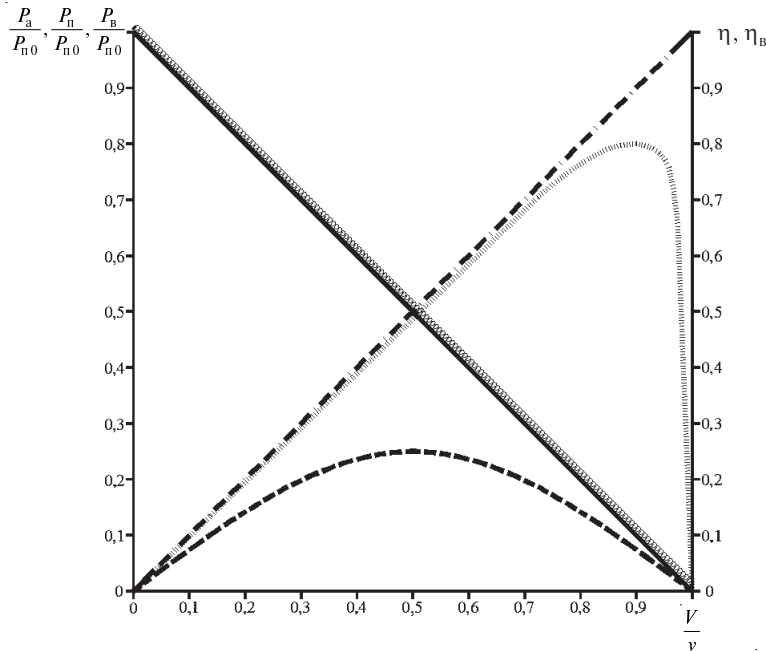


Рис. 2. Зависимости относительных мощностей и КПД от $\frac{V}{v}$:

$$\text{—} \frac{P_{\pi}}{P_{\pi 0}}; \cdots \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{в} 0}}; \text{---} \frac{P_{\text{а}}}{P_{\text{а} 0}}; \text{---} \eta_{\text{а}}; \cdots \eta_{\text{в}}$$

экспериментальным данным. Действительно, согласно рис. 3 (заимствован из [1]), когда коэффициент тяги α равен нулю (при пропорциональной поступи винта $\lambda = 0,84$), а при этом и тяга F_{π} и мощность P_{π} равны нулю, коэффициент мощности равен $\beta = 0,25$, что составляет значительную часть (около 30 %) от максимального значения $\beta = 0,85$ (при $\lambda = 0,1$). Эта часть мощности затрачивается в основном на профильные потери и на закручивание потока винтом.

Учитывая экспериментально установленную устойчивость значений профильного КПД ($\eta_{\text{пр}} = 0,84\text{--}0,88$) [3], подтверждающую его слабую зависимость от V , примем, что при всех V механические (профильные) потери мощности $P_{\text{пр}}$ будут такими же, как и при $V = 0$:

$$P_{\text{пр}} = (1 - \eta_{\text{пр}}) P_0 = (1 - \eta_{\text{пр}}) \frac{P_{\text{в}}^0}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (18)$$

где индекс 0 означает, что значения P и $P_{\text{в}}$ приняты при $V = 0$. Другими словами, примем определение $\eta_{\text{пр}}$ в виде

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{P_0 - P_{\text{в}}}{P_0}. \quad (19)$$

Как и профильные потери мощности $P_{\text{пр}}$, затраты мощности $P_{\text{окр}}$ на закручивание потока также определяются геометрическими характеристиками винта и скоростью его вращения, но слабо зависят от V . Поэтому примем

$$P_{\text{окр}} = P_{\text{в} 0} - P_{\pi 0} = (1 - \eta_{\text{окр}}) P_{\text{в} 0}. \quad (20)$$

Представим согласно (4) и (5) полную мощность в виде

$$P = P_{\pi} + P_{\text{пр}} + P_{\text{окр}}. \quad (21)$$

Подставив в (21) зависимости (14), (16), (18) и (20), получим

$$\begin{aligned} P &= 2\rho Q(v - V)v + (1 - \eta_{\text{пр}}) \frac{P_{\text{в} 0}}{\eta_{\text{пр}}} + (1 - \eta_{\text{окр}}) P_{\text{в} 0} = \\ &= 2\rho \omega v^3 \left(1 - \frac{V}{v}\right) + (1 - \eta_{\text{пр}}) \frac{P_{\pi 0}}{\eta_{\text{пр}} \eta_{\text{окр}}} + (1 - \eta_{\text{окр}}) \frac{P_{\pi 0}}{\eta_{\text{окр}}} = \\ &= 2\rho \omega v^3 \left[1 - \eta_{\text{а}} + \frac{1 - \eta_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}} \eta_{\text{окр}}} + \frac{1 - \eta_{\text{окр}}}{\eta_{\text{окр}}}\right]. \end{aligned}$$

Примем среднее значение профильного КПД $\eta_{\text{пр}} = 0,86$, а также $\eta_{\text{окр}} = 0,99$ [3]; в результате получим

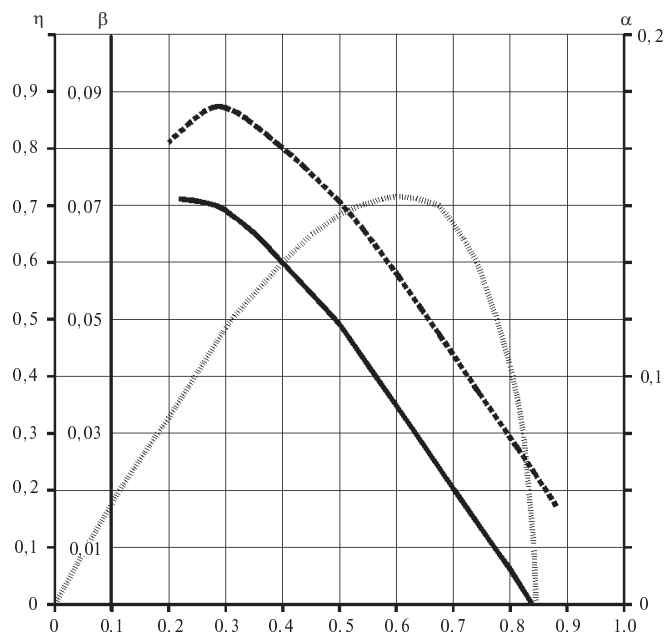


Рис. 3. Зависимости коэффициентов тяги α и мощности β , а также КПД η от пропорциональной поступи винта λ :
— α ; --- β ; η

$$P = 2\rho\omega v^3 [1 - (\eta_a - 0,17)]. \quad (22)$$

При отсутствии профильных потерь и затрат мощностей на закручивание потока (то есть когда $\eta_0 = 1,0$, а $\eta = \eta_a$) согласно (2), (15) и (16)

имеем $2\rho\omega v(v - V)V = \frac{V}{v} P$, из чего следует

$$P = 2\rho\omega v^3 (1 - \eta). \quad (23)$$

Сравнивая эту зависимость с (22), установим, что роль КПД η в (22) играет выражение $(\eta_0 - 0,17)$. Приравняв эти величины, получим

$$\eta = \eta_a - 0,17. \quad (24)$$

Такая же по структуре зависимость для η , но полученная экспериментально, приведена в [1, с. 183]:

$$\eta = \eta_a - 0,15. \quad (25)$$

Следует отметить, что эта экспериментальная зависимость получена на основе обнаруженной В.П. Ветчинкиным «эквидистантности» линий $\eta = \eta(B)$ и $\eta_a = \eta_a(B)$ (B — коэффициент нагрузки на ометаемую площадь винта), представленных на рис. 4 [1, фиг. 160]. Она справедлива для значений η_a , близких к единице (т. е.

при $V \approx v$), и совершенно непригодна при малых значениях V . Например, при $V = 0$ (зависший вертолет) она дает отрицательные значения полного КПД η . Зависимость (22), обобщающая (25), не имеет этого недостатка: при $\eta_a = 0$ она приобретает вид

$$P = 2\rho\omega v^3 1,17, \quad (26)$$

согласно чему мощность P , полученная винтом от двигателя, расходуется при неподвижном ЛА на мощность $P_{п0}$, профильные потери, составляющие около 16 %, и затраты на закручивание потока.

При $\eta_a = 1,0$ (т. е. при $V \approx v$) из (22) следует

$$P = 2\rho\omega v^3 0,17, \quad (27)$$

То есть в этом случае мощность двигателя расходуется только на профильные потери и на закручивание потока.

Значение слагаемого 0,17 в формуле (24) вполне укладывается в диапазон разброса экспериментальных данных, которые аппроксимируются в [1] значением 0,15, что доказывает приемлемость допущений, сделанных при получении числа 0,17. Дополнительно укажем, что исходные экспериментальные данные, обосновываю-

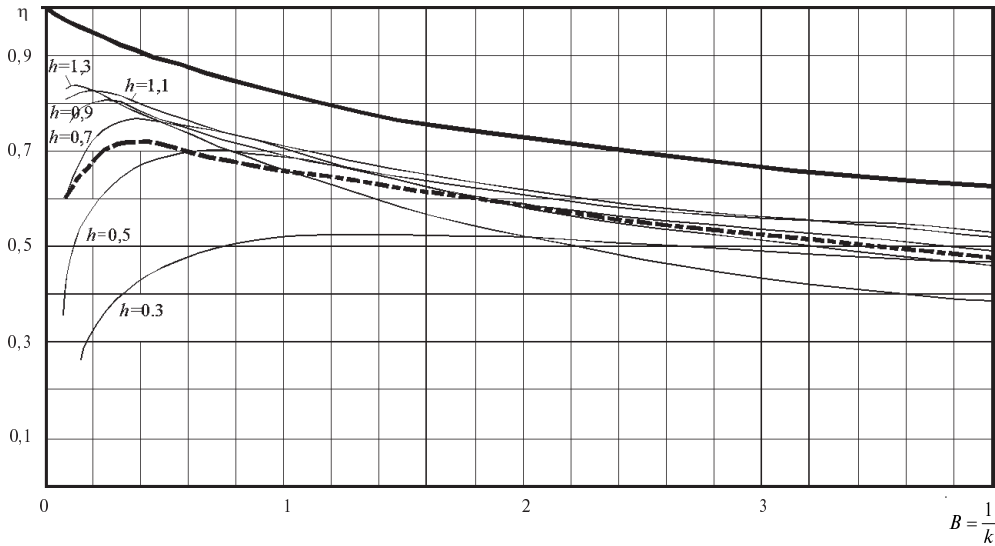


Рис. 4. Зависимость КПД η и η_a от коэффициента нагрузки B
(h — относительный шаг винта):

— η_a ; - - - η ; — — — экспериментальные значения η при различных h

щие формулу (25) [1, фиг. 160], получены для «хороших винтов», у которых $\eta_{пр} \approx 0,87-0,88$; при этих значениях $\eta_{пр}$ в формуле (22) слагаемое станет равным 0,15, как и в (25).

Для того чтобы оценить полученные результаты, приравняем тягу F_p пропеллера (9) с учетом (12) к силе F_a лобового сопротивления (1):

$$2\rho Q(v-V) = c\rho \frac{v^2}{2} A, \quad (28)$$

а также введем геометрический параметр

$$k = \frac{\omega}{cA}, \quad (29)$$

который характеризует площадь ометаемой поверхности винта относительно размеров ЛА, определяющих его аэродинамическое сопротивление.

Подставив в (28) $Q = v\omega$ и решив квадратное уравнение, получим

$$V = 2v(\sqrt{k+k^2} - k). \quad (30)$$

Из равенства (30) следует, что при выполнении условия (17) $k = \frac{1}{8}$. Легко показать, что

$k = \frac{1}{B}$, где B для реализованных ЛА принимает значения $B = 0,2-0,4$, что соответствует значениям $k = 2,5-5,0$. Следовательно, значение $k = \frac{1}{8}$

согласно определению (29) свидетельствует о том, что размеры винта, при которых реализуется максимальное значение P_a и справедливо условие (17), значительно меньше, чем у ЛА, имеющих практически приемлемые летные характеристики, а максимум P_a , который имеет место при КПД $\eta_a = 0,5$, соответствует значительным аэродинамическим потерям мощности, связанным с «податливостью» воздуха [1].

Таким образом, параметры ЛА (определяемые значением $k = \frac{1}{8}$) нельзя считать рациональными для штатных условий полета ЛА. Значения $k = 2,0-5,0$ рекомендуется [1-3] принимать с тем, чтобы согласно (30)

$$\eta_a = \frac{V}{v} = 0,916 - 0,954 \quad (31)$$

(см. [1, табл.10]), т. е. чтобы η_a было близко к единице. При значениях $k > 5$ КПД η_a еще ближе подойдет к единице. Ограничение увеличения η_a свыше значения 0,95 связывают с тем, что при больших k размеры винта могут превзойти размеры ЛА. Вместе с тем, если принять во внимание закручивание потока винтом, можно указать на аэродинамическое ограничение КПД винта.

Как было отмечено выше, затраты мощности на закручивание потока мало зависят от

скорости V полета ЛА, а определяются профилем лопастей винта и скоростью его вращения. Поэтому, составляя аэродинамический баланс мощности

$$P_B = P_{\Pi} + P_{\text{окр}}, \quad (32)$$

величину $P_{\text{окр}}$ следует вычислять по формуле (20) как часть от P_{B0} , т. е. от мощности винта при неподвижном ЛА.

Определим аэродинамический КПД винта η_B как отношение полезной мощности P_a к суммарной мощности, передаваемой винтом атмосферному воздуху и создающей как осевое, так и окружное движение воздуха (закручивание потока), т. е. к мощности винта P_B :

$$\eta_B = \frac{P_a}{P_B} = \frac{P_a}{P_{\Pi} + P_{\text{окр}}} = \frac{P_a}{P_{\Pi} + (1 - \eta_{\text{окр}}) \frac{P_{B0}}{\eta_{\text{окр}}}}, \quad (33)$$

где $P_{\text{окр}} = (1 - \eta_{\text{окр}}) \frac{P_{B0}}{\eta_{\text{окр}}}$.

Используя (14) и (15), представим (33) в виде

$$\eta_B = \frac{2\rho\omega v(v - V)v}{2\rho\omega v^2(v - V) + \frac{1 - \eta_{\text{окр}}}{\eta_{\text{окр}}} 2\rho\omega v^3}. \quad (34)$$

Эта зависимость представлена на рис. 4.

Из условия равенства нулю производной от η_B по скорости V получим

$$V = v \left[1 + k - \sqrt{k + k^2} \right], \quad (35)$$

где $k = \frac{1 - \eta_{\text{окр}}}{\eta_{\text{окр}}}$.

В литературе [1–3] приведены типичные значения $\eta_{\text{окр}} = 0,98–0,99$.

Учитывая, что в (35) входит разность $1 - \eta_{\text{окр}}$, представляется целесообразным уточнить возможные значения $\eta_{\text{окр}}$, используя [1, стр. 203, фиг. 94]. При практически приемлемых значениях

полного КПД (см. рис. 3, заимствованный из [1]) с возрастанием λ коэффициент тяги a уменьшается от 0,14 до 0,04, а $\eta_{\text{окр}}$ согласно [1, формула (228)] увеличивается от 0,987 до 0,996.

Из формулы (35) находим, что в этом диапазоне изменения $\eta_{\text{окр}}$ КПД идеального пропеллера η_a находится в пределах

$$\eta_a = \frac{V}{v} = 0,900–0,904. \quad (36)$$

Эти значения η_a (согласно [1, табл. 10]) соответствуют значениям $k = 2,0–4,0$, что вполне согласуется с рекомендуемым по экспериментальным материалам диапазоном значений k . Вычисленные по формуле (33) значения аэродинамического КПД винта η_B изменяются в диапазоне

$$\eta_B = 0,796–0,881. \quad (37)$$

Как следует из полученных значений η_B , незначительные на первый взгляд потери мощности на закручивание потока при большой скорости V полета ЛА играют существенную роль в формировании аэродинамического КПД η_a .

Предложение рассчитывать профильные потери и затраты мощности на закручивание потока как часть от мощности, получаемой винтом от двигателя при неподвижном ЛА, привело к следующим результатам:

1. Обобщение экспериментальной формулы для полного КПД в формуле (25), пригодной лишь для значений, близких к единице, и описание в виде (22) связи мощности, получаемой винтом от двигателя, с мощностью потока воздуха в ометаемой поверхности неподвижного ЛА справедливо во всем диапазоне изменений.

2. Введение аэродинамического КПД винта как отношения полезной мощности P_a к мощности винта P_B (которая включает затраты на закручивание потока) позволило устанавливать радиальный размер винта, обеспечивающий максимальную полезную мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев, Б.Н. Воздушные винты [Текст] / Б.Н. Юрьев. — М.-Л.: Госмашметгид, 1933. — 400 с.
2. Александров, В.Л. Воздушные винты [Текст] / В.Л. Александров. — М.: Оборонгиз, 1951. — 476 с.
3. Афанасьев, П.П. Основы проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов. [Текст] / П.П. Афанасьев. Ю.В. Веркин. И.С. Голубев [и др.]. — М.: Изд-во МАИ, 2006. — 528 с.
4. John, J.E.A. Introduction to Fluid Mechanics [Текст] / J.E.A. John, W.L. Haherman. — Prenticehall, Englewood cliffs. — NJ5. — 1988. — 606. — p. 1.
5. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. — 545 с.



ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В БАЙЕСОВСКОМ ПОДХОДЕ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Во многих областях человеческой деятельности широко распространены задачи, решение которых основывается на исходных данных (параметрах), представляемых численно. Зачастую, однако, описание таких данных «точечными» величинами (оценками, задаваемыми одним числом) оказывается сложным и неадекватным достижению стоящей цели — расчету значений результирующих показателей решаемой задачи в виде, способствующем принятию обоснованных решений. В этих случаях не совсем точное априорное знание исходных параметров требует, чтобы для целей анализа они были представлены как некоторые области в диапазонах, характеризующих возможные допустимые значения каждого параметра.

Исходные данные S_i в таком случае предлагается представлять интервалами («интервальными числами») $[S_i^l, S_i^r]$, задаваемыми их левыми S_i^l и правыми S_i^r границами. Результирующие показатели, рассчитанные с использованием моделей, принятых для анализа, и связанные с исходными данными, также становятся интервальными числами. Подобного рода ситуации, когда исходные параметры представлены как интервалы, типичны для естественных, инженерно-технических наук и техники. Здесь измерения принципиально присуща некоторая погрешность, которую требуется учитывать в расчетах, в том числе в расчетах искомых значений непосредственно измеряемых величин. При диагностировании состояний строительных конструкций в виде интервальных чисел могут быть представлены такие параметры, как вероятности состояний или вероятности реализации тех или иных признаков, характеризующих эти состояния. Эти параметры, а также диапазоны их изменения могут быть назначены отчасти волевым решением эксперта на основе своего опыта и имеющейся статистики диагнозов.

Многие задачи независимо от методов их решения обладают общим свойством: до того, как

получен конкретный набор данных, для изучаемой ситуации в качестве потенциально приемлемых рассматриваются вероятностные модели. Это особенно характерно для задач, решаемых на основе статистических данных. После того как данные получены, возникает выраженное в некотором виде знание об относительной приемлемости этих моделей. Одним из способов «пересмотра» относительной приемлемости теоретико-вероятностных моделей служит байесовский подход, в основе которого — известная теорема (или формула) Байеса. В последние десятилетия в статистическом анализе байесовские методы характеризуются чрезвычайно стремительным развитием, причина чего — ряд существенных преимуществ байесовского подхода, которые делают его очень привлекательным для широкого применения.

Основное отличие байесовского подхода от других статистических подходов заключается в том, что даже до того, как получены статистические данные, эксперт, принимающий решение, выражает степень своего доверия к возможным моделям, представляя их в вероятностном виде. Как только данные получены, теорема Байеса позволяет рассчитать новое множество вероятностных параметров, и те в свою очередь позволяют пересмотреть степень доверия к тем самым возможным моделям, но уже учитывая новую информацию, поступившую благодаря полученным данным.

Статистические данные в реальных задачах анализа состояний объекта и задачах принятия решений бывают неполными и неточными, а зачастую отсутствуют в необходимом виде и объеме. Это делает использование многих традиционных статистических подходов неправомерным. Имеющаяся в распоряжении информация может содержать только субъективные оценки в виде экспертных оценок и суждений. Более того, ситуация, в которой принимается решение, может быть вообще новой и никогда ранее не анализи-

руемой, что особенно характерно для сложных технических систем и уникальных объектов (например, строительных). Такие особенности усложняют процесс принятия решений и могут поставить под сомнение какие-либо выводы и заключения. Байесовский подход в этой ситуации оказывается весьма полезным и эффективным, позволяющим в полной мере использовать в своих расчетных процедурах опыт и знания эксперта.

Необходимо отметить, что с усложнением проблемных ситуаций, увеличением числа и значимости решаемых задач роль экспертов существенно усилилась. Возросла роль и интеллектуальных экспертно-вычислительных комплексов (ИЭВК), способствующих повышению эффективности труда экспертов. Взаимодействие квалифицированного эксперта и ИЭВК позволяет всесторонне исследовать такие задачи, решение которых ранее было либо неудовлетворительно приближенным, либо требовало неприемлемо больших затрат времени и труда.

Для успешного решения подобных задач жизненно важна роль обоим взаимодействующих участников этого процесса — и эксперта, и ИЭВК. Комплекс предоставляет эксперту свой вычислительный потенциал, возможность привлечь различные формальные методы и модельные схемы, а также ознакомить с ранее решенными задачами, близкими к анализируемой. Эксперт же на основе своих знаний и опыта оценивает точность исходных параметров, подыскивает аналоги, выбирает модели для расчета, анализирует промежуточные результаты, разрабатывает стратегии изменения данных (сценарии), вводит поправки, связанные с учетом качественных факторов, содержательно интерпретирует окончательные результаты расчетов. Важно подчеркнуть, что в отсутствие квалифицированного эксперта сложные задачи не могут быть надлежащим образом исследованы обычным пользователем ИЭВК, даже если последний обладает развитыми базами моделей, знаний, данных и интерфейсом [2].

Один из аспектов усиления роли экспертов — практическая возможность получения значений многих исходных данных, требующих решения задач преимущественно в виде экспертных оценок, формируемых на базе экспертных знаний, суждений по аналогии и т. п. Однако для того, чтобы подобные неформализованные эксперт-

ные знания могли быть использованы в ИЭВК, необходимо создать их математическое представление. Это обстоятельство стимулирует развитие различных методов анализа данных, преобразующих исходные параметры в формализованные структуры, а параметры, уже получившие формализованное представление, — в интерпретируемые результаты, новые знания, содержащиеся до того в исходной информации лишь неявно [2].

В работах [3–6] рассмотрены методы оценки технического состояния конструктивных элементов зданий и методы определения категорий этого состояния с использованием теоретического аппарата диагностики, основанного на вероятностных методах распознавания состояний сложных технических систем. В работе [3] это подробно сделано на примере конкретного объекта (элемента) — главной балки G_1 железобетонного монолитного междуэтажного перекрытия, выполненного по схеме балочной клетки, а в статьях [6, 7] на основе методов теории информации представлен многоуровневый энтропийный анализ полученных результатов диагностирования. Отмечается, что главные балки G_k рассматриваются как конструктивные элементы-подсистемы конструктивной системы следующего, более высокого, уровня — перекрытия в целом. Именно для этих систем диагностирование состояний предложено выполнять статистическим методом с использованием теоремы Байеса в виде обобщенной формулы [1, 3–7]

$$P(S_i|K^*) = \frac{P(S_i)P(K^*|S_i)}{\sum_{s=1}^n P(S_s)P(K^*|S_s)} \quad (1)$$

Не вдаваясь в подробности вывода формулы (1), очень важно определить точный смысл входящих в нее основных величин (особенно для строительных объектов). Здесь:

$P(S_i|K^*)$ — вероятность диагноза S_i после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков K^* (апостериорная вероятность состояния). В данном случае это и есть искомый результат — **выходная информация**;

$P(S_i)$ — вероятность состояния S_i , определяемая по статистическим данным (априорная вероятность состояния). Это **входная информация**. Так, если к моменту диагностирования предварительно обследовано N объектов и у N_i объек-



тов оказалось состояние S_i (то есть статистика диагнозов в каком-то виде уже есть), то

$$P(S_i) = \frac{N_i}{N}; \quad (2)$$

$P(K^* | S_i)$ — вероятность появления (реализации) комплекса признаков K^* у объектов с состоянием S_i .

При определении $P(S_i | K^*)$ и $P(S_i)$ необходимо учитывать, что элемент системы (балка) может находиться только в одном из нескольких n рассматриваемых независимых и несовместных состояний, т. е. они с точки зрения теории вероятностей представляют собой полную группу событий. В таком случае

$$\sum_{i=1}^n P(S_i | K^*) = 1. \quad (3)$$

В [1, 3–7] определение вероятности состояний по методу Байеса для диагностируемых элементов рекомендуется выполнять на основе составления так называемых диагностических матриц. Матрицы формируются в виде таблиц вероятностей признаков и их разрядов при различных диагнозах и представляют собой в некотором смысле статистическую модель диагностирования рассматриваемого элемента. Для главных балок она имеет вид табл. 1, которая строится на основе имеющегося статистического материала, т. е. в нее включены априорные вероятности состояний и признаков. Таблица, как видно, построена в общем виде. Численные же значения вероятностных параметров в таких таблицах формировались не только на основе обширной имеющейся статистики, но и отчасти на основе принятия экспертом волевых решений. Примеры таких матриц для различных конструктивных элементов зданий построены и рассмотрены в статьях [3, 5]. Так, например, для главной балки G_1 входной информацией для диагностирования ее состояний стали данные диагностической матрицы в виде табл. 2. Вероятностные параметры в этой таблице прошли уточнение после получения дополнительной статистической информации и основаны на результатах диагностирования 100 балок, поэтому таблица несколько отличается от тех, которые представлены в статьях [3–7].

Для дальнейшего пояснения в качестве примера рассмотрены три реализации диагностических признаков $P(K^* / S_i)$. Например, первая ре-

ализация представляет собой результаты обследования 101-й балки:

повреждения наружной поверхности *есть*;
продольных трещин в защитном слое *нет*;
нормальных трещин в растянутой зоне *нет*;
наклонные трещины *есть*;
прочность бетона оказалась *ниже* проектной на 6 %;
обнажившейся арматуры *нет*;
прогиб *не превышает* нормативный;
условие прочности при расчете по нормальным сечениям *удовлетворяется*;
условие прочности при расчете по наклонным сечениям *не удовлетворяется*.

Для 102-й балки имеет место следующая реализация признаков:

повреждения наружной поверхности *есть*;
продольных трещин в защитном слое *нет*;
нормальные трещины в растянутой зоне раскрытием 0,4 мм *есть*;
наклонных трещин *нет*;
прочность бетона оказалась *не ниже* проектной;
имеет место обнажившаяся арматура, *менее* 5 % сечения которой *поражено* коррозией;
прогиб *превышает* нормативный на 10 %;
условие прочности при расчете по нормальным сечениям *удовлетворяется*;
условие прочности при расчете по наклонным сечениям *удовлетворяется*.

В 103-й балке результаты обследования дали следующую картину реализации признаков:

повреждения наружной поверхности *есть*;
продольные трещины в защитном слое *есть*;
нормальные трещины в растянутой зоне раскрытием *более 0,4 мм, но менее 1,0 мм* *есть*;
наклонных трещин *нет*;
прочность бетона оказалась *ниже* проектной на 31 %;
имеет место обнажившаяся арматура, 22 % сечения которой *поражено* коррозией;
прогиб *не превышает*;
условие прочности при расчете по нормальным сечениям *не удовлетворяется*;
условие прочности при расчете по наклонным сечениям *удовлетворяется*.

В таком случае при указанных выше реализациях признаков распределение вероятностей состояний после выполнения серии расчетов по формуле (1) представлено в табл. 3.

Можно показать, что условие (3) выполняется и для входного ряда априорных вероятностей

Таблица 1

Диагностическая матрица для главных балок перекрытия (G_k) в общем виде

Диагностический признак и его разряды					Значения условной вероятности разряда признака для пяти состояний S_i при указанных их вероятностях				
Номер признака	Название признака	Обозначение разряда	Значение (содержание) разряда	Обозначение вероятности разряда	$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$
1	Повреждение бетона, снижающее его свойства по отношению к арматуре	k_{11}	да	$p_g(k_{11})$	$p_g(k_{11} S_1)$	$p_g(k_{11} S_2)$	$p_g(k_{11} S_3)$	$p_g(k_{11} S_4)$	$p_g(k_{11} S_5)$
		k_{12}	нет	$p_g(k_{12})$	$p_g(k_{12} S_1)$	$p_g(k_{12} S_2)$	$p_g(k_{12} S_3)$	$p_g(k_{12} S_4)$	$p_g(k_{12} S_5)$
2	Продольные трещины в защитном слое вдоль арматуры стержней	k_{21}	да	$p_g(k_{21})$	$p_g(k_{21} S_1)$	$p_g(k_{21} S_2)$	$p_g(k_{21} S_3)$	$p_g(k_{21} S_4)$	$p_g(k_{21} S_5)$
		k_{22}	нет	$p_g(k_{22})$	$p_g(k_{22} S_1)$	$p_g(k_{22} S_2)$	$p_g(k_{22} S_3)$	$p_g(k_{22} S_4)$	$p_g(k_{22} S_5)$
3	Нормальные трещины (ширина раскрытия)	k_{31}	$< 0,4$ мм	$p_g(k_{31})$	$p_g(k_{31} S_1)$	$p_g(k_{31} S_2)$	$p_g(k_{31} S_3)$	$p_g(k_{31} S_4)$	$p_g(k_{31} S_5)$
		k_{32}	$< 1,0$ мм	$p_g(k_{32})$	$p_g(k_{32} S_1)$	$p_g(k_{32} S_2)$	$p_g(k_{32} S_3)$	$p_g(k_{32} S_4)$	$p_g(k_{32} S_5)$
		k_{33}	$1,0$ мм	$p_g(k_{33})$	$p_g(k_{33} S_1)$	$p_g(k_{33} S_2)$	$p_g(k_{33} S_3)$	$p_g(k_{33} S_4)$	$p_g(k_{33} S_5)$
4	Наклонные трещ. (наличие)	k_{41}	да	$p_g(k_{41})$	$p_g(k_{41} S_1)$	$p_g(k_{41} S_2)$	$p_g(k_{41} S_3)$	$p_g(k_{41} S_4)$	$p_g(k_{41} S_5)$
		k_{42}	нет	$p_g(k_{42})$	$p_g(k_{42} S_1)$	$p_g(k_{42} S_2)$	$p_g(k_{42} S_3)$	$p_g(k_{42} S_4)$	$p_g(k_{42} S_5)$
5	Прочность бетона	k_{51}	проектн.	$p_g(k_{51})$	$p_g(k_{51} S_1)$	$p_g(k_{51} S_2)$	$p_g(k_{51} S_3)$	$p_g(k_{51} S_4)$	$p_g(k_{51} S_5)$
		k_{52}	$\leq 30 \%$	$p_g(k_{52})$	$p_g(k_{52} S_1)$	$p_g(k_{52} S_2)$	$p_g(k_{52} S_3)$	$p_g(k_{52} S_4)$	$p_g(k_{52} S_5)$
		k_{53}	$> 30 \%$	$p_g(k_{53})$	$p_g(k_{53} S_1)$	$p_g(k_{53} S_2)$	$p_g(k_{53} S_3)$	$p_g(k_{53} S_4)$	$p_g(k_{53} S_5)$
6	Коррозия арматуры	k_{61}	$< 5 \%$	$p_g(k_{61})$	$p_g(k_{61} S_1)$	$p_g(k_{61} S_2)$	$p_g(k_{61} S_3)$	$p_g(k_{61} S_4)$	$p_g(k_{61} S_5)$
		k_{62}	$5-20$	$p_g(k_{62})$	$p_g(k_{62} S_1)$	$p_g(k_{62} S_2)$	$p_g(k_{62} S_3)$	$p_g(k_{62} S_4)$	$p_g(k_{62} S_5)$
		k_{63}	$> 20\%$	$p_g(k_{63})$	$p_g(k_{63} S_1)$	$p_g(k_{63} S_2)$	$p_g(k_{63} S_3)$	$p_g(k_{63} S_4)$	$p_g(k_{63} S_5)$
7	Прогиб	k_{71}	доп.	$p_g(k_{71})$	$p_g(k_{71} S_1)$	$p_g(k_{71} S_2)$	$p_g(k_{71} S_3)$	$p_g(k_{71} S_4)$	$p_g(k_{71} S_5)$
		k_{72}	$\leq 30 \%$	$p_g(k_{72})$	$p_g(k_{72} S_1)$	$p_g(k_{72} S_2)$	$p_g(k_{72} S_3)$	$p_g(k_{72} S_4)$	$p_g(k_{72} S_5)$
		k_{73}	$> 30 \%$	$p_g(k_{73})$	$p_g(k_{73} S_1)$	$p_g(k_{73} S_2)$	$p_g(k_{73} S_3)$	$p_g(k_{73} S_4)$	$p_g(k_{73} S_5)$
8	Условие прочности по нормальным сечениям	k_{81}	да	$p_g(k_{81})$	$p_g(k_{81} S_1)$	$p_g(k_{81} S_2)$	$p_g(k_{81} S_3)$	$p_g(k_{81} S_4)$	$p_g(k_{81} S_5)$
		k_{82}	нет	$p_g(k_{82})$	$p_g(k_{82} S_1)$	$p_g(k_{82} S_2)$	$p_g(k_{82} S_3)$	$p_g(k_{82} S_4)$	$p_g(k_{82} S_5)$
9	Условие прочности по наклонным сечениям	k_{91}	да	$p_g(k_{91})$	$p_g(k_{91} S_1)$	$p_g(k_{91} S_2)$	$p_g(k_{91} S_3)$	$p_g(k_{91} S_4)$	$p_g(k_{91} S_5)$
		k_{92}	нет	$p_g(k_{92})$	$p_g(k_{92} S_1)$	$p_g(k_{92} S_2)$	$p_g(k_{92} S_3)$	$p_g(k_{92} S_4)$	$p_g(k_{92} S_5)$

Диагностическая матрица для главных балок (G_k) железобетонного перекрытия
(численный пример, статистика по 100 балкам)

Диагностический признак и его разряды					Значения условной вероятности разряда признака для пяти состояний S_i при указанных значениях их вероятностей				
Номер признака	Название признака	Обозначение разряда	Значение разряда	Обозначение вероятности разряда	$P(S_1) = 0,18$	$P(S_2) = 0,29$	$P(S_3) = 0,35$	$P(S_4) = 0,13$	$P(S_5) = 0,05$
1	Повреждение бетона, снижение его свойства по отношению к арматуре	k_{11}	да	$p(k_{11})$	0,11	0,17	0,29	0,54	0,80
		k_{12}	нет	$p(k_{12})$	0,89	0,83	0,71	0,46	0,20
2	Продольные трещины в защитном слое вдоль арматуры стержней	k_{21}	да	$p(k_{21})$	0,06	0,14	0,23	0,77	0,60
		k_{22}	нет	$p(k_{22})$	0,94	0,86	0,77	0,23	0,40
3	Нормальные трещины (ширина раскрытия)	k_{31}	$< 0,4$ мм	$p(k_{31})$	0,76	0,59	0,40	0,15	0,20
		k_{32}	до 1,0 мм	$p(k_{32})$	0,18	0,34	0,43	0,62	0,40
		k_{33}	$\geq 1,0$ мм	$p(k_{33})$	0,06	0,07	0,17	0,23	0,40
4	Наклонные трещины (наличие)	k_{41}	да	$p(k_{41})$	0,06	0,17	0,34	0,31	0,20
		k_{42}	нет	$p(k_{42})$	0,94	0,83	0,66	0,69	0,80
5	Прочность бетона	k_{51}	проектная $\leq 30\%$ $> 30\%$	$p(k_{51})$	0,72	0,48	0,49	0,15	0,20
		k_{52}		$p(k_{52})$	0,22	0,31	0,20	0,39	0,20
		k_{53}		$p(k_{53})$	0,06	0,21	0,31	0,46	0,60
6	Коррозия арматуры	k_{61}	$< 5\%$	$p(k_{61})$	0,76	0,59	0,29	0,15	0,20
		k_{62}	5 – 20	$p(k_{62})$	0,18	0,24	0,37	0,39	0,20
		k_{63}	$> 20\%$	$p(k_{63})$	0,06	0,17	0,34	0,46	0,60
7	Прогиб	k_{71}	допускаем.	$p(k_{71})$	0,83	0,48	0,51	0,31	0,20
		k_{72}	$\leq 30\%$	$p(k_{72})$	0,11	0,38	0,23	0,46	0,20
		k_{73}	$> 30\%$	$p(k_{73})$	0,06	0,14	0,26	0,23	0,60
8	Условие прочности по нормальным сечениям	k_{81}	да	$p(k_{81})$	0,94	0,90	0,86	0,69	0,20
		k_{82}	нет	$p(k_{82})$	0,06	0,10	0,14	0,31	0,80
9	Условие прочности по наклонным сечениям	k_{91}	да	$p(k_{91})$	0,94	0,83	0,60	0,61	0,20
		k_{92}	нет	$p(k_{92})$	0,06	0,17	0,40	0,39	0,80

Таблица 3

Результаты расчета вероятностей состояний
при разных реализациях диагностических признаков

Номер балки	Вероятности состояний				
	$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$
101	0,038	0,324	0,613	0,021	0,005
102	0,259	0,611	0,127	0,0027	0,0003
103	0,0001	0,0068	0,070	0,707	0,217

$P(S_i)$, и для выходных значений апостериорных вероятностей $P(S_i | K^*)$.

Таким образом, по всей совокупности рассмотренных признаков и трех их реализаций максимальные значения вероятностей состояний получились следующие: $P(S_3 | K^*) = 0,613$; $P(S_2 | K^*) = 0,611$; $P(S_4 | K^*) = 0,707$ (в табл. 3 выделены). Как отмечено в [8], это для эксперта служит достаточно весомым основанием при назначении диагностируемому элементу соответственно третьей, второй и четвертой категорий технического состояния при условии указанных выше реализаций признаков. Вместе с тем предложенный формализованный подход для принятия решения на основе байесовской процедуры можно считать достаточным основанием при назначении указанных категорий тогда, когда влияние изменения входной информации о состояниях и признаках не приводит к качественным изменениям выходной информации. То есть результат получен, но он требует проверки, что связано с недостаточностью и неточностью входной информации в виде вышеупомянутых конкретных численных значений вероятностей, представленных в табл. 2 и назначенных, как отмечено выше, отчасти волевым решением эксперта. Важно ответить на вопрос: достаточна ли выборка (статистика на основе рассмотрения состояний табл. 1 и табл. 2) и достаточно ли строить байесовскую процедуру на основе принятых в табл. 1 или 2 признаков и их разрядов (рассмотрено 5 двухразрядных признаков и 4 трехразрядных признака [1])? То есть следует оценить устойчивость предложенной диагностической матрицы на предмет определения степени влияния изменений входных вероятностей на выходные.

В [8] анализ влияния «входа» на «выход» проведен с использованием методов теории нечеткой логики. В данной же статье предлагается в байесовскую процедуру принятия решений

привнести методы, основанные, как отмечено выше, на интервальном представлении входной информации. На первом этапе исследования рассмотрено влияние разброса только статистических априорных вероятностей состояний, т. е. влияние разброса величин $P(S_i)$ — входного параметра — на искомый результат, т. е. на апостериорные значения вероятностей $P(S_i | K^*)$ — выходной параметр. В связи с этим для входных вероятностей $P(S_i)$ необходимо обосновать определение границ интервальных чисел.

В [9] со ссылкой на [10] для назначения интервалов вероятностей предложена обобщенная модель Дирихле в виде

$$P^l(S_i, s) = \frac{N_i}{N + s}; \quad P^r(S_i, s) = \frac{N_i + s}{N + s}, \quad (4)$$

где $P^l(S_i, s)$ — левая граница интервала вероятности; $P^r(S_i, s)$ — правая граница интервала вероятности; s — параметр, подробное описание выбора которого можно найти в [10]. Очевидно, что при $s = 0$ имеем обычное представление априорной вероятности (2). При небольшом объеме данных по базовым параметрам рекомендуется принимать $s = 1$ или $s = 2$ [9, 10].

Далее построение решения по оценке влияния изменения входных данных (априорных вероятностей $P(S_i)$) на искомый результат (апостериорные вероятности $P(S_i | K^*)$) с учетом предложенной интервальной модели (4) выполнено при $s = 2$. При этом рассмотрены все три представленные выше реализации диагностических признаков.

Для ряда вероятностей $P(S_i)$ в табл. 2 приведены следующие численные значения: $P(S_1) = 0,18$; $P(S_2) = 0,29$; $P(S_3) = 0,35$; $P(S_4) = 0,13$; $P(S_5) = 0,05$. Так, например, для $P(S_1) = 0,18$ при $s = 2$ получены следующие границы интервалов вероятностей:



$$P^l(S_i, s) = \frac{18}{100 + 2} = 0,176;$$

$$P^r(S_i, s) = \frac{18 + 2}{100 + 2} = 0,196.$$

Результаты расчета интервалов вероятностей в соответствии с (4) при $s = 2$ для остальных $P(S_i)$ представлены в первых двух строках табл. 4. В третью и четвертую строки этой таблицы записаны результаты расчета по формуле (1) при первой реализации диагностических признаков. Результаты получены на основе многовариантного счета.

В табл. 5 и 6 представлены аналогичные результаты расчетов при реализации диагностических признаков соответственно по второму и третьему вариантам, и при тех же границах интервалов априорных вероятностей $P(S_i)$.

Интересным является результат расчета апостериорных вероятностей $P(S_i | K^*)$ в условиях максимальной энтропии для входной информации, когда для $P(S_i)$ нет никакой статистики, и все пять состояний приняты равновероятными, т. е. $P(S_i) = 0,20$. Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 4

Результаты расчета интервалов вероятностей состояний $P(S_i)$ и $P(S_i | K^*)$ по первому варианту реализации диагностических признаков

Названия границ	Значения границ при указанных вероятностях пяти состояний				
	$P(S_1) = 0,18$	$P(S_2) = 0,29$	$P(S_3) = 0,35$	$P(S_4) = 0,13$	$P(S_5) = 0,05$
$P^l(S_i, s)$	0,176	0,284	0,343	0,128	0,049
$P^r(S_i, s)$	0,196	0,304	0,363	0,147	0,069
$P^l(S_i K^*)$	0,036	0,312	0,600	0,020	0,004
$P^r(S_i K^*)$	0,038	0,338	0,627	0,023	0,005

Таблица 5

Результаты расчета интервалов вероятностей состояний $P(S_i)$ и $P(S_i | K^*)$ по второму варианту реализации диагностических признаков

Название границ	Значения границ при указанных вероятностях пяти состояний				
	$P(S_1) = 0,18$	$P(S_2) = 0,29$	$P(S_3) = 0,35$	$P(S_4) = 0,13$	$P(S_5) = 0,05$
$P^l(S_i, s)$	0,176	0,284	0,343	0,128	0,049
$P^r(S_i, s)$	0,196	0,304	0,363	0,147	0,069
$P^l(S_i K^*)$	0,248	0,607	0,122	0,003	0,0003
$P^r(S_i K^*)$	0,259	0,640	0,134	0,055	0,0003

Таблица 6

Результаты расчета интервалов вероятностей состояний $P(S_i)$ и $P(S_i | K^*)$ по 3-му варианту реализации диагностических признаков

Названия границ	Значения границ при указанных вероятностях пяти состояний				
	$P(S_1) = 0,18$	$P(S_2) = 0,29$	$P(S_3) = 0,35$	$P(S_4) = 0,13$	$P(S_5) = 0,05$
$P^l(S_i, s)$	0,176	0,284	0,343	0,128	0,049
$P^r(S_i, s)$	0,196	0,304	0,363	0,147	0,069
$P^l(S_i K^*)$	0,0001	0,006	0,070	0,703	0,215
$P^r(S_i K^*)$	0,001	0,007	0,073	0,710	0,217

Таблица 7

Результаты расчета вероятностей состояний
при разных реализациях диагностических признаков и при $P(S_i) = 0,20$

Номер балки	Значения вероятностей $P(S_i K^*)$ при указанных вероятностях пяти состояний				
	$P(S_1) = 0,20$	$P(S_2) = 0,20$	$P(S_3) = 0,20$	$P(S_4) = 0,20$	$P(S_5) = 0,20$
101	0,055	0,305	0,580	0,041	0,019
102	0,365	0,535	0,092	0,005	0,002
103	0,001	0,002	0,021	0,542	0,434

По результатам выполненных расчетов можно сформулировать следующие выводы:

1. Изменение значений одного из основных входных параметров байесовской процедуры — априорных вероятностей $P(S_i)$ — в рамках принятых границ интервалов для рассматриваемого диагностируемого объекта не привело к качественному изменению значений выходных апостериорных вероятностей состояний $P(S_i | K^*)$.

2. Интервальные границы результирующих вероятностей состояний $P(S_i | K^*)$, рассчитанных по первому варианту реализации признаков, представлены интервальными числами 0,600–0,627 (табл. 4), по второму варианту — 0,607–0,640 (табл. 5), по третьему — 0,703–0,710 (табл. 6). По этим данным, как и по данным табл. 3, диагностируемый объект можно отнести к тем же категориям технического состояния. При этом из-

менения по сравнению с данными таблицы 3 (0,613; 0,611; 0,707), как видим, незначительны.

3. Диагностическую матрицу в виде табл. 2, составленную по результатам статистической обработки данных обследования ста балок (диагностируемых объектов) на основе рассмотрения девяти диагностических признаков, вполне можно считать устойчивой к изменениям основных входных параметров в байесовской процедуре. Об этом также свидетельствуют результаты расчетов апостериорных вероятностей $P(S_i | K^*)$ в условиях максимальной энтропии для входной информации, когда все пять состояний равновероятны, т. е. в данном случае при $P(S_i) = 0,20$ (табл. 7). Максимальные численные значения для $P(S_i | K^*)$ изменились (уменьшились), однако они все остались отнесенными к тем же категориям технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст] / И.А. Биргер. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
2. Стернин, М.Ю. Метод представления знаний в интеллектуальных системах поддержки экспертных решений [Текст] / М.Ю. Стернин, Г.П. Шепелев // Математическое моделирование и интеллектуальные системы: сборник статей. — М., 2004. — С. 1–16.
3. Соколов, В.А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал. — 2010. № 4. — С. 49–58.
4. Соколов, В.А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал. — 2010. № 6. — С. 48–57.
5. Соколов, В.А. Вероятностный анализ технического состояния конструкций зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: сб. тр. Международного симпозиума. — №14. Ч. 1. — Одесса, ОГАСА: Изд-во Внешрекламсервис, 2010. — С. 242–250.
6. Соколов, В.А. Определение технического состояния строительных конструкций зданий на основе многоуровневого вероятностного анализа [Текст] / В.А. Соколов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: матер. V Международной конференции. — М., 2010.
7. Соколов, В.А. Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.А. Соколов // Дефекты зданий и сооружений: матер. XV научно-методической конференции. — № 15. — СПб: Изд-во ВИТИ, 2011. — С. 54–63.



8. **Соколов, В.А.** Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств [Текст] / В.А. Соколов // Инженерно-строительный журнал.— 2010.— № 5.— С. 31–37.

9. **Уткин, В.С.** Новый подход к оценке надежности конструкций при наличии интервальных экспертных оценок [Текст] / В.С. Уткин, А.Л. Кузь-

минов, А.В. Кожевников, А.К. Кудрявцева // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. тр. Междунар. конф. № 7.— М., 2008.— С. 117–120.

10. **Walley, P.** Inferences from multinomial data: Marning about a bag of marbles [Текст] / P. Walley // Journal of the Royal Statistical Society.— 1996. Series B, 58.— P. 3–57.

УДК 621.762

В.Н. Цеменко, В.Л. Гиршов, С.А. Мазуров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Освоение производства быстрорежущей стали методами порошковой металлургии открыло новые резервы для повышения эксплуатационных свойств этих сталей. Порошковая технология позволяет избежать на стадии распыления порошков карбидной ликвации и в дальнейшем — карбидной неоднородности и полосчатости, а вследствие этого — значительной анизотропии свойств материала [1].

На территории СССР создавалась технология горячей экструзии (ГЭ) порошковых быстрорежущих сталей в стальных герметичных капсулах. Важнейшее преимущество процесса ГЭ, разрабатывавшегося в УкрНИИ Спецсталь и ЦНИИ материалов, перед процессами прессования порошков — благоприятная схема пластической деформации, близкая к всестороннему сжатию и обеспечивающая высокую степень обжатия исходной заготовки за единичный акт ее обработки давлением. При такой схеме достигается интенсивный сдвиг в очаге деформации и прочное «схватывание» частиц друг с другом наряду с отсутствием значительных растягивающих напряжений в порошковой заготовке [2]. Возможность использования более простого оборудования — гидравлических прессов — выгодно отличает эту технологию от процесса горячего газостатического прессования, который является основным при производстве порошковых быстрорежущих сталей за рубежом [3].

Однако следует отметить, что параметры процесса экструзии в вышеописанных процессах

получения материала подбирались в основном опытным путем, довольно трудоемким и дорогим. Практически отсутствуют методики выбора прессы требуемой мощности для экструдирования капсул, заполненных порошком. При решении подобных задач могут применяться методы компьютерного моделирования процессов. Известны отечественные и зарубежные публикации, посвященные разработке методов математического моделирования процессов пластического деформирования пористых сред [4–7]. Последняя работа посвящена моделированию уплотнения порошкового алюминия при комнатной температуре, а в [4–6] изучены общие стадии моделирования процессов уплотнения порошковых сред.

Цель нашей работы — подобрать параметры процесса экструзии, обеспечивающие уплотнение порошковой заготовки до практически беспористого состояния при минимально возможном усилии прессы.

Особенности моделирования и основные характеристики процесса экструзии

Математическое моделирование процесса экструзии проводилось с использованием метода конечных элементов. При этом сам порошок рассматривался как пористая среда.

При обработке давлением пористые материалы, в отличие от компактных, деформируются с необратимым изменением объема, увеличивая плотность за счет уменьшения объема пор [4]. Для описания деформации некомпактных металли-

ческих материалов может быть применен математический аппарат механики сплошных сред, т. е. та же теория пластического течения, на базе которой исследуются процессы обработки давлением компактных материалов. Но для этого необходимо сформулировать условие пластичности уплотняемого материала и определить механические свойства в зависимости от пористости.

Здесь рассматривается возможность анализа поведения пористого материала исходя из представления поры как концентратора напряжений [4, 5]. Эта отправная позиция приводит к эллиптическому условию пластичности. Идея представления пористого тела в виде полидисперсной среды с порами позволяет рассчитать пределы текучести на сдвиг и гидростатическое сжатие в зависимости от относительной плотности пористого материала при известном пределе текучести компактного (матричного) материала.

В качестве объектов моделирования используются быстрорежущая сталь марки 10P6M5-МП, материал капсулы — сталь 20. Капсулы в исходном состоянии имеют высоту $h_0 = 300$ мм и диаметр $D_n = 150$ мм.

В ходе данного моделирования приняты следующие основные допущения:

контейнер, пуансон и матрица — абсолютно жесткие тела;

температура порошкового материала в процессе экструзии постоянна и равна 1100°C ;

модель течения экструдруемого материала — жесткопластическая;

коэффициент трения между порошковым экструдруемым телом и матрицей равен коэффициенту трения между порошковым телом и контейнером и имеет значение $m = 0,1$.

На рис. 1 представлена схематическая иллюстрация процесса горячей экструзии, рассматриваемого в ходе данного математического моделирования. Деформация заготовки в процессе экструзии (редукция), которая определяет вытяжку получаемого прутка, рассчитывается по формуле

$$R = (D_n/D_k)^2 \quad (1)$$

Варианты экструзии с девятикратной вытяжкой

В ходе решения данной задачи были рассмотрены варианты экструзии заготовки диаметром 150 мм в матрицу с выходным отверстием 50 мм. Таким образом, по формуле (1) $R = 9$. Такое значение редукции было выбрано на основании опыта сотрудников ЦНИИ материалов, занимавшихся практическим изучением процесса горячей экструзии [2].

Рассмотрены матрицы с углами раствора 2α , равными 60° , 90° и 120° . Независимо от угла 2α , уплотнение материала достигается за счет его пресования в контейнере, а также за счет уменьшения диаметра заготовки в конической части матрицы.

Можно выделить три характерных стадии уплотнения заготовки. На начальной стадии усилие прессы практически целиком воспринимается стальной оболочкой. Это вызывает перемещение периферийной части доньшка по конической поверхности матрицы. Пористый материал на этой стадии является наполнителем стальной оболочки, препятствующим потере устойчивости тонкостенного цилиндра. Относительная плотность порошка на первой стадии изменяется только в области, прилегающей к пуансону. При одинаковом перемещении пуансона область уплотнения больше в заготовке, экструдруемой через больший угол 2α .

На второй стадии наблюдается постепенное уплотнение пористого материала по всему объему заготовки. Часть усилия воспринимается уплотняющимся материалом и передается на центральную часть доньшка. Помимо первого очага зоны уплотнения (непосредственно под пуансоном), появляется второй очаг, расположенный в верхней части заготовки, под пуансоном. По мере уплотнения заготовки оба очага увеличиваются в размерах и постепенно начинают

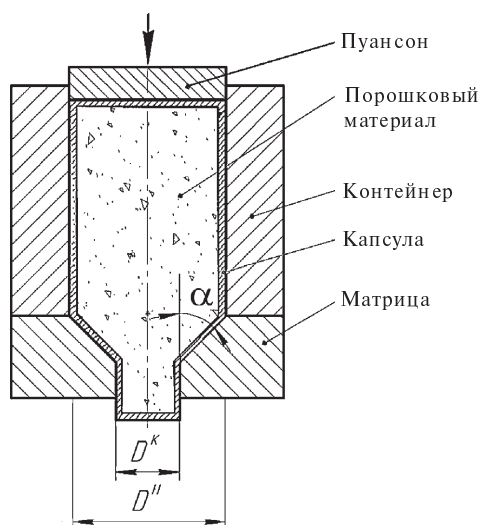


Рис. 1. Схематическое изображение процесса экструзии

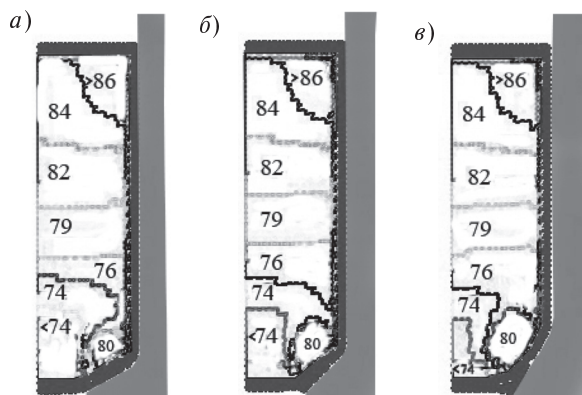


Рис. 2. Распределение плотностей заготовок:
а — $2\alpha = 120^\circ$; б — $2\alpha = 90^\circ$; в — $2\alpha = 60^\circ$

охватывать весь объем заготовки (рис. 2). При этом на центральную область заготовки действуют наименьшие напряжения, поэтому эта часть заготовки уплотняется в последнюю очередь.

При достижении заготовкой выходного отверстия матрицы ее продвижение практически останавливается, и происходит уплотнение порошкового материала. При этом наибольшая плотность, достигнутая перед началом истечения заготовки через выходное отверстие матрицы, наблюдается в случае экструзии в матрицу с углом $2\alpha = 60^\circ$, а наименьшая — при $2\alpha = 120^\circ$ (рис. 3). Данный факт, по-видимому, обусловлен большей протяженностью очага деформации матрицы с углом $2\alpha = 60^\circ$, а значит, большей протяженностью участка, на котором действуют повышенные силы трения.

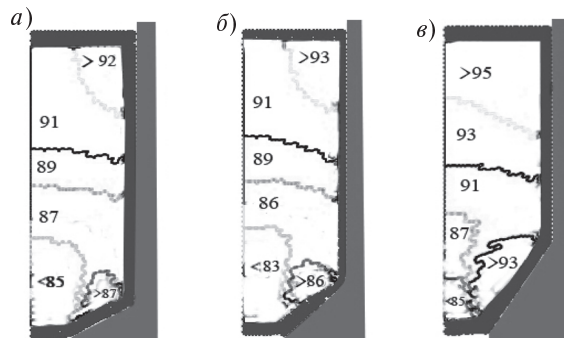


Рис. 3. Распределение плотностей заготовок до начала истечения
через выходное отверстие матрицы:
а — $2\alpha = 120^\circ$, б — $2\alpha = 90^\circ$, в — $2\alpha = 60^\circ$

Третий этап связан с истечением заготовки через выходное отверстие матрицы и формированием его конечного диаметра. При этом наблюдается стремительное доуплотнение заготовки до практически беспористого состояния (рис. 4). Вариант экструзии с этого момента начинает подчиняться законам течения компактного материала. После экструзии получается пруток, имеющий плотность компактного материала, за исключением небольшой зоны пониженной плотности в заходной части заготовки.

Можно отметить появление разнотолщинности оболочки, вызванной, по-видимому, значительными силами трения (рис. 5). Разнотолщинность тем больше, чем больше угол 2α .

В данной задаче не обнаружено существенных различий в получаемых после моделирова-

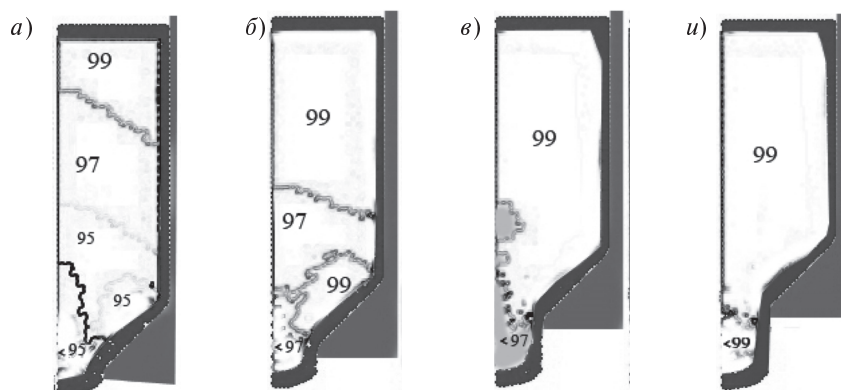


Рис. 4. Заключительная стадия уплотнения заготовки при различных значениях перемещения пуансона Δh :
а — $\Delta h = 105$ мм; б — $\Delta h = 115$ мм; в — $\Delta h = 120$ мм; и — $\Delta h = 128$ мм

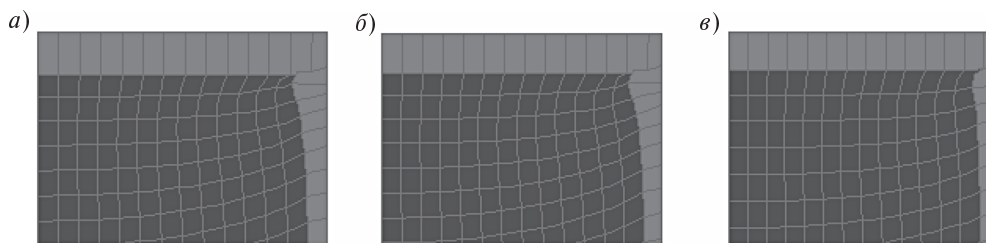


Рис. 5. Разнотолщинность оболочки: а — $2\alpha = 120^\circ$; б — $2\alpha = 90^\circ$; в — $2\alpha = 60^\circ$

нии экструзии прутках — все они имеют практически идентичную зону пониженной плотности, протяженность которой составляет 60–70 мм. В данном случае значительная вытяжка оказывает на процесс экструзии намного большее влияние, чем варьирование угла 2α .

Изменение угла 2α практически не оказало влияния на развиваемое усилие пресса (рис. 6). Максимальное значение развивалось при соблюдении двух условий:

достижения заготовкой компактной плотности;

преодоления заготовкой выходного отверстия матрицы.

Для меньших углов 2α максимальное давление развивалось при больших перемещениях пуансона, что целиком объясняется конструктивным отличием матриц (в случае меньших углов 2α выходное отверстие матрицы находится на большем удалении от ее заходной части).

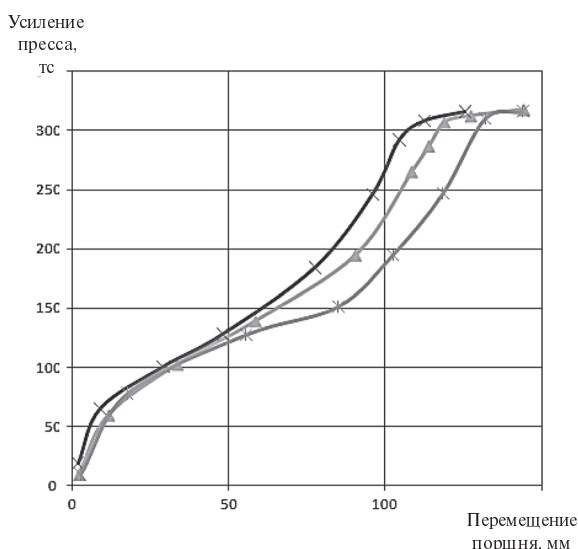


Рис. 6. График изменения усилия пресса (▲ — 90–50; × — 120–50; * — 60–50)

Варианты экструзии с четырехкратной вытяжкой

В ходе решения данной задачи были рассмотрены варианты экструзии заготовки диаметром 150 мм в матрицу с выходным отверстием 75 мм. Рассмотрены матрицы с углами 2α равными 60° , 90° и 120° .

Протекание первого этапа не отличается от рассмотренного выше варианта с большей вытяжкой. Отличия данного варианта вытяжки начинаются при достижении заготовками выходного отверстия матрицы: вследствие его большего диаметра истечение заготовок из контейнера начинается при достижении меньших плотностей (рис. 7).

Как и в случае с большей вытяжкой, на центральную часть заготовки действуют наименьшие напряжения, в результате чего эта часть заготовки достигает полного уплотнения в последнюю очередь (рис. 8). Так, в этом варианте экструзии (матрица диаметром 75 мм) ликвидация центральной зоны пониженной плотности происходит уже после выхода части заготовки из матрицы, т. е. уже на третьей стадии процесса экструзии.

Несмотря на различный характер уплотнения заготовок, протяженность зоны пониженной плотности (менее 99 %) при всех рассмотренных углах 2α также практически одинакова (90–100 мм). Это значение несколько больше, чем в случае экструдирования через матрицу диаметром 50 мм. Тем не менее в данном случае не наблюдается наплывов оболочки, приводящих к значительной ее разнотолщинности, при всех рассмотренных углах 2α . Последнее обстоятельство указывает на более благоприятные условия, создаваемые для последующей операции удаления оболочки, и меньшие потери основного металла в ходе этой операции.

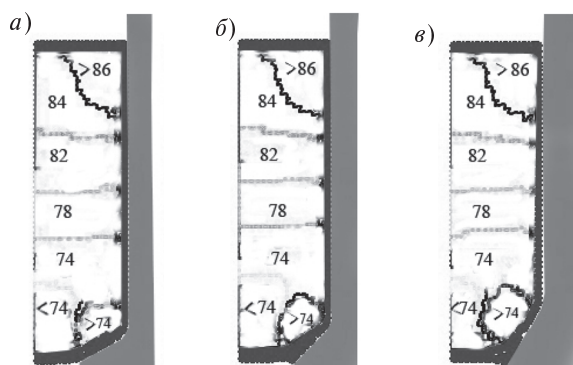


Рис. 7. Распределение плотностей заготовок до начала истечения через выходное отверстие матрицы:
 $a - 2\alpha = 120^\circ$; $b - 2\alpha = 90^\circ$; $v - 2\alpha = 60^\circ$

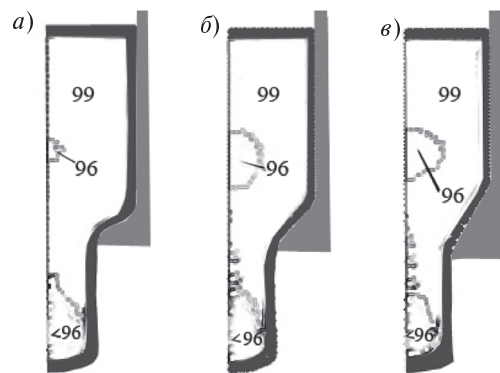


Рис. 8. Третья стадия экструзии заготовок
 $a - 2\alpha = 120^\circ$, $b - 2\alpha = 90^\circ$, $v - 2\alpha = 60^\circ$

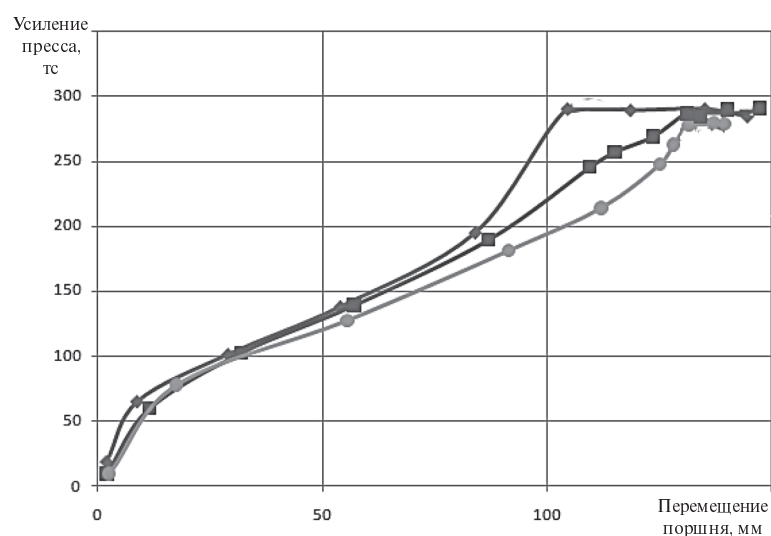


Рис. 9. График изменения давления прессы
 (◆ — 120–75; ■ — 90–75; ● — 60–75)

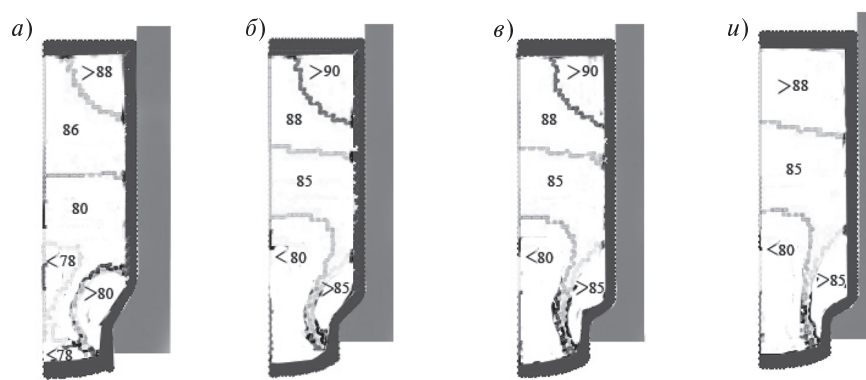


Рис. 10. Третья стадия процесса экструзии
 $a - 2\alpha = 150^\circ$; $б - 2\alpha = 120^\circ$; $в - 2\alpha = 90^\circ$; $и - 2\alpha = 60^\circ$

В осевой части заготовки у вариантов с углами $2\alpha = 90^\circ$ и $2\alpha = 60^\circ$ наблюдается несколько пониженная плотность (97 %), что может служить доказательством недостаточности четырехкратной вытяжки для этих вариантов. Увеличение угла 2α до 150° не приводит к качественному улучшению условий уплотняемости материала, а лишь вызывает образование разнотолщинности оболочки из-за повышенных сил трения.

Необходимое давление пресса при данной вытяжке так же практически не зависит от угла 2α (рис. 9).

Варианты экструзии с двукратной вытяжкой

В ходе решения данной задачи были рассмотрены варианты экструзии заготовки диаметром 150 мм в матрицу с выходным отверстием 100 мм. Рассмотрены матрицы с углами 2α равными 60° , 90° , 120° и 150° . При этом не удалось достигнуть полного уплотнения заготовки ни при одном из рассматриваемых углов 2α . Рис. 10 иллюстрирует рассматриваемые варианты на третьей стадии процесса. Зона полного уплотнения наблюдается лишь в локальной области каждой заготовки в районе матрицы. Очевидно, что при продолжении процесса экструзии материал, находящийся в контейнере, будет продолжать уплотняться (в основном за счет прессования). Однако значительная протяженность зоны по-

ниженной плотности при таком значении вытяжки приводит к сильному снижению коэффициента использования металла.

Сравнение всех рассмотренных вариантов экструзии с различными углами 2α и вытяжками позволяет сделать вывод о том, что изменение вытяжки оказывает более сильное влияние на уплотнение заготовки при экструзии и энергосиловые параметры данного процесса. Наилучший вариант — процесс экструзии в матрицу с углом $2\alpha = 120^\circ$ и диаметром выходного отверстия 75 мм (вытяжка $\lambda = 4$). Уменьшение угла 2α при данной вытяжке приводит к увеличению зоны пониженной плотности вдоль оси заготовки, в то время как увеличение угла 2α сопровождается возрастанием сил трения и необходимого давления пресса без существенного качественного влияния на уплотняемость заготовки.

Результаты данного компьютерного моделирования были использованы в ходе опытно-промышленной экструзии заготовок в условиях предприятия ОАО «Полема» (г. Тула). Усилие пресса в ходе экструзии составляло 280–300 т. Расчетные данные достаточно точно воспроизводятся экспериментально. Порошковая сталь была уплотнена до компактного состояния. Исследования структуры полученных прутков приведены в работе [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиршов, В.Л. Порошковая быстрорежущая сталь с дисперсной структурой [Текст] / В.Л. Гиршов // Вопросы материаловедения.— 2008. № 2.— С. 33–42.
2. Гиршов, В.Л. Процессы порошковой металлургии / В.Л. Гиршов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— С. 113
3. Ernst, I.C. ESP4 and TSP4, a comparison of spray formed with powdermetallurgically produced cobalt free high-speed steel of type 6W-5Mo-4V-4Cr [Текст] / I.C. Ernst, D. Duh // Journal of materials science.— 2004. № 39.— Р. 6831–6834.
4. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов.— СПб.: Наука, 2004.— 640 с.
5. Рудской, А.И., Модель пористого материала и условие пластичности пористых тел [Текст] / А.И. Рудской, Ю.И. Рыбин, А.Э. Александров // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2008. № 4(63).— С. 249–254.
6. Поляков, А.П. Теория и моделирование процессов экструзии и динамического прессования пористых металлических материалов: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. / А.П. Поляков.— Перм. гос. техн. ун-т, Пермь, 2008.— 35 с.
7. Dyi-Cheng, C. Finite element simulation on high extrusion-ratio hydrostatic extrusion of porous material [Текст] / C. Dyi-Cheng, Y. Ci-Syong // The Arabian Journal of Science and Engineering.— 2009. № 34.— Р. 11–19.
8. Мазуров, С.А. Исследование структуры порошковой быстрорежущей стали [Текст] / С.А. Мазуров, В.Л. Гиршов, В.Н. Цеменко // Современные металлические материалы и технологии: Труды междунар. научно-техн. конф.— СПб.: Изд-во Политех. ун-та., 2011.— С. 103–106.



РАЗРАБОТКА «ВИРТУАЛЬНЫХ» МОДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ 5-го ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе практики реального проектирования промышленных центробежных компрессоров Методом универсального моделирования, насчитывающей более двух десятков лет, создано много проектов высокоэффективных компрессоров [1, 2, 13–15]. Быстрое развитие доступных инженерам вычислительных средств сделало актуальным введение ряда усовершенствований в расчетные алгоритмы Метода для повышения точности прогнозирования характеристик и расширения вычислительных возможностей.

Расчет характеристик ступени производит-ся не аналитически, а предполагает сумму расчетов в отдельных точках общим числом 150–200 и более. Поэтому с учетом возможностей ЭВМ прошлого столетия в расчетные алгоритмы вносились упрощения и приближения, которые по экспертной оценке должны мало влиять на результаты расчета. Сейчас экономия времени расчета не актуальна. Отсюда вытекает первое направление развития Метода — это исключение всех очевидных упрощающих допущений в процессе термогазодинамических расчетов. Например, в прежних версиях не учитывалось изменение плотности газа в косом срезе лопаточных решеток на нерасчетных режимах. Как оказалось, точный расчет параметров в косом срезе с учетом потерь напора существенно отличается от приближенного расчета даже при умеренных числах Маха.

Второе направление связано с накоплением опыта работы с компьютерными программами, лучшим пониманием процесса, что позволило уточнить физические модели и их математическое описание. Например, анализ обтекания лопаточных аппаратов рабочего колеса (РК) показал значительное отличие схематизированной диаграммы скоростей от действительной картины. Причем эти отличия по характеру разные для РК разных типов. В предлагаемой версии программы использованы результаты систематического исследования обтекания лопаток рабочих

колес невязким квазитрехмерным потоком [3, 4, 11]. Это существенно приблизило параметры схематизированной диаграммы скоростей к их реальному виду. В ранних версиях при расчете потерь трения исходные уравнения основывались на модели гидравлически гладкой поверхности. В представляемой версии введен учет шероховатости. Впервые введен учет протечек в уплотнениях покрывающего диска на расход газа в рабочем колесе и на параметры газа на входе в колесо.

Третье направление — это развитие предпроцессоров и постпроцессоров с целью повышения информативности и более удобного представления результатов. Разумеется, наиболее принципиальное влияние на повышение точности предсказания характеристик оказали два первых направления развития программ.

Набор алгебраических уравнений математической модели потерь, математической модели напора и термодинамических уравнений, описывающих состояние газа в контрольных сечениях, несложен. Однако затрата времени на решение простейшей прямой задачи — расчет параметров потока в ступени — определяется необходимостью проведения десятков итерационных процессов. Эта необходимость определяется двумя обстоятельствами:

1. Для расчета параметров потока при последовательном переходе газа из одного сечения в другое необходимо знать потери напора. Эти потери зависят от состояния газа в контрольных сечениях, которое зависит от потерь.

2. Хотя размеры контрольных сечений известны, размер проходных сечений для потока зависит от его направления в контрольном сечении, которое для большинства сечений неизвестно. Поэтому для определения скорости потока в сечении также требуются итерации.

В целом усовершенствования расчетного алгоритма пакета программ Метода универсального моделирования состоят в следующем [9]:

введена новая схематизация диаграммы скоростей в лопаточной решетке рабочего колеса;

введен расчет выходного кольцевого конфузора обратно-направляющего аппарата;

введен уточненный расчет входного патрубка, в том числе при наличии входного регулирующего аппарата;

введены новые формулы расчета ударных потерь во всех элементах проточной части, содержащих лопатки;

произведен точный учет сжимаемости газа во всех контрольных сечениях проточной части;

введен новый алгоритм расчета безлопаточного диффузора;

безлопаточный участок перед лопаточным диффузором рассчитывается по уточненным формулам, аналогичным формулам расчета безлопаточного диффузора;

произведен учет влияния перетекания газа в рабочем колесе на расход газа в РК и на начальную температуру.

Преимущества алгоритмов 5-го поколения продемонстрировала идентификация — поиск значений эмпирических коэффициентов по результатам испытания модельных ступеней поколения 20СЕ. Коэффициент полезного действия на расчетном режиме определяется единым набором коэффициентов для ступеней с самыми разными параметрами проектирования. В частности, диапазон расчетных значений коэффициентов расхода этих ступеней $\Phi_{\text{расч}} = 0,0280 - 0,0850$ удовлетворяет требованиям для большинства промышленных компрессоров. Анализ показывает, что этот положительный результат достигнут в большой степени за счет уточнения схематизации диаграмм скоростей.

Рассчитанные с помощью программ 5-го поколения характеристики «виртуальных» модельных ступеней с прикладной точки зрения не сильно отличаются от характеристик, полученных по программам 4-го поколения и описанных в предыдущих работах [5–10, 13–15].

С принципиальной точки зрения ожидаемое преимущество связано с тем, что расчет максимального КПД компрессоров, в состав которых входят «виртуальные» ступени, осуществляется единым набором эмпирических коэффициентов. Это повышает степень достоверности расчетов характеристик «виртуальных» ступеней при их использовании в новых проектах. Кроме того,

обработка экспериментальных данных по программам 5-го поколения позволила в лучшей степени согласовать данные испытаний и расчетов благодаря большей гибкости усовершенствованной модели.

В табл. 1 приведены параметры компрессоров, ступени которых участвовали в моделировании. На примере ЦК 369/76-1,48: ЦК (СПЧ) — центробежный компрессор или сменная проточная часть; 369 — объемная производительность на входе \bar{V}_H (м³/мин) при максимальном КПД; 76 — конечное давление в барах; 1,48 — отношение давлений.

Основные параметры компрессоров и СПЧ: производительность $\bar{V}_H = 31 - 573$ м³/мин, отношение давлений $\pi = 1,39 - 2,28$, мощность $N_e = 4,5 - 25$ МВт, конечное давление — 28–125 ата. Проточные части компрессоров и СПЧ имеют от 2 до 6 ступеней. Напомним, что приемо-сдаточные испытания (ПСИ) проведены на воздухе при эквивалентной частоте вращения, которая указана в табл. 1. В табл. 1 приведено отношение давлений на режиме максимального КПД, рассчитанное при моделировании характеристик по данным ПСИ. Присутствующая в названии объемная производительность при максимальном КПД также соответствует условиям испытаний.

Приводимые ниже графики (рис. 1, 2, 3) иллюстрируют точность расчета характеристик компрессоров по программам 5-го поколения Метода универсального моделирования (шесть различных компрессоров и СПЧ).

В табл. 2 приведены основные параметры «виртуальных» модельных ступеней, полученные в результате моделирования по программам 5-го поколения. Ступени, входящие в состав испытанных компрессоров и СПЧ, имеют широкий диапазон параметров проектирования:

условный коэффициент расхода, соответствующий максимальному КПД $\Phi_{\text{опт}} = 0,0226 - 0,0993$;

коэффициент теоретического напора $\psi_{T \text{ опт}} = 0,371 - 0,687$;

втулочное отношение в диапазоне $\bar{D}_{\text{вт}} = 0,258 - 0,483$;

радиальная протяженность диффузора $\bar{D}_4 = 1,410 - 1,720$;

коэффициент полезного действия $\eta_{\text{макс}} = 0,742 - 0,888$.

Всего в базе данных имеется информация по 17 всасывающим, 56 промежуточным и 17 конечным ступеням.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых компрессоров

№	Наименование компрессора	Кол-во ступеней	D_2	n , об/мин	η_{\max}	V_H , м ³ /мин	π
1	ЦК 369/76-1,48	2	0,86	4470	0,8545	369	1,48
2	ЦК 338/76-1,50	2	0,86	4472	0,8528	338	1,5
3	СПЧ 31/100-2,28	6	0,33	11870	0,7742	31	2,28
4	ЦК 53/125-1,95	5	0,395	7911	0,797	53	1,95
5	ЦК 56/76-1,77	6	0,42	6433	0,8450	56	1,77
6	ЦК 249/76-1,71	4	0,68	5194	0,8726	249	1,71
7	СПЧ 573/76-1,54	2	0,93	4470	0,8464	573	1,54
8	ЦК 338/76-1,45	2	0,86	4468	0,8432	338	1,45
9	СПЧ 350/73-1,39	2	0,83	4468	0,8520	350	1,39
10	СПЧ 385/61-1,67	2	0,87	4478	0,7832	385	1,67
11	ЦК 94/77-1,7	4	0,465	6450	0,8143	94	1,7
12	ЦК 470/45-1,76	2	0,86	5100	0,824	470	1,76
13	СПЧ 146/71-1,75	3	0,555	8200	0,8054	146	1,75
14	ЦК 151/64-1,67	3	0,53	8200	0,8133	151	1,67
15	ЦК 106/82-1,85	4	0,495	8200	0,8097	106	1,85
16	СПЧ 329/28-1,49	2	0,85	4505	0,8076	329	1,49
17	ЦК 121/107-1,55	5	0,508	4800	0,7936	121	1,55

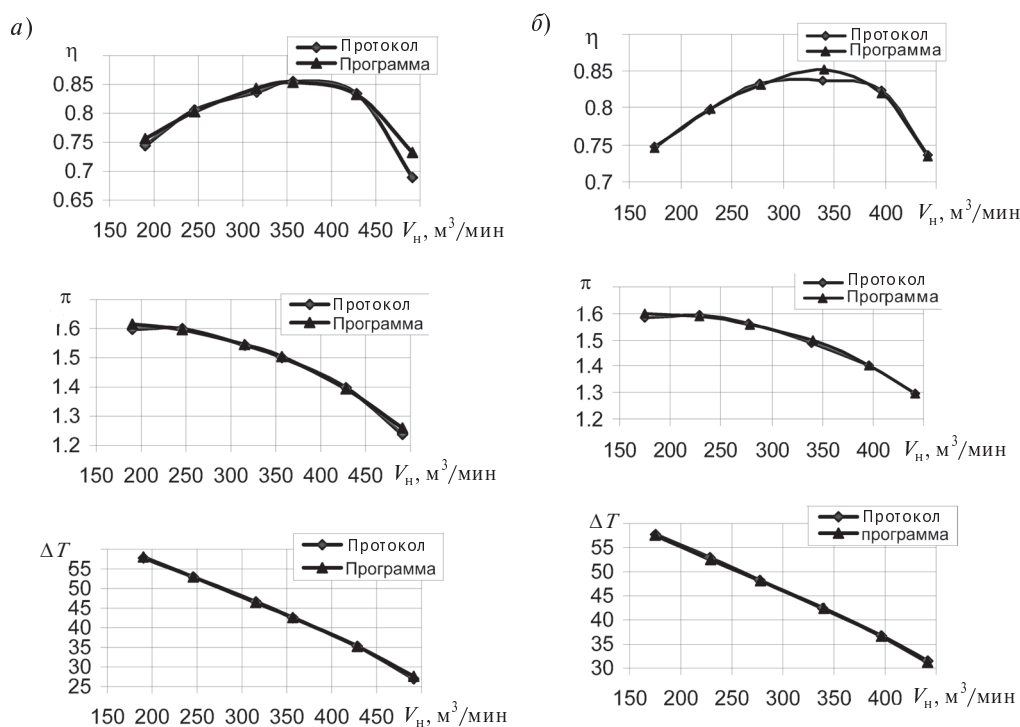


Рис. 1. Сопоставление измеренных и рассчитанных КПД, отношений давления и перепадов температур для компрессоров: а — ЦК 369/76-1,48; б — ЦК 338/76-1,50

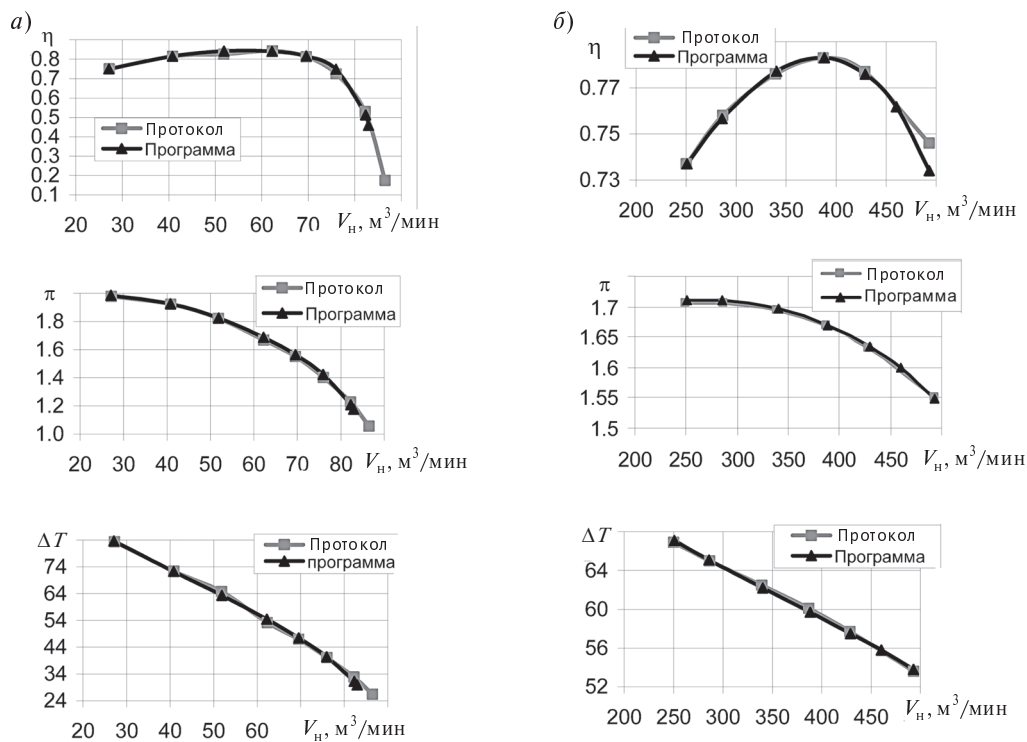


Рис. 2. Сопоставление измеренных и рассчитанных КПД, отношений давления и перепадов температур для компрессоров: а — ЦК 56/76-1,77; б — СПЧ 385/61-1,67

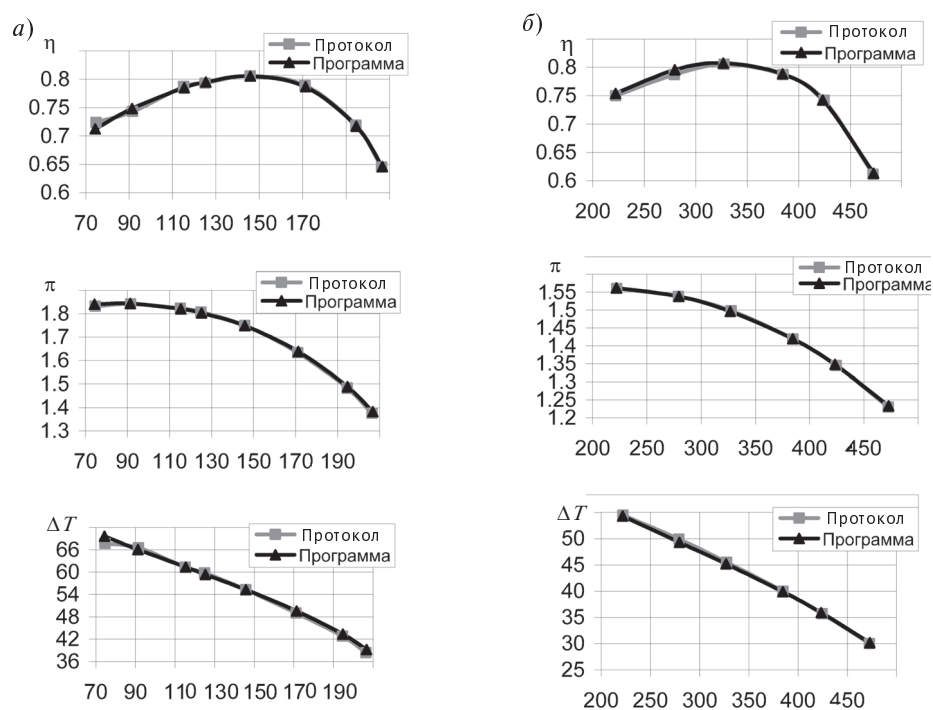


Рис. 3. Сопоставление измеренных и рассчитанных КПД, отношений давления и перепадов температур для компрессоров: а — СПЧ 146/71-1,75; б — СПЧ 329/28-1,49

Основные параметры «виртуальных» модельных ступеней

№	Компрессор/СПЧ	Степень	$\Phi_{\text{опт}}$	$\Psi_{\text{топт}}$	$\eta_{\text{макс}}$	$\frac{D_{\text{БТ}}}{D_2}$	$\frac{D_4}{D_2}$
1	ЦК 369/76-1,48	В 054/491	0,0535	0,4909	0,86	0,279	1,5
		П 054/491	0,0538	0,4906	0,878	0,279	1,5
		К 047/495	0,0474	0,4951	0,854	0,326	1,5
2	ЦК 338/76-1,50	В 047/523	0,0471	0,5225	0,858	0,279	1,5
		П 049/510	0,0489	0,5101	0,872	0,279	1,5
		К 043/504	0,0434	0,5037	0,842	0,326	1,5
3	СПЧ 31/100-2,28	В 027/410	0,0276	0,409	0,815	0,378	1,6
		П 028/379	0,0279	0,3796	0,826	0,378	1,6
		П 025/390	0,0247	0,3903	0,817	0,394	1,6
		П 023/383	0,0226	0,3832	0,807	0,409	1,6
		П 026/371	0,0256	0,3708	0,791	0,483	1,6
		П 023/384	0,0232	0,3836	0,787	0,466	1,6
		К 023/379	0,0231	0,3793	0,783	0,450	1,6
4	ЦК 53/125-1,95	В 040/590	0,04	0,5902	0,786	0,350	1,6
		П 044/555	0,0443	0,5554	0,821	0,350	1,6
		П 044/555	0,0443	0,5554	0,821	0,350	1,6
		П 037/551	0,037	0,5512	0,815	0,350	1,6
		П 035/561	0,0348	0,5608	0,807	0,350	1,6
		К 033/593	0,033	0,5927	0,76	0,350	1,6
5	ЦК 56/76-1,77	В 041/518	0,0411	0,5184	0,835	0,371	1,65
		П 051/452	0,0507	0,4523	0,875	0,371	1,65
		П 049/452	0,0491	0,4523	0,873	0,371	1,65
		П 045/470	0,0446	0,4696	0,872	0,371	1,65
		П 043/467	0,043	0,4674	0,869	0,371	1,65
		П 042/463	0,0416	0,4628	0,868	0,371	1,65
		К 040/460	0,0404	0,4603	0,842	0,371	1,65
6	ЦК 249/76-1,71	В 059/462	0,0596	0,4622	0,873	0,323	1,714
		П 063/441	0,0633	0,4411	0,888	0,323	1,714
		П 056/451	0,0563	0,4506	0,886	0,323	1,714
		П 052/449	0,052	0,4494	0,885	0,323	1,714
		К 048/451	0,0478	0,4509	0,876	0,323	1,714
7	СПЧ 573/76-1,54	В 067/448	0,0676	0,4484	0,863	0,258	1,45
		П 066/458	0,0664	0,4583	0,879	0,258	1,45
		К 059/479	0,0593	0,4788	0,855	0,301	1,45

Продолжение табл. 2

№	Компрессор/СПЧ	Ступень	$\Phi_{\text{опт}}$	$\Psi_{\text{топт}}$	$\eta_{\text{макс}}$	$\frac{D_{\text{вг}}}{D_2}$	$\frac{D_4}{D_2}$
8	ЦК 338/76-1,45	В 047/491	0,0473	0,4905	0,853	0,290	1,428
		П 051/466	0,0505	0,4658	0,871	0,290	1,428
		К 044/464	0,0444	0,4638	0,848	0,290	1,428
9	СПЧ 350/73-1,39	В 059/445	0,0586	0,4452	0,842	0,337	1,47
		П 063/418	0,0627	0,4184	0,876	0,337	1,47
		К 053/441	0,053	0,4414	0,867	0,335	1,47
10	СПЧ 385/61-1,67	В 054/687	0,0544	0,687	0,813	0,322	1,427
		П 065/646	0,0651	0,646	0,838	0,322	1,427
		К 045/700	0,0454	0,6998	0,802	0,322	1,427
11	ЦК 94/77-1,7	В 043/579	0,0434	0,579	0,822	0,344	1,72
		П 046/565	0,0458	0,5645	0,859	0,344	1,72
		П 042/520	0,042	0,5204	0,85	0,344	1,72
		П 042/520	0,042	0,5204	0,855	0,344	1,72
		К 040/542	0,0398	0,5411	0,818	0,344	1,72
12	ЦК 470/45-1,76	В 056/650	0,0561	0,6495	0,808	0,314	1,488
		П 061/635	0,061	0,6345	0,874	0,314	1,488
		П 056/598	0,0561	0,5977	0,854	0,34	1,488
		К 053/612	0,0532	0,6115	0,866	0,34	1,488
13	СПЧ 146/71-1,75	В 039/581	0,0394	0,5809	0,809	0,3405	1,55
		П 042/561	0,0424	0,5607	0,844	0,341	1,55
		П 041/571	0,0414	0,571	0,849	0,3405	1,55
		К 037/604	0,0371	0,6035	0,806	0,3405	1,55
14	ЦК 151/64-1,67	В 052/559	0,0513	0,5686	0,818	0,339	1,55
		П	0,059	0,5196	0,876	0,339	1,55
		П 045/598	0,059	0,5196	0,876	0,339	1,55
		К 040/559	0,0415	0,575	0,799	0,339	1,55
15	ЦК 106/82-1,85	В 040/569	0,0395	0,5689	0,819	0,339	1,69
		П 043/546	0,0426	0,546	0,856	0,339	1,69
		П 043/546	0,0426	0,546	0,856	0,339	1,69
		П 043/546	0,0426	0,546	0,856	0,339	1,69
		К 038/582	0,0382	0,5824	0,813	0,339	1,69
16	СПЧ 329/28-1,49	В/П 059/495	0,0594	0,4948	0,856	0,287	1,447
		П 061/482	0,0612	0,4824	0,891	0,287	1,447
		К 038/556	0,0377	0,556	0,824	0,3	1,23



Окончание табл. 2

№	Компрессор/СПЧ	Ступень	$\Phi_{\text{опт}}$	$\Psi_{\text{топт}}$	$\eta_{\text{макс}}$	$\frac{D_{\text{вТ}}}{D_2}$	$\frac{D_4}{D_2}$
17	ЦК 121/107-1,55	В 083/596	0,0831	0,5962	0,766	0,338	1,41
		П 099/547	0,0993	0,5473	0,837	0,338	1,41
		П 094/566	0,094	0,5655	0,837	0,338	1,41
		П 066/628	0,0656	0,6276	0,83	0,338	1,41
		П 066/628	0,0656	0,6276	0,849	0,338	1,41
		К 056/647	0,056	0,6471	0,742	0,338	1,41

В названиях ступеней представлены их основные параметры: буквы (В — всасывающая, П — промежуточная, К — концевая); первые три цифры, например «054», означают, что $\Phi_{\text{опт}} = 0,054$; три цифры после косой черты, например «491», означают, что $\Psi_{\text{топт}} = 0,491$.

Описанные усовершенствования и уточнения алгоритма термодинамического расчета и расчета потерь напора, реализованные в программах 5-го поколения Метода универсального моделирования, повышают надежность проектирования новых центробежных компрессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, Ю.С.** Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства [Текст] / Ю.С. Васильев, П.И. Родионов, М.И. Соколовский // Промышленность России.— 2000. № 10-11.— С. 78–85.

2. **Галёркин, Ю.Б.** Создание Метода универсального моделирования [Текст] / Ю.Б. Галёркин // Тр. научно-техн. конф. «Промышленные центробежные компрессоры. Исследование и разработка». СПбГПУ.— 2003.— С. 56–63.

3. **Галёркин, Ю.Б.** Анализ и обобщение диаграмм поверхностных скоростей рабочих колес центробежных компрессоров. Часть 1 [Текст] / Ю.Б. Галёркин, А.А. Лысякова // Компрессорная техника и пневматика.— 2010. № 6.— С. 4–11.

4. **Галёркин, Ю.Б.** Анализ и обобщение диаграмм поверхностных скоростей рабочих колес центробежных компрессоров. Часть 2 [Текст] / Ю.Б. Галёркин, А.А. Лысякова // Компрессорная техника и пневматика.— 2010. № 7.— С. 26–33.

5. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 1 [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова // Компрессорная техника и пневматика.— 2010. № 2.— С. 2–11.

6. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования

центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 2 [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова // Компрессорная техника и пневматика.— 2010. № 3.— С. 15–22.

7. **Галёркин, Ю.Б.** Разработка модельных ступеней по результатам испытания промышленных центробежных компрессоров нового поколения [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова // Тр. 15 Междунар. научно-техн. конф. по компрессорной технике.— Казань.— 2011. Т. 1.— С. 224–232.

8. **Галёркин, Ю.Б.** Уточнение алгоритма расчета параметров потока в центробежной компрессорной ступени [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова, А.А. Дроздов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4.— С. 150–157.

9. **Галёркин, Ю.Б.** Развитие компьютерных программ Метода универсального моделирования 1-го уровня [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова, А.А. Дроздов // Тр. 15 Междунар. научно-техн. конф. по компрессорной технике.— Казань.— 2011. Т. 1.— С. 276–285.

10. **Дроздов, А.А.** Совершенствование пакета программ метода универсального моделирования центробежных компрессоров [Текст]: магистр. дис. / А.А. Дроздов // СПбГПУ.— 2011.— С. 211.

11. **Лысякова, А.А.** Совершенствование программ расчета характеристик центробежных компрессорных ступеней с использованием обобщенных диаграмм скоростей обтекания лопаток [Текст]: дис ... канд. техн. наук / А.А. Лысякова / СПбГПУ.— 2010.

12. Солдатова, К.В. Уточнение моделей потерь и напора в программах Метода универсального моделирования по результатам испытания промышленных центробежных компрессоров. [Текст] / К.В. Солдатова // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4. С.— 300–308.

13. Труды научной школы компрессорострое-

ния СПбГПУ [Текст] / Под ред. Галёркина Ю.Б.— М.: Изд-во «КХТ», 2000.

14. Труды научной школы компрессорострое-ния СПбГПУ [Текст] / Под ред. Галёркина Ю.Б.— М.: Изд-во «КХТ»— 2005.

15. Труды научной школы компрессорострое-ния СПбГПУ [Текст] / Под ред. Галёркина Ю.Б.— М.: Изд-во «КХТ».— 2010.

УДК 621.793.74:621.365.5

Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ

Технологии газотермического напыления успешно применяются при создании защитных покрытий различного класса на новых изготавливаемых деталях и как технологии восстановления изношенных изделий. Однако самофлюсующиеся покрытия после напыления требуют дополнительной термообработки. Одним из наиболее эффективных методов обработки является технология ускоренного индукционного нагрева.

Метод последующего индукционного оплавления покрытия отличается нагревом покрытия и основы одновременно под действием вихревых токов, что приводит как к улучшению качества самого покрытия, так и к увеличению адгезии между покрытием и подложкой.

Этот способ имеет ряд преимуществ, поскольку позволяет производить оплавление материалов в узкой зоне сцепления подложки с покрытием без нагрева самой заготовки.

Метод индукционной обработки заключается в следующем: обрабатываемая деталь подвергается ускоренному поверхностному высокочастотному нагреву, при котором вследствие наличия границы раздела сред с разной электропроводностью основная мощность выделяется не на поверхности заготовки, а на границе подложки.

При разработке технологии индукционного нагрева конкретной детали большое значение имеет выбор типа индуктора, необходимого для ее обработки. В случае индукционного нагрева выбор частоты, мощности индукционной установки и ее геометрии принципиальны для реализации необходимого режима нагрева.

Теоретический расчет и математическое моделирование процесса индукционного нагрева детали позволяют получить электрические и технологические параметры процесса, а также расчетное распределение температуры внутри нагреваемого объекта. Однако, несмотря на наличие обширной информации по физическим процессам, протекающим при индукционном нагреве, затруднено комплексное изучение всех процессов, связанных непосредственно со свойствами материалов, в частности диффузии, образования адгезионных связей и изменения структуры покрытия в результате нагрева.

Нагрев заготовки с покрытием — достаточно сложный объект для экспериментальных исследований. Сложность проведения измерений основных параметров процесса связана с проблематичностью измерения температуры нагрева и плотности электрического тока внутри нагреваемых слоев детали. Практически можно оценить только температуру на поверхности детали и с торца заготовки, а также интегральные параметры электрической цепи индуктора.

Таким образом, основными задачами проведения экспериментальных исследований становятся:

определение основных параметров нагрева детали, таких, как температура нагрева и время нагрева, мощность передаваемая в индуктор от генератора, частота генератора, ток индуктора;

исследование шлифов деталей после нагрева, оценка изменений структуры покрытий;



установление качественной и количественной связи между внешними и геометрическими параметрами используемого оборудования, определяющими технологический процесс, и качеством получаемых покрытий.

Большинство деталей промышленных механизмов, требующих восстановления, — крупногабаритные: типичное применение технологии — восстановление валов, штоков гидроцилиндров, пинолей станков. Для обработки таких деталей требуется индуктор соответствующего диаметра и значительной мощности. В связи с необходимостью проведения многочисленных опытов на различных частотах и для различных типоразмеров целесообразно проведение модельного эксперимента, т. е. замещение материального оригинала физической моделью. Объектом исследования при этом будет служить физическая модель, т. е. материальная функциональная модель, подобная и физически однородная с оригиналом. Результаты исследования такой физической модели переносятся на оригинал с помощью масштабов. Все масштабы при этом безразмерные.

Таким образом, индукционному нагреву будет подвергнута физически подобная модель системы «индуктор — заготовка», в нашем случае — уменьшенная модель реальной детали в индукторе меньшего размера и меньшей мощности.

Можно говорить об адекватности результатов моделирования, если выполнены следующие пять критериев физического подобия двух объектов [1, 2]:

сходственность математических описаний объектов;

связь сходственных величин масштабами;

выбор масштабов соответственно масштабным уравнениям;

подобие условий однозначности;

подобие известных функций.

Выполнение первого условия подобия (сходственности математических описаний объектов) может быть обеспечено физической однородностью оригинала и модели. В данном случае это осуществляется исходя из постановки задачи эксперимента, поскольку для моделирования используем реальную индукционную установку. Кроме того, для моделирования детали выберем геометрически подобный объект с идентичными физическими свойствами материалов, что значительно упрощает задачу построения модели.

Для математического описания индукционной системы «короткий индуктор — заготовка» используем модель трансформатора с большим рассеянием, как для расчета характеристик индуктора.

Для индукционной системы мы можем записать

$$U_{\text{и}} = (r_{\text{з}} + jx_{\text{з}})I_{\text{и}}w^2,$$

где $U_{\text{и}}$, $I_{\text{и}}$ — напряжение и ток индуктора; w — количество витков.

Для модели будет действительно

$$U_{\text{м-и}} = (r_{\text{м-з}} + jx_{\text{м-з}})I_{\text{м-и}}w_{\text{м}}^2.$$

Введем масштабные коэффициенты:

$$c_U = \frac{U_{\text{orig}}}{U_{\text{mod}}}, \quad c_I = \frac{I_{\text{orig}}}{I_{\text{mod}}}, \quad c_w = \frac{w_{\text{orig}}}{w_{\text{mod}}}, \quad c_z = \frac{z_{\text{orig}}}{z_{\text{mod}}}.$$

Таким образом, установив полный перечень величин, фигурирующих в математических описаниях модели и оригинала, и принимая связь через масштабы между сходственными величинами, добиваемся выполнения второго условия подобия систем.

Для выполнения третьего условия подобия — выбора масштабов соответственно масштабным уравнениям — требуется определение этих уравнений.

Исходя из геометрического подобия модели и оригинала выберем следующие масштабные уравнения и масштабные коэффициенты:

$$\begin{aligned} \text{геометрические размеры модели } L_{\text{mod}} &= \frac{L_{\text{orig}}}{10} \\ &= 100 \text{ мм}; D2_{\text{mod}} = \frac{D2_{\text{orig}}}{10} = 20 \text{ мм}; D1_{\text{mod}} = \frac{D1_{\text{orig}}}{10} \\ &= 24 \text{ мм}; a2_{\text{mod}} = \frac{a2_{\text{orig}}}{10} = 10 \text{ мм}; a1_{\text{mod}} = \frac{a1_{\text{orig}}}{10} \\ &= 12 \text{ мм}; \end{aligned}$$

электрические параметры модели (получим, произведя расчет индукционной системы) $I_1 = 5,691 \cdot 10^3 \text{ А}$; $r_{\text{з}} = 0,0024 \text{ Ом}$; $x_{\text{з}} = 0,019 \text{ Ом}$; $z_{\text{з}} = 0,02 \text{ Ом}$;

масштабные коэффициенты, следующие из

$$\text{геометрии модели, } c_w = \frac{w_{\text{orig}}}{w_{\text{mod}}} = \frac{6}{1} = 6; \quad c_z = \frac{z_{\text{orig}}}{z_{\text{mod}}}$$

$$= \frac{6}{1} = 6; \quad c_I = \frac{I_{\text{orig}}}{I_{\text{mod}}} = 0,105;$$

получим оставшиеся, подставляя известные коэффициенты в уравнение

$$\frac{U_{\text{orig}}}{c_U} = \frac{z_{\text{orig}}}{c_z} \frac{I_{\text{orig}}}{c_I} \frac{w_{\text{orig}}^2}{c_w^2}.$$

Откуда

$$c_U = \frac{U_{\text{orig}} c_z c_I c_w^2}{z_{\text{orig}} I_{\text{orig}} w_{\text{orig}}^2} = \frac{c_z z_{\text{orig}} c_I I_{\text{orig}} w_{\text{orig}}^2}{U_{\text{orig}}} =$$

$$= \frac{1401 \cdot 116,9 \cdot 0,105 \cdot 6^2}{2,338 \cdot 599,172 \cdot 6^2} = 12,28.$$

Таким образом, выполняется третье условие подобия — выбор масштабов соответственно масштабным уравнениям.

Четвертое условие — подобие условий однородности оригинала и модели, так и геометрическим подобием систем: зависимость $I(t)$ при прочих равных условиях определяется начальным значением тока $i(0)=0$. Это условие однородности дифференциального уравнения, описывающего оригинал. Начальное условие для модели должно быть подобным $i_m(0) = i_{\text{orig}}(0) / m_I = 0$.

Для оригинала закон изменения тока $I(t)$ зависит от формы напряжения $u = u(t)$. Форма напряжения модели $u_m(t)$ должна быть подобной: $u_m(t_m) = u_{\text{orig}}(m_t t_m) / m_U$.

В случае использования напряжения той же частоты, что и в оригинале, это условие выполняется:

$$m_t = 1; \quad \omega_{\text{orig}} = \omega_m.$$

Таким образом, пятое условие — подобие известных функций — также обеспечивается за

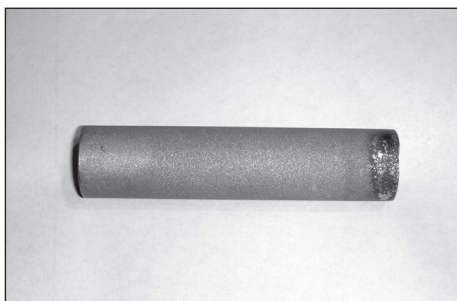


Рис. 1. Модель заготовки

счет выбора физически идентичного метода нагрева и геометрически подобной системы.

В результате получена физическая модель, с помощью которой мы можем провести экспериментальное исследование.

Для проведения таких исследований разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить нагрев моделей заготовок в соответствии с условиями модельного эксперимента, а также выполнять измерение основных технологических параметров нагрева.

При монтаже экспериментальной установки был использован промышленный одновитковый индуктор, обеспечивающий требуемые характеристики процесса нагрева. Использование в качестве основных узлов установки промышленных аналогов позволяет адаптировать получаемые результаты для практического применения.

В качестве источника питания использован высокочастотный генератор ВЧГ2-60/0,066, предназначенный для питания технологических устройств индукционного нагрева деталей машин и инструмента при различных технологических операциях.

Определение температуры нагрева поверхности заготовок осуществлялось при помощи инфракрасного бесконтактного датчика температуры (пиромета) «Кварц-М» (диапазон измерения — 50–2500 °С, быстродействие — 10 мс, максимальная приведенная погрешность — 0,8 %).

Для экспериментального подтверждения улучшения свойств покрытий в результате индукционной термообработки был произведен нагрев модели заготовки диаметром 20 мм (материал — сталь 08Х18Н10Т) с покрытием толщиной 100 мкм (материал — ПГСП2) согласно рассчитанной модели (рис. 1). Параметры индукционной установки: внутренний диаметр индуктора по меди — 24 мм; длина индуктора — 10 мм; число витков индуктора — 1, размер витка индуктора в радиальном направлении — 10 мм.

Нагрев изделий производился на разных режимах в зависимости от мощности колебательного контура генератора — 5, 11,5 и 36,8 кВт.

Для анализа полученных результатов методом металлографии использовались следующие оборудование: микроскоп Zeiss Optio с программой компьютерного анализа TIXOMET Pro; ска-

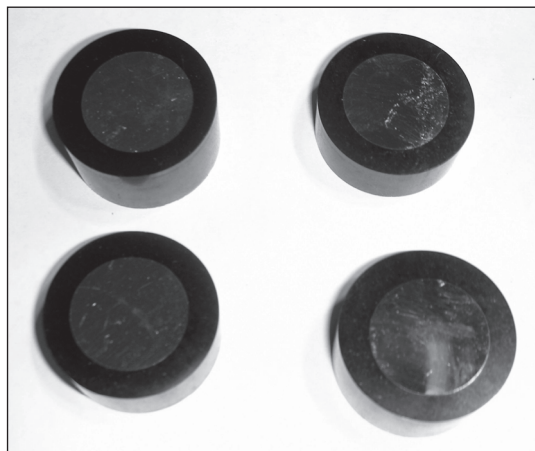


Рис. 2. Шлифы заготовок

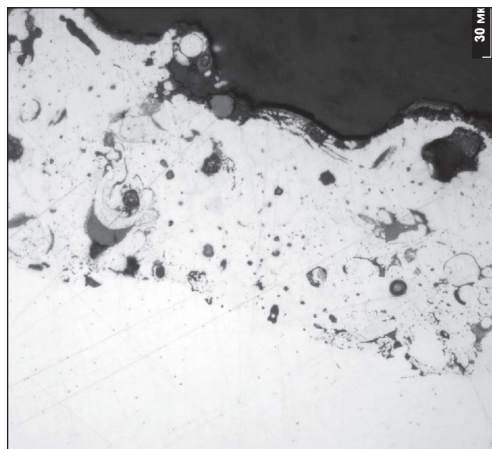


Рис. 3. Структура газотермического покрытия после индукционной обработки (66 кГц; 36,8 кВт)

нирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA с приставкой для рентгеновского микроанализа; электронный микроскоп NEOPHOT 32 с оптикой Carl Zeiss; система анализа «Виотест структура 5.2». Система «Виотест структура 5.2» позволяет определить количество, объем и характеристики пор и рассчитать параметры пористости покрытия.

Определение адгезии производилось методом технологической пробы (ударное нагружение). Для определения микротвердости использовался прибор ПНТ-3 (ЛОМО).

Шлифы (рис. 2) сделаны на кафедрах «Пластические деформации» и «Обработка металлов» СПбПУ.

В результате индукционной обработки получены покрытия, отличающиеся большей плотностью и адгезионной прочностью. На рис. 3 приведен снимок структуры шлифа, сделанный при помощи электронного микроскопа. После нагрева при частоте 66 кГц (мощность колебательного контура 36,8 кВт) покрытие имеет значительно меньшую пористость и большую плотность на границе; граница раздела покрытия и основы имеет высокий уровень адгезии.

Результаты металлографических исследований шлифов покрытий толщиной 100–200 мкм на стальной основе показали:

для структур покрытий из материалов Ni, FeCr, Cr₂B, CrB, Cr₇C₃, Cr₂O₃ твердость HRC составляет 60–65, объемная плотность — 6,5–7 г/см³;

открытая пористость в результате обработки снижается с 15–20 % до 4,7 %, средний размер пор сокращается с 2–3 мкм до 1,3 мкм;

микротвердость составляет 8100–8290 МПа.

Таким образом, использование токов высокой частоты для обработки газотермических покрытий значительно увеличивает их износостойкость, препятствует образованию сколов, отслоению и разрушению покрытия в процессе эксплуатации детали. Значения полученных режимов работы технологического оборудования должны быть пересчитаны на реальные масштабы с использованием полученных ранее масштабных коэффициентов.

Разработана методика экспериментального исследования индукционного нагрева на основе физического моделирования, позволяющая при помощи масштабной модели оценить необходимые режимы и результаты обработки крупногабаритных деталей.

В результате модельного эксперимента получены характеристики покрытий из самофлюсующихся материалов после индукционной термообработки, свидетельствующие об эффективности применения технологии: за счет снижения пористости покрытия возрастает твердость, увеличивается адгезия между покрытием и подложкой, что значительно увеличивает износостойкость покрытия, препятствует образованию сколов, отслоению и разрушению покрытия в процессе эксплуатации детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лебедев, А.Н.** Основы теории подобия и моделирования [Текст]: Учебное пособие / А.Н. Лебедев. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина).— Л.: 1971.— 64 с.
2. **Седов, Л.И.** Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов.— 10-е изд., доп.— М.: Наука, 1987.— 430 с.
3. **Фролов, В.Я.** Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки [Текст] / В.Я. Фролов, Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин // Металлообработка: научно-производственный журнал.— СПб.— 2009. № 2(50).— С. 28—33.
4. **Фролов, В.Я.** Анализ процессов на стадии контакта в условиях обработки металлов электро- контактно-дуговым методом [Текст] / В.Я. Фролов // Металлообработка: научно-производственный журнал.— СПб.— 2002. № 5.— С. 16—23.
5. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазмотронов Ч.1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов.— СПб: Изд-во Политехнического университета, 2004.— 227 с.
6. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазмотронов Ч.2: Электромагнитные задачи в плазмотронной технике [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.— 296 с.

УДК 624.07.012.35.046

В.В. Белов, С.Е. Никитин

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Разрушающему воздействию агрессивных атмосферных и производственных сред в той или иной степени подвергается большинство строительных конструкций. Материальный ущерб от последствий аварий, а также из-за необходимости проведения ремонта и усиления конструкций превышает 5 % общемирового валового дохода. В Российской Федерации указанные потери оцениваются в 20–25 млрд. рублей ежегодно. Одной из причин такого положения признается несовершенство научно-методического обеспечения в области прогнозирования предельных состояний и ресурса железобетонных конструкций.

На кафедре «Строительные конструкции и материалы» инженерно-строительного факультета СПбГПУ предложена и разрабатывается инженерно-ориентированная модель деформирования и разрушения изгибаемых железобетонных элементов при эксплуатации в агрессивных средах. При этом в основу положен дискретный подход к моделированию макротрещин. Предполагается образование и развитие регулярной в целом системы нормальных трещин в растяну-

той зоне бетона с шагом $L_{\text{сгс}} = 2L$, глубиной $H_{\text{сгс}}$ и шириной раскрытия $a_{\text{сгс}}$ (рис. 1).

В результате изгибаемый элемент рассматривается как система деформирующихся блоков, разделенных равноотстоящими трещинами и взаимодействующих между собой по сохраняющему сплошность бетону (или сжатой зоне шва), а также посредством сжатой A'_s и растянутой A_s стержневой арматуры. В такой постановке напряженно-деформированное состояние нетрещиностойкого элемента является циклически симметричным относительно сечений с трещинами ($x = \pm L$) и сечений, равноудаленных от смежных трещин-близнецов ($x = 0$), и проблема сводится к решению задачи для симметричной половины $S \times L$ характерного блока (см. рис. 1). С этой целью известный блочно-контактный подход Васильева — Пересыпкина в инженерных приложениях получил развитие в форме «метода двух сечений», на базе которого построена диахронная модель деформирования железобетона при совместных силовых и агрессивных средовых воздействиях [1, 2]. Дополнительными факторами влияния здесь являются: дегра-

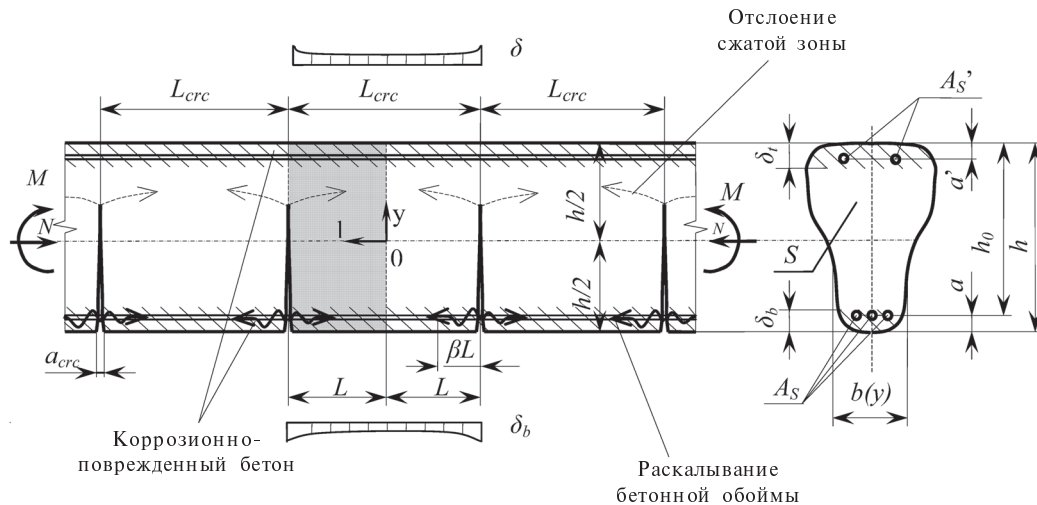


Рис. 1. Элемент при силовых и коррозионных воздействиях

дация прочностных и деформационных характеристик сжатого и растянутого бетона; коррозия металла стержневой арматуры; повреждение контактного взаимодействия арматуры с бетоном.

Основные факторы негативного влияния агрессивных воздействий на железобетонный элемент моделируются изменением характеристик бетонной и арматурной составляющих сечения элемента, а также сцепления арматуры с бетоном. В рамках предлагаемой модели геометрические и механические параметры повреждения по высоте сечения и длине блока дифференцируются в зависимости от направления действия (одно-, двух- и всестороннее), а также вида и интенсивности агрессии.

В общем случае в пределах глубины повреждения бетона допускается наличие полностью разрушенного слоя (с соответствующим уменьшением начальных габаритов сечения) и «переходного» слоя, в пределах которого рассматриваемые деформационные (E_b , ε_{bu} , ε_{btR}) и прочностные (R_b , R_{bt}) характеристики линейно изменяются от нуля до номинального значения. Для этих целей могут использоваться соответствующие конкретным условиям модели деградации бетона, например диссипативная модель В.М. Бондаренко или степенные функции деградации, предложенные А.И. Попеско. Учет деградационных явлений сводится к трансформации исходной диаграммы деформирования бетона.

Равномерная и питтинговая коррозия металла учитывается непосредственно независимым

либо согласованным уменьшением исходных поперечных сечений растянутой A_s и сжатой A'_s арматуры с учетом неравномерности коррозии арматуры по длине блока с ее локализацией в сечении с нормальной трещиной (см. рис. 1).

Повреждение контакта растянутой арматуры с бетоном, сопровождающееся образованием радиальных трещин раскола бетонной обоймы из-за распора при выходе профилированной арматуры из бетона, а также избыточного внутреннего давления на бетонную обойму продуктов коррозии арматуры, моделируется путем трансформации закона локального сцепления и уменьшения длины активного сцепления $L(1-\beta)$ [1, 2].

Разрешающую систему метода из шести нелинейных алгебраических уравнений составляют условия статической эквивалентности $\Sigma N = 0$, $\Sigma M = 0$, а также кинематические зависимости для центрального сечения блока $x = 0$ и для сечения с трещиной $x = \pm L$.

Исходные данные для разрешающей системы уравнений:

геометрические характеристики сечения (высота сечения h , ширина сечения b , толщины защитных слоев верхней и нижней арматуры — соответственно a и a' , проектная площадь растянутой и сжатой арматуры — A_s , A'_s);

прочностные и деформационные характеристики материалов (прочности сжатого и растянутого бетона R_b , R_{bt} , начальный модуль упругости бетона E_b , расчетное сопротивление арматуры R_s , модуль упругости арматуры E_s);

уровень повреждения элемента (глубины повреждений бетона сверху δ_t , снизу δ_b и сбоку δ_s , а также снижение диаметра арматуры δ_d);

нагрузка на элемент (изгибающий момент M и нормальное усилие N).

Разработанный алгоритм предполагает последовательность решения, представленную на рис. 2. На первом этапе решения определяются относительная высота сжатой зоны ξ^m , относительная деформация сжатого бетона ε_b^m и растянутой арматуры ε_s^m в среднем сечении блока $\xi = 0$. Далее вычисляются относительная высота сжатой зоны элемента x , относительная деформация сжатого бетона ε_b и растянутой арматуры ε_s уже в сечении с трещиной — $\xi = \pm L$. На последнем этапе определяются ширина раскрытия первичной трещины a_{crc} , шаг трещин L_{crc} , локальная кривизна элемента ρ , наличие и длина радиальной трещины раскола βL . Причем в случае растрескивания бетонной обоймы выполняется итерационная процедура расчета, в рамках которой кинематическое уравнение соответствующим образом модифицируется.

Реализация численных расчетов осуществляется с помощью известного программного комплекса Maple.

Полученный комплекс параметров напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры в пределах расчетного блока позволяет с методологически единых позиций оценивать возможность реализации сценариев разрушения элемента с учетом расширенной номенклатуры, определяющей его предельные состояния:

достижение растянутой арматурой в трещине предела текучести, $\sigma_s = R_s$;

исчерпание несущей способности сжатого бетона в сечении с трещиной, $\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$ (либо $\sigma_b = R_b$);

чрезмерное развитие вторичных радиальных трещин раскалывания на контакте «растянутая арматура — бетон»;

образование вторичных продольных трещин, исходящих из вершины поперечной трещины/шва и отделяющих сжатую и растянутую зоны элемента, $\sigma_z = R_{bt}$;

чрезмерное раскрытие нормальной трещины/шва, $a_{crc} = a_{crcult}$;

чрезмерные угол поворота и/или прогиб, $f = f_{ult}$.

Расчетная модель позволяет рассматривать элементы с произвольной формой поперечных сечений.

Верификация предлагаемой модели осуществляется путем комплексного сопоставления результатов расчетов с данными лабораторных испытаний железобетонных изгибаемых балок, имеющих коррозионные повреждения.

Так, в работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований серии балок $152 \times 254 \times 3200$ мм с расчетным пролетом 3000 мм. Опытные образцы имели прочность бетона на сжатие $R_b = 40$ МПа, а прочность на растяжение — $R_{bt} = 2,5$ МПа; защитный слой бетона составлял 25 мм. В качестве растянутой арматуры использовалась стержневая диаметром $d = 15$ мм (процент армирования 0,915 %), сжатой — $d = 8$ мм; расчетное сопротивление арматурной стали $R_s = 585$ МПа. Механические испытания проводились по схеме четырехточечного изгиба с расстоянием между сосредоточенными нагрузками 1000 мм.

Коррозия материалов инициировалась добавлением в бетонную смесь хлористых солей (2,25 % от веса цемента) с последующим ускорением коррозионных процессов в наведенном электрическом поле. Хлориды добавлялись только в бетон растянутого пояса элемента. Так как продолжительность электрохимического воздействия варьировалась (50, 110, 210 и 310 суток), то обеспечивался различный уровень повреждений арматуры. По окончании проектного срока агрессивного воздействия бетон, содержащий реагент, удалялся, а арматура на этом участке очищалась от ржавчины. Затем удаленный бетон заменялся бетоном, имеющим номинальные деформационные и прочностные характеристики. Таким образом, на стадии разрушающих испытаний имелась возможность дифференцированной оценки только одного фактора негативного влияния — снижения площади сечения арматуры в зоне чистого изгиба. Контрольные опытные образцы-близнецы доводились до разрушения при отсутствии предварительных коррозионных повреждений. Маркировка опытных балок соответствовала продолжительности этапа агрессивного воздействия: CS-50—CS-310.

В работе [4] описываются условия и результаты испытаний серии балок прямоугольного профиля 100×150 мм с расчетным пролетом 860 мм. Применялся бетон с прочностью на сжа-

тие $R_b = 40$ МПа и прочностью на растяжение $R_{bt} = 2,6$ МПа. В балках с одиночным армированием растянутый арматурный пояс был образован двумя стержнями диаметром $d = 10$ мм с прочностью стали $R_s = 520$ МПа при толщине защитного слоя 25 мм. Процент армирования сечения составлял 1,05 %. Разрушающие испытания также производились по схеме четырехточечного изгиба с расстоянием между точками приложения нагрузки 300 мм.

Этап коррозионного воздействия осуществлялся путем помещения опытных образцов в ванну с 3,5 % раствором NaCl. Требуемое ускорение коррозионных процессов обеспечивалось электрохимическим способом. В зависимости от продолжительности и интенсивности воздействия достигался различный уровень коррозии бетона и арматуры. Балки маркировались в соответствии с глубиной коррозии арматуры (в процентах от номинального диаметра): В1,25–В10 %.

Основные данные по экспериментам сведены в табл. 1.

Опытные результаты сравниваются с результатами расчетов по предлагаемой диахронной модели. Ввиду отсутствия в работе [3] данных о фактической глубине коррозионных

повреждений бетона балок в расчетах их значения принимались в соответствии с зафиксированным уровнем коррозии арматуры по эмпирическим зависимостям, предложенным А.И. Попеско [5] для стержней при их нахождении в хлорной среде.

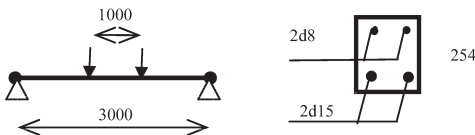

Некоторые результаты расчетов опытных балок [4] представлены на рис. 3, где относительный изгибающий момент равен $m = M / BR_{bt} H^2$, приведенная деформация наиболее сжатых волокон бетона — $\omega_b = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b,ul}}$, а приведенная деформация растянутой арматуры — $\omega_s = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sR}}$.

Результаты сопоставления экспериментальных данных и расчетов по диахронной модели сведены в табл. 2.

Полученные результаты расчетов полностью соответствуют опытным данным по механизму разрушения изгибаемых железобетонных элементов (первичное достижение предельного состояния растянутой арматурой). Зафикси-

Таблица 1

Схемы и результаты испытаний

Схема эксперимента	Элемент	Глубина повреждения бетона, мм	Потери сечения арматуры	
			δ_d , мм	ΔA_s , %
Maaddawy T. E., Soudki K., Topper T. [3]				
	Контрольный	—	—	—
	CS-50	—	0,75	9,7
	CS-110	—	1,2	15,4
	CS-210	—	1,82	22,8
	CS-310	—	2,47	30,0
Mangat P. S., Elgarf M. S. [4]				
	Контрольный	—	—	—
	В 1,25%	10	0,25	5,0
	В 2,50%	20	0,5	9,7
	В 3,75%	45	0,75	14,5
	В 5,00%	50	1,0	19,0
	В 7,50%	60	1,5	27,8
	В 10,00%	70	2,0	36,0

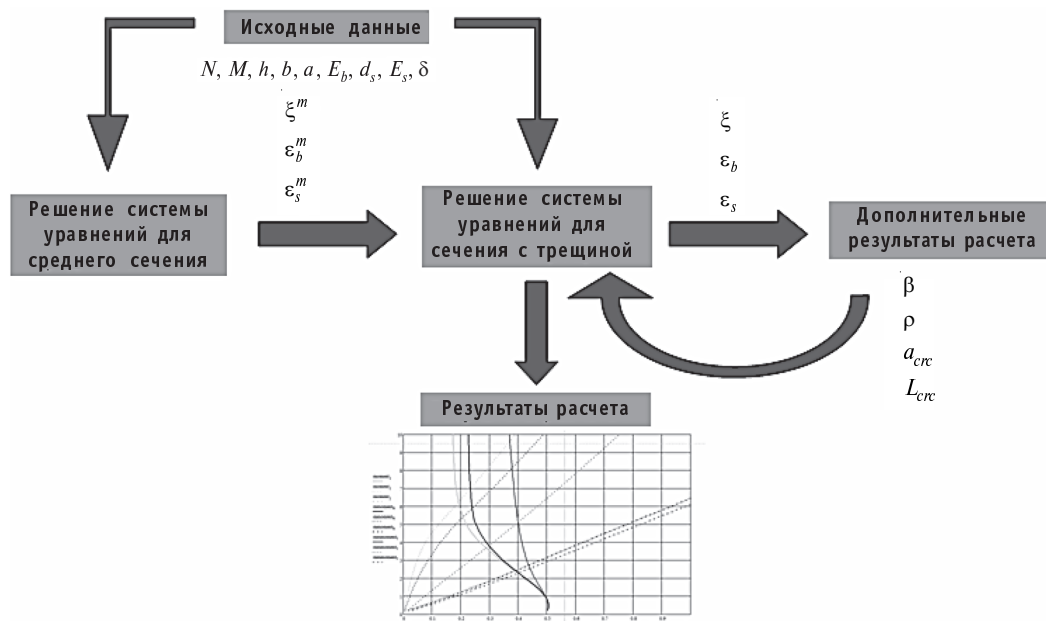


Рис. 2. Блок-схема решения

ровано хорошее количественное соответствие расчетных значений предельных изгибающих моментов опытным разрушающим нагрузкам. Наибольшая погрешность здесь не превышает в целом 10 % и вполне сопоставима с инженерной точностью. Можно отметить, что в дейст-

ующих нормативных документах отсутствуют рекомендации по оценке предельных состояний железобетонных конструкций при совместных силовых и агрессивных средовых воздействиях.

Таким образом, предлагаемая диахронная модель деформирования позволяет достоверно

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Элемент	СП 52-101-2003, M_{ult} , кН·м	Экспериментальные результаты, M_{ult} , кН·м	Результаты расчета по диахронной модели, M_{ult} , кН·м	Отклонение, %
Maaddawy T. E., Soudki K., Topper T.				
Контрольный	44,01	37,50	36,5	-2,7
CS-50	—	33,04	33,3	0,8
CS-110	—	32,30	31,2	3,5
CS-210	—	32,09*	28,8	-11,4*
CS-310	—	28,43	26,15	8,7
Mangat P. S., Elgarf M. S.				
Контрольный	9,35	9,1	8,95	-1,7
В 1,25 %	—	8,54	8,60	0,7
В 2,5 %	—	8,12	8,15	0,4
В 3,75 %	—	7,28	6,75	-7,9
В 5,0 %	—	6,58	6,45	-2,0
В 7,5 %	—	4,72	5,20	9,2
В 10 %	—	3,64	3,75	2,9

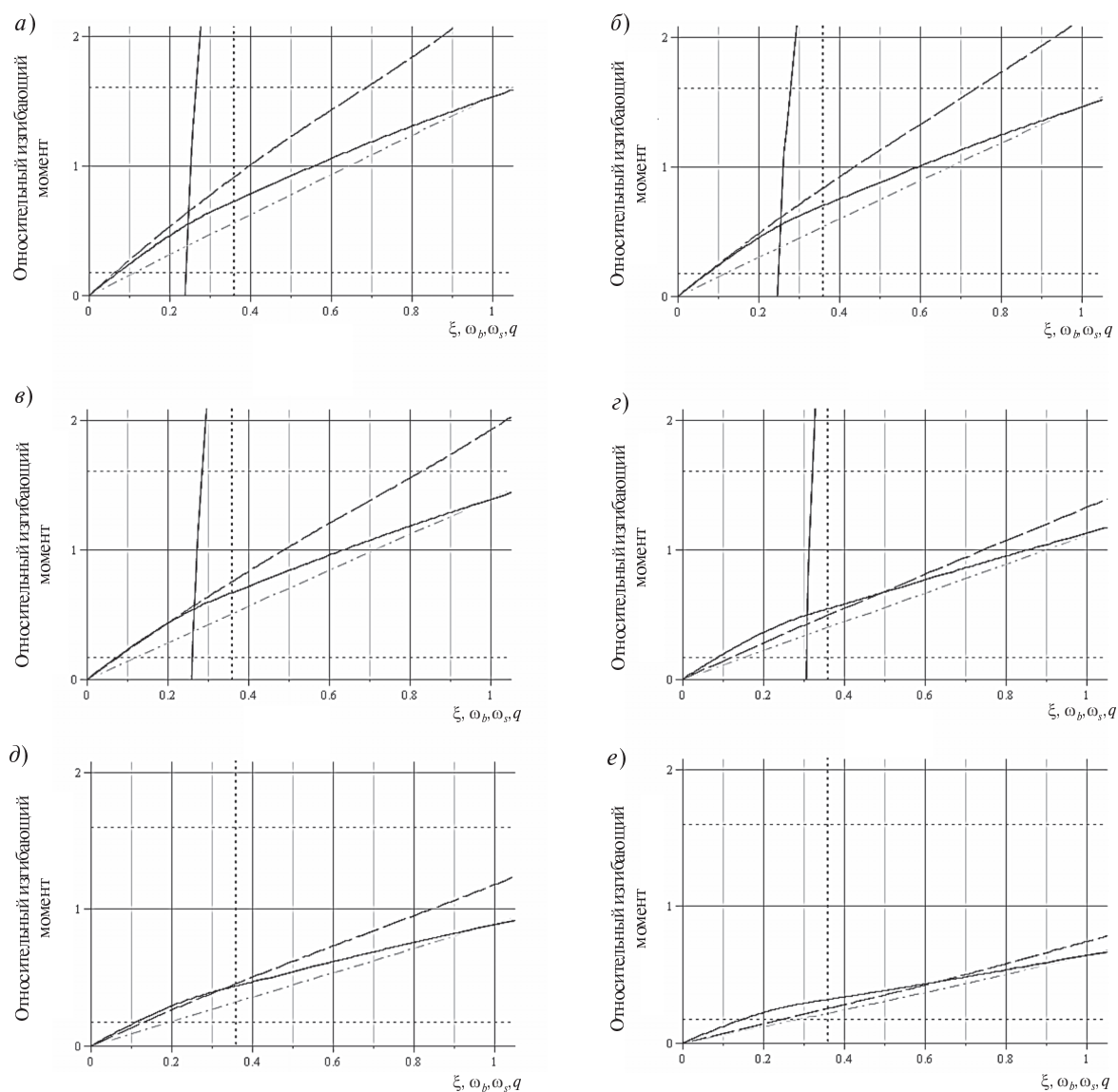


Рис. 3. Зависимость относительной высоты сжатой зоны, а также приведенных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры от относительного изгибающего момента:

a — контрольный образец; *б* — В 1,25 %; *в* — В 2,5 %; *г* — В 5 %; *д* — В 7,5%; *е* — В 10 %

— — относительная высота сжатой зоны; — — — — приведенная деформация сжатого бетона;
 - - - - - приведенная деформация растянутой арматуры; — — — — кривизная элемента; — момент трещино-
 образования; — предельный момент по СП; — граничная относительная высота сжатой зоны по СП

определять параметры эксплуатационных и предельных состояний железобетонных элементов при силовых и коррозионных воздействиях.

Предполагая неизменным характер и интенсивность деградиационного воздействия окружающей среды, задаваясь реономными моделями деградациии бетона и арматуры, с помощью диакхронной модели деформирования можно прямо определять проектный ресурс вновь возводимых и остаточный ресурс эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций по информации о наступлении следующих предельных состояний:

достижения растянутой арматурой в трещине предела текучести по условию $\sigma_s = R_s$;

исчерпания несущей способности сжатого бетона в сечении с трещиной по условиям $\varepsilon_b = \varepsilon_{bul}$ либо $\sigma_b = R_b$;

разрушения системы сцепления из условия $\beta = 1$;

расслоения элементов с образованием и развитием вторичных трещин, исходящих из вершин пионерных трещин, по условию $\sigma_z = R_{bt}$;

чрезмерного раскрытия трещин $a_{crc} = a_{crc\,ult}$.

Важно отметить, что применение такой методики впервые открывает возможность своевременного повышения экономической эффективности проектных решений путем обеспечения однородной долговечности железобетонных конструкций с синхронизацией проектного ресурса отдельных зон, элементов и частей зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никитин, С.Е.** Оценка эксплуатационных и предельных состояний, проектного и остаточного ресурсов коррозионно-поврежденных элементов с позиции блочной модели деформирования [Текст] / С.Е. Никитин, В.В. Белов // Проблемы современного бетона и железобетона: Сб. тр. в 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции / Ред.: М.Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.].— Минск: Минсктиппроект, 2009. — С. 127–138
2. **Никитин, С.Е.** Силовые и коррозионные нарушения контактной системы «арматура-бетон» [Текст] / С.Е. Никитин, В.В. Белов // Сб. науч. тр. междунар. научно-техн. конф. «Строительная наука— 2010. Теория, практика, инновации Северо-арктическому региону».— Архангельск, 2010.— С. 83–91.
3. **Maaddawy T.E.**, Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams [Текст] / T.E. Maaddawy, K. Soudki, T. Topper // ACI Structural Journal.— 2005.— Vol. 102. № 4.— P. 550–559.
4. **Mangat, P.S.** Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement [Текст] / P.S. Mangat, M.S. Elgarf // ACI Structural Journal.— 1999.— Vol. 96. № 1.— P. 149–159.
5. **Попеско, А.И.** Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии [Текст] / А.И. Попеско.— СПб.: Изд-во СПб гос. архит.-строит. ун-та, 1996.— 182 с.

УДК 621.793.74:621.365.5

Е.А. Смирнова

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ САМОФЛЮСЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ. ИДУКЦИОННОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ

Покрытия из самофлюсующихся сплавов на никелевой основе (ПГ-СР, СНГН, ПГ-12Н-01, ВСНГН), используемые в промышленности для восстановления и упрочнения деталей, имеют матрицу твердого раствора микротвердостью 3800–4500 МПа и кристаллы карбидов (карбоборидов) переменного состава микротвердостью 7000–11000 МПа. В зависимости от марки самофлюсу-

ющего порошка твердость изменяется в пределах 35–62 HRC. Износостойкость таких покрытий в оплавленном состоянии в 5,5 раз выше, чем закаленной стали 45 твердостью 52–55 HRC.

Однако покрытие, полученное в результате напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым: при соприкосновении с подложкой капля напылителя снизу за-



твердевает, а сверху растекается по затвердевшей поверхности, образуя фигуру, похожую на диск с утолщением в средней части, что приводит к образованию слоистой структуры газотермических покрытий и их пористости. В некоторых случаях это свойство можно использовать, но, как правило, требуются плотные покрытия с низким содержанием пор, в том числе для упрочнения детали и повышения износостойкости.

При затвердевании капель обычно происходит кристаллизация материала с усадкой, и покрытие находится под действием остаточных напряжений растяжения. Эти напряжения возрастают с увеличением толщины покрытия и могут вызвать его отслоение. Остаточные напряжения внутри покрытия по величине могут быть соизмеримы с прочностными характеристиками покрытия. В этой связи вопрос о величине остаточных напряжений и методах снижения их уровня имеет принципиальное значение.

Кроме того, недостатком самофлюсующихся материалов является высокое значение температурного коэффициента линейного расширения, что также приводит к возникновению существенных напряжений на границе покрытия и подложки.

Другой существенный недостаток плазменных покрытий — их относительно невысокая адгезионная прочность.

Из многих факторов, определяющих условия образования прочной адгезионной связи [1], выделим основные, на которые возможно оказать влияние с помощью последующей обработки газотермического покрытия. Наиболее значительные из них: температура в зоне контакта покрытия и основы; пористость покрытия (влияющая на эффективную площадь контакта); наличие напряжений внутри покрытия и между покрытием и основой.

Исследователи в разное время занимались поиском путей улучшения свойств покрытий, нанесенных методом газотермического напыления. Можно выделить несколько основных технологий последующей обработки детали и повышения качества покрытия: пропитку покрытий специальными составами; окрашивание; поверхностное оплавление; плазменную дуговую обработку; ультразвуковое упрочнение; вакуумный отжиг; лазерную обработку.

До сих пор ни один из перечисленных методов не позволил решить проблему в комплексе.

В большинстве случаев для обработки поверхностей используют различные технологии оплавления. Одним из наиболее простых и широко применяемых методов упрочнения покрытий служит поверхностное газо-пламенное оплавление на воздухе, при помощи ацетилен-кислородной горелки либо в газовой печи.

Результаты исследований этого метода для самофлюсующихся покрытий на основе Ni, Cr, В, Si, приведенные А.М. Шмаковым в [2], свидетельствуют о высокой эффективности тонких покрытий (до 2 мм) при малом времени выдержки (до 3 с): полученные значения пористости составляют порядка 1 %, микротвердость — 606 (HV 0,05). При увеличении времени выдержки микротвердость покрытия уменьшается. Для покрытий толщиной до 4 мм повышается средняя пористость оплавленного слоя, при малом времени выдержки до 3 с она составляет 9–11 %, что объясняется большей вязкостью расплава и невозможностью выхода пузырьков газа на свободную поверхность.

В качестве недостатка метода оплавления покрытия А.М. Шмаков приводит возможность шлакообразования на поверхности материала в случае перегрева: при газо-пламенном оплавлении, особенно в случае перегрева выше температуры плавления, наблюдается снижение твердости вследствие появления оксидных пленок бора и кремния, удаляемых в виде шлаков из объема покрытия.

К основным недостаткам термообработки оплавлением можно также отнести: сопутствующий нагрев подложки; невозможность прецизионного нагрева; сложность автоматизации процесса, что немаловажно при современном промышленном производстве.

Более эффективная модификация метода поверхностного оплавления — вакуумный отжиг изделия. Эта технология позволяет сильно уменьшить пористость покрытия и снять остаточные напряжения, благодаря чему можно повысить прочность покрытия. Уменьшение пористости наблюдается уже при 600 °С, остаточных напряжений — при 700 °С. Наибольший эффект достигается при нагреве до 1150 °С в течение 4–6 часов. Микротвердость покрытий составляет от 700 HV 0,05 при нагреве в течение 50 минут до 1846 HV 0,05 при нагреве 20 минут [2], что свидетельствует о снижении микротвердости с увеличением времени обработки.

Недостатками этого способа обработки являются дороговизна метода, длительность, а так-

же сложность применения для крупногабаритных деталей, обусловленная необходимостью вакуумной камеры. Кроме того, при всех видах оплавления, как вакуумного, так и газо-пламенного, также происходит нагрев детали, что в большинстве случаев нежелательно, поскольку может привести к изменению свойств металла вследствие отпуска либо деформации детали.

Ультразвуковая обработка может быть применена в качестве способа регулирования остаточных напряжений в плазменных покрытиях.

В.П. Безбородов в [3] предлагает использовать вибрационную обработку, аналогичную применяемой при обработке сварочных соединений, для снятия остаточных напряжений покрытия. В работе [3] приведены результаты экспериментального исследования покрытий из порошкового состава на основе никеля (10–14 % Cr, 1,7–2,5 % В, 1,3–3,2 % Si, 0,3–0,6 % С, Ni — остальное), нанесенного на цилиндрические образцы диаметром 4 см из стали 45 с помощью установки плазменно-напыления. Толщина покрытия — 1 мм, ширина пояса покрытия — 2 см. УЗО производили послойно ультразвуковым инструментом, колеблющимся с частотой 20 кГц и амплитудой 20 мкм. Результаты исследований показали, что УЗО изменяет строение и структуру покрытия. Повышается дисперсность основной фазы покрытия — твердого раствора на основе никеля, частицы деформируются и вытягиваются вдоль подложки, уровень остаточных растягивающих напряжений снижается. При усилии прижима ультразвукового инструмента $P_{\text{ст}} = 100$ Н достигается полная релаксация напряжений в покрытии толщиной 1 мм. Таким образом, использование УЗО позволяет повысить динамическую прочность деталей с покрытием, однако этот способ обработки никак не влияет на сцепление покрытия с подложкой. Авторы [3] также не упоминают о влиянии ультразвуковой обработки на пористость покрытия.

Лазерная модификация газотермических покрытий с использованием газовых CO_2 -установок — один из самых перспективных методов обработки покрытий. Основные преимущества данного вида обработки заключаются в высокой точности и возможности локального нагрева, а также в отсутствии перегрева подложки вследствие оплавления на больших скоростях за счет высокой концентрации вводимой энергии. Подробно технология лазерного модифицирования покрытий

рассмотрена у А.М. Шмакова в [2]. Приведены результаты исследований лазерной обработки покрытий из самофлюсующегося сплава ПГ12Н-02, материал подложки — порошковая сталь СП70-2. Лазерную обработку осуществляли на лазерном технологическом комплексе ЛТК ЛТ1-2М. При исследовании микроструктуры материалов, облученных с максимальной скоростью перемещения луча (минимальный энерговклад), установлено, что проплавление покрытия толщиной 0,2 мм произошло на локальных участках глубиной 150–180 мкм. Более толстые покрытия (0,6 мм) оплавлению не подвергались и сохранили исходную структуру. Отсутствуют также изменения структуры переходной зоны. При средних значениях энерговклада ($v = 4$ мм/с, $P = 700$ Вт) отмечается полное проплавление покрытия при одновременном его уплотнении, остаточная пористость 1–3%. В области контакта покрытия с основой снижена микротвердость покрытия в связи с диффузией железа из материала основы, при этом в материале основы формируется зона термического влияния малой толщины. Средний энерговклад не достаточен для формирования прочной адгезионной связи, в связи с чем образцы имеют трещины адгезионного характера. При обработке излучением лазера с максимальным энерговкладом ($v = 4$ мм/с, $P = 1200$ Вт) микроструктура образца представляет собой плотное оплавленное покрытие (пористость 1–3 %) и глубокую зону термического влияния в объеме основы (до 700 мкм), причем в переходной зоне отмечено снижение микротвердости. Однако поверхность материала характеризуется волнистостью, формирующейся в виде валика, который образуется при повторных прохождениях луча по поверхности.

При исследовании одноосного деформирования растяжением образцов стали 40Х с покрытием из самофлюсующегося сплава, оплавленного лазером, было также установлено, что зарождение микротрещин происходит на границе контакта при нагрузке 480–500 МПа (температура испытаний 400 °С), что свидетельствует о слабом воздействии лазерной обработки на сцепление покрытия с подложкой. Установлено также, что одновременно с участками, которые граничат с основой покрытий на границе «первичные кристаллы — матрица», на порах и оксидах, а также в самих первичных кристаллах зарождаются трещины. Множественное появление трещин при деформации образца свидетель-



ствуется о высоком уровне остаточных напряжений в покрытии после лазерного оплавления.

Относительно новым способом обработки является метод индукционного нагрева. Этот способ хорошо подходит для обработки деталей любых габаритов, в том числе крупногабаритных, может применяться при серийном производстве, но изделий узкой номенклатуры.

В работе [6] приводится описание и результаты исследования покрытий, обработанных с использованием установки ТВЧ непрерывно-последовательным методом с предварительным подогревом детали по следующей схеме: 1) до температуры 770–800 °С, 2) до 900–1050 °С, 3) до 1110–1150 °С. Данная схема обеспечивает выравнивание теплового поля по всей поверхности детали, гарантирует проплавление покрытия по всей глубине, уменьшает тепловые деформации. В результате исследований установлено, что износостойкость покрытий, подвергнутых индукционной термообработке, оказалась в 1,1–1,4 раза выше, чем в случае традиционного газо-пламенного оплавления.

В [4] описаны результаты исследования оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов (в частности, ПР-Н73Х16С3Р3), нанесенных на образцы-имитаторы вала из стали 40Х диаметром 50 мм, токами высокой частоты двумя способами: однопроходным — со скоростным нагревом до температуры плавления покрытия; многопроходным — с постепенным повышением температуры от прохода к проходу. Наилучшие результаты показал многопроходной способ оплавления с помощью трехвиткового индуктора.

Микроструктура покрытия, оплавленного индукционным способом, отличается более равномерным распределением высокодисперсных первичных кристаллов на основе никеля. Пористость оплавленного покрытия составила 2–4 %, микротвердость покрытия — 4730–6440 МПа.

Основное преимущество использования ТВЧ состоит в том, что индукционный нагрев позволяет производить оплавление материалов при дозированном выделении тепла в узкой зоне сцепления подложки с покрытием без существенного нагрева самой заготовки. На рис. 1 представлена эпюра распределения плотности тока внутри заготовки с покрытием. Такой характер распределения плотности тока объясняется следующим эффектом, обнаруженным еще в 60-е годы Г.И. Бабатом: при воздействии переменного электромагнитного поля на слоистую структуру с пе-

ременными свойствами электропроводности на границе раздела напряженности магнитного и электрического полей изменяются скачком, что приводит также к изменению скачком плотности тока и мощности, выделяемой в среде.

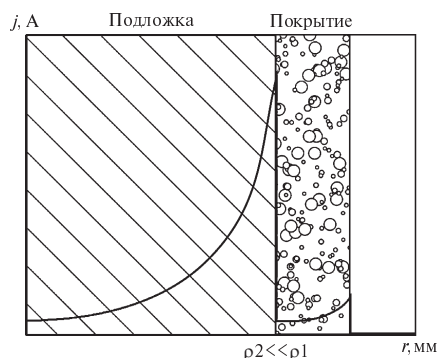
Для покрытий, нанесенных плазменным методом, удельные сопротивления покрытия и подложки могут различаться на 2–3 порядка. В этом случае данный эффект будет выражен достаточно ярко, и максимальное выделение тепла будет в граничной области между покрытием и подложкой.

Для исследования процесса индукционного нагрева заготовок с газотермическими покрытиями были использованы численные методы решения электромагнитной и тепловой задач, основанные, в частности, на методе контрольного объема [7]. В результате были получены для расчетной области в процессе нагрева распределения различных величин — температуры, электрического и магнитного полей, плотности электрического тока, на основе которых могут быть выбраны режимы для последующего экспериментального исследования.

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

Индукционное оплавление имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с технологиями отжига и поверхностного плавления, ультразвуковой и лазерной обработки; данная технология позволяет значительно увеличить износостойкость покрытия при высокой производительности и низком значении глубины термического влияния.

Разработана электротехнология ускоренного индукционного оплавления самофлюсующихся покрытий, нанесенных плазменным напылением, которая позволяет повысить ресурс



Радialное распределение плотности тока в заготовке с покрытием

работы детали: возрастает твердость нанесенного покрытия за счет снижения его пористости, увеличивается адгезия между покрытием и подложкой. Математическое моделирование позво-

ляет выбрать наиболее эффективный диапазон параметров электротехнологического оборудования для дальнейшего исследования на экспериментальной установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабушкин, Г.А.** Диффузионно-кинетический механизм сцепления порошкового покрытия с подложкой [Текст] / Г.А. Бабушкин, В.Я. Буланов, Л.В. Соловьев // ЖТФ.— 1983.— Т. 53, вып. 3.— С. 554–556.
2. **Шмаков, А.М.** Проблемы порошкового материаловедения. Часть 4. Плазменно-лазерные покрытия [Текст] / А.М. Шмаков, В.Н. Анциферов, В.Я. Буланов, А.М. Ханов // Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006.— ISBN 5-7691-1596-3.
3. **Безбородов, В.П.** Влияние ультразвуковой обработки на напряженное состояние газотермических покрытий из никелевых сплавов [Текст] / В.П. Безбородов, Е.А. Ковалевский // Физика и химия обработки материалов.— 2001. № 1.— С. 67–69.
4. **Глебова, М.А.** Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучем [Текст] / М.А. Глебова, А.Б. Корнев, В.В. Глебов, Е.К. Березин // Сварочное производство.— 2004. № 6.— С. 43–46.
5. **Спиридонов, Н.В.** Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин [Текст] / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов; Под ред. В.Н. Чачина.— Минск : Вышэйш. шк., 1988.
6. **Фролов, Н.Н.** Газотермические износостойкие покрытия в машиностроении [Текст] / Н.Н. Фролов.— М.: Машиностроение, 1992.— 255 с.
7. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазмотронов Ч.2: Электромагнитные задачи в плазмотронной технике [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов.— СПб: Изд-во Политехнического университета, 2006.— 296 с.

УДК 504.064.3

А.Ю. Туманов

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОСФЕРЫ И ЗАЩИТЫ ОТ УГРОЗ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Согласно концепции теории безопасности, выработанной ООН, основным показателем безопасности в настоящее время принята продолжительность жизни человека, выраженная в количестве лет. Для разных стран в зависимости от уровня текущей безопасности средняя продолжительность жизни человека сильно различается и составляет от 40 до 90 лет. Однако было замечено, что заметное повышение продолжительности жизни в так называемых «цивилизованных» странах обернулось понижением этого показателя в ряде стран, в том числе в России. Причин такого положения несколько, но во многом это объясняется отсутствием в нашей стране системы предвидения и предотвращения опасных ситуаций, связанной с тем, что основное внимание и финансирование в настоящее время идет на устранение последствий чрезвычайной ситуации. Идет борьба с последствиями, а не с причинами чрезвычайных ситуаций, о чем наглядно свидетельствует деятельность МЧС.

Подавляющее большинство работ как научного, так и прикладного характера в этой области концентрируется на вопросах защиты при наступлении ЧС, борьбе с проявлениями происшествия, аварии или катастрофы, а не на вопросах предотвращения (прогнозировании, то есть предвидении) этих явлений. Прогнозирование с точки зрения системного подхода и теории управления — одна из функций при принятии управленческих решений в условиях неопределенности внешней и внутренней среды и множества факторов, влияющих на объект прогнозирования.

Цель прогнозирования техногенных чрезвычайных ситуаций состоит в заблаговременном

получении качественной и количественной информации о возможном времени и месте техногенных чрезвычайных ситуаций, характере и степени связанных с ними опасностей для населения и территорий и в оценке их возможных социально-экономических последствий.

Для достижения указанной цели при прогнозировании решается ряд основных задач, которые предполагают следующее:

- выявление и идентификацию потенциально опасных зон с возможными источниками чрезвычайных ситуаций техногенного характера;

- разработку возможных вариантов возникновения и развития чрезвычайной ситуации, моделирование развития ЧС;

- оценку вероятности возникновения чрезвычайной ситуации по различным сценариям;

- моделирование параметров полей поражающих факторов возможных источников чрезвычайной ситуации;

- прогнозирование обстановки (инженерная, пожарная, медицинская и др.) в районе возможной ЧС с целью планирования контрмер и необходимых сил и средств для проведения защитных мероприятий и ликвидации чрезвычайной ситуации;

- прогнозирование и оценку возможных социально-экономических и экологических последствий (потери, ущерб);

- оценку параметров (показателей) риска и построение карт (полей) риска.

Цель выполнения работы состоит в исследовании моделей представления знаний для автоматизированной информационно-управленческой системы безопасности объектов энергетики (АИУСБОО), что является одной из составля-

ющих разработки теоретических моделей для прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий аварий на атомных электростанциях (АЭС), гидроэлектростанциях (ГЭС), предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Компоненты информационного обеспечения должны отображать предметную область АИУС-БОЭ, в том числе: территориальные образования (включая проживающее там население); объекты экономики (в первую очередь потенциально опасные объекты); окружающую среду (атмосферу, акватории, земную поверхность, недра); органы и системы управления; мероприятия по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций; силы и средства предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций; материально-технические, продовольственные, медицинские и другие ресурсы; статистику чрезвычайных ситуаций.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие *основные задачи*:

1) проведение анализа и декомпозиции опасного объекта, например ТЭЦ, с целью выявления опасных устройств и способов производства (технологий) и «узких мест», на которых с некоторой долей вероятности могут быть неисправности или произойти происшествия либо аварии;

2) разработка модели представления знаний для АИУСБОЭ.

Объектом исследования является опасный объект энергетики (ООЭ). Такой объект, как правило, имеет сложную структуру и может состоять из совокупности отдельных элементов — опасных устройств и опасных способов. Под опасными устройствами ООЭ могут пониматься агрегаты и отдельные элементы, в которых есть опасные вещества (цистерны, трубопроводы, ресиверы, резервуары, бойлеры и др.).

Для поддержки принятия решений в области безопасности, повышения эффективности этого процесса, а также достоверности результатов целесообразно использовать возможности современных информационных технологий для разработки информационно-управленческой системы безопасности в чрезвычайных ситуациях, включающей в себя оценку риска опасных объектов.

Модели представления знаний в экспертной системе

Для поддержки принятия решений на этапе идентификации опасностей промышленных объектов, то есть для определения перечня опасных устройств и возможных сценариев развития аварий, и для решения слабоструктурируемой задачи оценки риска предлагается создать и применить экспертную систему (ЭС) на основе базы знаний факторов опасности (риска).

Дадим краткое описание простой ЭС, использующей байесовскую систему логического вывода. Она предназначена для проведения консультации с пользователем с целью определения вероятностей возможных исходов и использует для этого оценку правдоподобности некоторых предпосылок, получаемую от пользователя. ЭС в данном случае выступает в роли эксперта, который задает уточняющие вопросы пользователю относительно факторов риска и на основе полученных дополнительных сведений выдает результат консультации. Причем следует минимизировать количество задаваемых вопросов, для этого желательно выявить и задавать самые важные вопросы, от ответа на которые в большей степени зависит окончательное установление результата. Именно так и поступает данная ЭС. Она запрашивает у пользователя оценку истинности самого важного *свидетельства*, на основе ответа корректирует вероятности *исходов* и переходит к следующему свидетельству, выбрав снова самое актуальное. Таким образом, достигается наискорейшее получение результата при минимальном количестве запросов.

Использование байесовской системы логического вывода означает, что информация, обрабатываемая ЭС, не является абсолютно точной, а носит вероятностный характер. Пользователь не обязательно должен быть уверен в абсолютной истинности или ложности свидетельства, он может отвечать на запросы системы с какой-то степенью уверенности. В свою очередь ЭС выдает результаты консультации в виде *вероятностей* наступления исходов. Под исходами в зависимости от настроек ЭС могут пониматься опасности, причины опасностей (факторы риска), сценарии развития аварий на опасном объекте и др.

ЭС представлена в виде компьютерной программы, которая и проводит консультацию.

На рис. 1 показан фрагмент байесовского логического вывода, в котором свидетельство (вопросы уточняющего характера) — E_i , а исходы (факторы риска) — C_j . Величина апостериорной вероятности по этапу жизненного цикла проекта $P(C)$ находится как произведение вероятностей исходов, если эти факторы статистически независимы.

Рассмотрим, как в ЭС представлены результаты консультации. Цель консультации — определение *апостериорных вероятностей возможных исходов*. Список исходов с указанием текущих значений вероятностей показан в левой части верхней половины окна программы. Ширину этой области можно увеличить или уменьшить, передвинув разделитель, отделяющий ее от области обработанных свидетельств.

Для более удобного представления результатов их можно упорядочить либо по названиям исходов (в алфавитном порядке), либо по значениям текущих вероятностей. Вероятности исходов могут быть выражены в процентах. Здесь же можно сделать выбор относительно классификации результатов на существенные и несущественные (выделение цветом).

Имеется возможность следить за вероятностью конкретного исхода, если выделить его в списке, — теперь он всегда будет виден в окне (при этом результаты должны быть упорядочены в алфавитном порядке). Если же результаты упо-

рядочены по вероятностям, то можно выбрать нижнюю строку списка, чтобы в поле зрения всегда был наименее вероятный исход (фактор риска ИП).

После того, как будет обработано последнее значимое свидетельство, ЭС подведет итог, и вероятности исходов в списке результатов примут окончательные значения. Теперь вы можете сделать вывод о возможности наступления интересующего вас исхода или просто прочесть название наиболее вероятного из возможных исходов. Кроме того, экспертная система выдает результаты консультации в виде столбчатой диаграммы, что позволяет наглядно показать ключевые факторы риска ($P_i(H_k|_A) > P_{iкр}$).

В случае с ООЭ необходимо узнать какова вероятность возникновения и наступления того или иного исхода при изучении влияния того или иного фактора риска на опасный объект. Кроме того, для выяснения вероятностей наступления того или иного исхода, в данном случае фактора риска, мы можем оценить влияние этих факторов в разных условиях. Для этого пользователи могут провести консультации с ЭС и на основе полученных результатов оценить ключевые факторы риска, после чего сделать предварительные выводы о безопасности объекта энергетики. Применение ЭС автоматизирует и укорачивает процесс выявления влияния факторов риска на ООЭ и производит их ранжирование соответ-

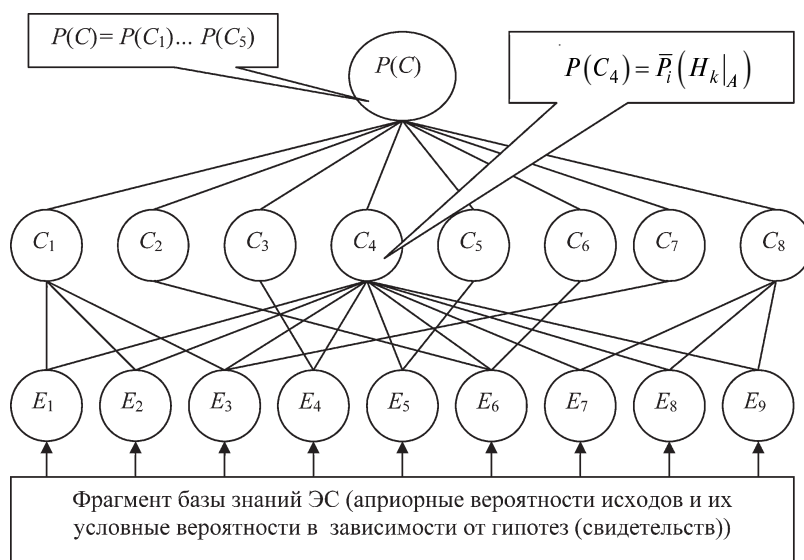


Рис. 1. Фрагмент байесовского логического вывода для ЭС

ственно их вероятности и важности по величине предполагаемых потерь от их реализации. При этом выявляются ключевые факторы риска.

Наибольшую сложность при разработке ЭС вызвало создание базы знаний (БЗ) ЭС на основе классификатора факторов риска объекта и присвоение факторам риска величин априорных вероятностей и условных вероятностей в зависимости от степени уверенности в том или ином утверждении. При этом надо отметить следующее обстоятельство. Условные вероятности наступления того или иного элементарного события (фактора риска инновационного проекта), задаваемые как величины P_y, P_n служат основанием для проведения расчета апостериорной вероятности наступления нежелательного события согласно теореме Байеса.

Ниже приведено описание базы знаний опасностей и факторов риска ООЭ. Для подтверждения обоснованности предложенной базы знаний было проведено тестирование ЭС на нескольких опасных объектах, из чего было сделано заключение о возможности применения БЗ в оценке других опасных объектов энергетики. Конечно, БЗ не лишена определенных недостатков и, безусловно, следует проводить работу по ее улучшению по мере использования для большого числа опасных объектов, что даст необходимые статистические данные. Но и в первоначально созданном виде БЗ и использование ее для определения вероятностей факторов риска и сценариев происшествий является мощным средством, качественной и необходимой предпосылкой создания информационно-управленческой системы безопасности опасных объектов энергетики.

Описание базы знаний опасностей объекта энергетики

База знаний представляет собой текстовый файл, включающий три блока.

Первый блок содержит описание БЗ, имя автора, комментарий и т. п. (можно в несколько строк, общая длина которых не должна превышать 10000 символов; данная секция заканчивается после первой пустой строки).

Второй блок содержит ряд уточняющих вопросов (свидетельств), расположенных в следующем виде:

свидетельство № 0 (любой текст (не более 1000 символов), заканчивающийся переносом строки);

свидетельство № 1;

свидетельство № 2;

.....

свидетельство № N (после последнего свидетельства следует одна пустая строка, и второй блок заканчивается).

Вопросник с уточняющими вопросами был составлен на основе базового перечня опасностей, опасных ситуаций и событий по ГОСТ Р 51344–99, который содержит исчерпывающие данные по различным видам опасностей.

Третий блок содержит *правила вывода*, расположенные в следующем порядке:

исход № 0, $P[i, P_y, P_n]$;

исход № 1, $P[i, P_y, P_n]$;

исход № 2, $P[i, P_y, P_n]$;

.....

исход № M , $P[i, P_y, P_n]$.

Смысл первых двух блоков БЗ факторов риска вполне понятен. Третий блок требует более подробного рассмотрения. В нем перечисляются правила вывода: каждое задается в отдельной строке; перечисление заканчивается с концом файла. В начале описания правила вывода задается исход, вероятность которого меняется в соответствии с данным правилом. Это текст, включающий любые символы, кроме запятых. После запятой указывается априорная вероятность данного исхода $P = P(H_k)$, т. е. вероятность исхода в случае отсутствия дополнительной информации. После этого через запятую идет ряд повторяющихся полей из трех элементов. Первый элемент i — это номер соответствующего вопроса (свидетельства). Следующие два элемента

$P_y = P(A|H_1)$ и $P_n = P(A|H_2)$ — условные вероятности получения ответа «Да» на этот вопрос, если возможный исход соответственно верен или неверен.

Или, если сформулировать по-другому: факторы риска (исходы) проявляются, приводя к неблагоприятным последствиям с вероятностью $P = P(H_k)$. Предлагается система вопросов (свидетельств), при ответе на которые пользователи отвечают «Да» для проявляющихся факторов

риска с условной вероятностью $P_y = P(A|H_1)$, а для факторов риска которые не приводят к не-



благоприятным последствиям с условной вероятностью $P_{\Pi} = P(A|_{H_2})$. Необходимо определить, какова вероятность того, что фактор риска с учетом ответа на вопросы проявится и приведет к неблагоприятным последствиям для инновационного проекта. Событие A заключается в том, что случайно выбранный фактор риска проекта, срабатывая, приводит к неблагоприятным последствиям, и пусть H_1 — событие, состоящее в том, что пользователь ответит на вопрос (свидетельство) «да» при условии что событие A произойдет; а событие H_2 противоположно событию H_1 и состоит в том, что пользователь ответит «да», если событие A не произойдет. Можно записать, что

$$P(H_2) = 1 - P(H_1). \quad (1)$$

Для получения достоверных величин априорных вероятностей необходимо провести статистическое исследование или провести качественный анализ с привлечением экспертов, чтобы установить обоснованные значения для этих вероятностей.

Значения $P_y = P(A|_{H_1})$ и $P_{\Pi} = P(A|_{H_2})$, подставленные в формулу Байеса, позволяют вычислить апостериорную вероятность исхода, т. е. *вероятность, скорректированную в соответствии с ответом пользователя на данный вопрос*:

$$P(H_k|_A) = \frac{P(H_k)P(A|_{H_k})}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A|_{H_i})}, \quad (2)$$

где $P(H_k|_A)$ — апостериорная вероятность события (гипотезы) проявления фактора риска при условии, что событие A произошло; $P(H_k)$ — априорная вероятность при отсутствии дополнительной информации.

Для частного случая H_1 формулу Байеса можно записать в следующем виде:

$$P(H_1|_A) = \frac{P(H_1)P(A|_{H_1})}{\sum_{i=1}^2 P(H_i)P(A|_{H_i})}. \quad (3)$$

Преобразуя его, имеем при H_1

$$P(H_1|_A) = \frac{P(H_1)P(A|_{H_1})}{\sum_{i=1}^2 P(H_i)P(A|_{H_i})} = \frac{P(H_1)P(A|_{H_1})}{P(H_1)P(A|_{H_1}) + P(H_2)P(A|_{H_2})}, \quad (4)$$

или, если записать $P(H_2) = 1 - P(H_1)$, то уравнение приобретает вид

$$P(H_1|_A) = \frac{P(H_1)P(A|_{H_1})}{(P(H_1)P(A|_{H_1}) + P(A|_{H_2})(1 - P(H_1)))}. \quad (5)$$

Получена вероятность $P(H_1|_A)$ гипотезы H_1 при условии, что дан ответ «да» и событие A произошло. Таким же образом можно получить вероятность события $H_2|_A$.

Вероятность осуществления некой гипотезы H при наличии определенных подтверждающих свидетельств события A вычисляется на основе априорной вероятности этой гипотезы без подтверждающих свидетельств и вероятностей осуществления свидетельств при условиях, что гипотеза верна или неверна по отношению к событию A .

Желательно не указывать P_y и P_{Π} равными друг другу, так как это означает, что данное свидетельство не влияет на вероятность исхода.

Создание БЗ и присвоение априорных вероятностей решается достаточно просто в случае небольшого количества исходов. Однако если возможных исходов достаточно много, то значительно более простым решением является присвоение вероятности P_{Π} каждого свидетельства значения 0,5. Это означает, что если гипотеза о наступлении данного исхода неверна, то ответ на вопрос, соответствующий свидетельству, не определен. Конечно, этот упрощенный метод дает менее четкие результаты, зато экономит время при создании базы знаний. В этом случае однозначные ответы уже не приводят к абсолютно четким результатам.

Если не все возможные исходы известны эксперту, в случаях, когда нельзя сразу перечислить

все факторы, которые могут вызвать риск аварии, базу знаний следует создавать по другому принципу. В этом случае априорные вероятности исходов находят путем статистических исследований или указывают их примерные значения, кажущиеся правдоподобными эксперту, т. к. вычислить их — невозможно.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма определения апостериорных вероятностей в ЭС.

Если переходить к адаптации предложенных алгоритмов для обеспечения процессов оценки безопасности опасных объектов в энергетике, необходимо учитывать следующее. При состав-

лении базы знаний используются представления разработчика о том или ином опасном объекте, технологических процессах, происходящих на нем, физико-химических свойствах опасных веществ и др. При этом анализируются сведения об имевших место авариях, путях их протекания на аналогичных реальных промышленных объектах. Вся эта информация носит ярко выраженный характер знаний. Таким образом, логично было предложить применять базы знаний для объединения имеющихся сведений и разработки системы поддержки принятия решений. База знаний содержит описание предметной области

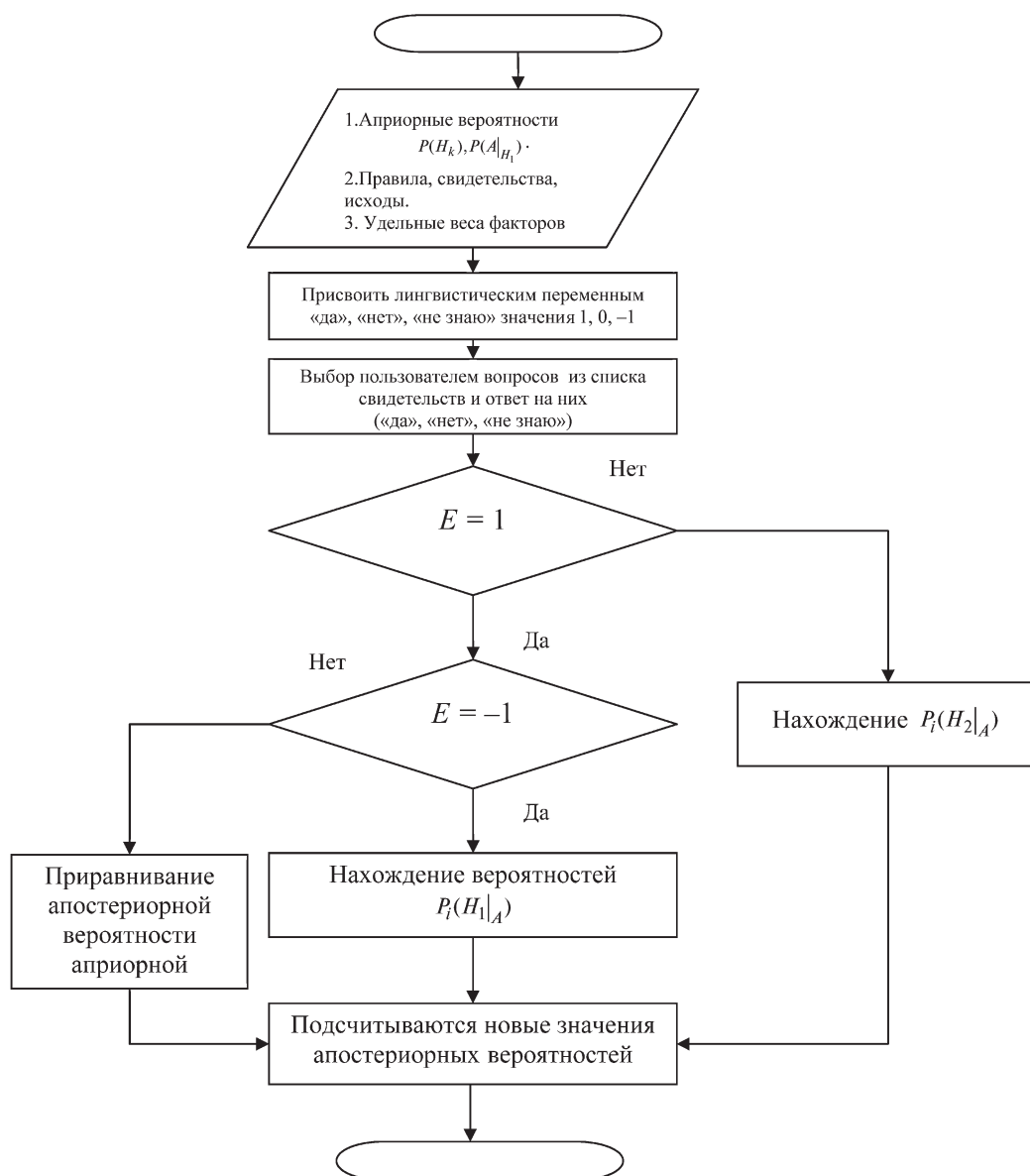


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения апостериорных вероятностей в ЭС



и представляет концептуальный уровень информации в системе, необходимый для интеграции источников данных и организации содержательного поиска в них. Модели представления знаний можно классифицировать следующим образом [1]: 1) продукционные модели; 2) семантические сети; 3) фреймы; 4) формальные логические модели.

Анализ предметной области и существующих моделей представления знаний показал, что для решения поставленных задач хорошо подходит продукционная модель. Основой для построения базы знаний станут разработанные «деревья событий» для анализа возможных путей развития аварий на различных промышленных объектах. Для разработки прототипа базы знаний (и дальнейшей реализации в экспертной системе) были взяты одни из наиболее часто встречающихся промышленных объектов: городские ТЭЦ. Проанализированы нормативные до-

кументы, паспорта безопасности аналогичных объектов. Согласно этому в работе [2] были выделены атрибуты опасного объекта, которые они могут принимать (табл. 1), а также сценарии развития аварии (табл. 2).

Состав и структура модели представления данных. Модель содержит одну *сущность* — «Опасный объект в энергетике». Обобщение *атрибутов*. Исходные атрибуты, отражающие информацию о вызове, обобщены в повторяющийся *агрегат* «Опасный объект» с атрибутами «Тип объекта», «Признаки опасности», «Границы объекта», «Общие сведения», «Конструктивные особенности», «Район размещения». Отдельными *экземплярами* сущностей и типов сущностей являются «Площадка главного корпуса ЭЦ (ГРЭС)», «Котельная», «Цех (участок, площадка) организации», «Участок трубопроводов теплосети».

По сравнению с БЗ, представленными в [3, 1] создаваемая модель представления знаний

Таблица 1

Информационное обеспечение функции 1
БД «Ведение учета опасных объектов» в терминологии моделирования БД

Экземпляр сущности	Атрибут	Описание атрибута
1. Площадка главного корпуса ЭЦ (ГРЭС). 2. Котельная. 3. Цех (участок, площадка) организации. 4. Участок трубопроводов теплосети	Тип объекта	3.1 — объект с опасными веществами в количестве, равном или превышающем предельное количество согласно ФЗ-116; 3.2 — объект с опасными веществами в количестве, меньшем предельного количества согласно ФЗ-116; 3.3 — не относящийся к объектам типа 3.1 и 3.2, но обладающий признаками опасности 2.1–2.5
	Признаки внутренней опасности	2.1 — получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества; 2.2 — используется оборудование, работающее под избыточным давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С; 2.3 — стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры; 2.4 — получают расплавы и сплавы черных и цветных металлов; 2.5 — ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых и работы в подземных условиях
	Границы объекта	Границы опасной зоны
	Общие сведения	Наименование, год ввода в эксплуатацию, ландшафт, географические координаты
	Конструктивные особенности	Конструкция стен, перекрытий, отдельных опор, фундаментов
	Район размещения	Сейсмоданные, метеоданные, население
	Внешние воздействия	Пожары, землетрясения, затопления

Таблица 2

Фрагмент перечня сценариев развития аварии на ООЭ со сравнением методических концепций оценки вероятностей неблагоприятных событий

Номер сценария	Аспект сравнения методик	Особенности методики оценки вероятности аварии		
		Существующая методика оценки вероятности	Предложенная автором методика оценки вероятности по этапам развития аварии и стратификации причин ее возникновения для каждого этапа	
			Особенности методики в указанном аспекте	Сущность способа оценки вероятности
1	Принятые в сценарии этапы развития аварии	Частичная разгерметизация (утечка газа в месте фланцевого соединения) газопровода в помещении ГРП → мгновенное взрывное воспламенение газа в помещении → воздействие ударной волны	1 этап: частичная разгерметизация (утечка газа в месте фланцевого соединения) газопровода в помещении ГРП → 2 этап: мгновенное взрывное воспламенение газа в помещении → 3 этап: воздействие ударной волны → 4 этап: последствия для сооружений и человека	Отдельный расчет вероятностей с детальным факторным анализом причин для каждого этапа с ранжированием причин по величине их проявления на опасном объекте. Задаются априорная вероятность каждой причины и условная вероятность гипотез с учетом дополнительных свидетельств того, произойдет неблагоприятное событие или нет, согласно байесовскому подходу. Изменение априорных вероятностей происходит после изучения свидетельств, т. е. получения дополнительных данных об объекте путем ответа ЛПР на ряд вопросов. Это дает более достоверные данные, т. к. они актуальны именно для данного уникального изучаемого объекта, а не для абстрактного
	Вероятность реализации	$9,8 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$ (статистика)	Расчетная величина вероятности в виде аддитивной свертки показателей	Общая вероятность неблагоприятного события: число от 0 до 1 (экспертиза + расчет по формулам Байеса)
	Принятая модель расчета	Взрыв ТВС, взрыв парогазовых сред, а также твердых и жидких неустойчивых соединений	Взрыв ТВС, взрыв парогазовых сред, а также твердых и жидких неустойчивых соединений	Модель расчета служит основой для создания программного модуля расчета опасностей и угроз, а также последствий аварии
2	Принятые в сценарии этапы развития аварии	Полная разгерметизация (прорыв) трубопровода при перекачке серной кислоты → пролив жидкого продукта на подстилающую поверхность → испарение пролива, образование вторичного облака → распространение аммиачного облака по территории → токсическое воздействие	Четко выделяются этапы развития аварии, как и в первом сценарии	Отдельный расчет вероятностей с детальным факторным анализом причин для каждого этапа и ранжированием причин по величине их проявления на опасном объекте (см. первый сценарий)
	Вероятность реализации	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$	Расчетная величина вероятности в виде аддитивной свертки показателей	Общая вероятность неблагоприятного события: число от 0 до 1 (экспертиза + расчет по формулам Байеса)
	Модель расчета	Заражение СДЯВ при аварии на химически опасных объектах	Заражение СДЯВ при аварии на химически опасных объектах	Модель расчета служит основой для создания программного модуля расчета опасностей и угроз, а также последствий аварии



претерпела значительные изменения. В предложенном варианте заключения правил — это не только факторы опасности (риска) с апостериорными вероятностями их проявления в зависимости от реальной обстановки на объекте, но и сценарии развития возможных аварий на промышленных объектах с указанием вероятности их реализации и названием методики дальнейших расчетов параметров поражающих факторов. Это существенно улучшает модель, позволяя прогнозировать развитие аварии по ряду сценариев, а само исходное событие — зарождение и течение аварии — стратифицировать по элементам опасного объекта и по этапам развития аварии. Достоверность модели повышается, так как становится возможным охватить множество факторов риска, рассматривая опасный объект как многоуровневую структуру элементов. Каждый из этих элементов также подлежит дальнейшей декомпозиции. Это согласуется с основным философским принципом конкретности истины, заключающимся в последовательном и планомерном детализированном изучении явлений окружающего мира.

Определенную трудность представляет установление самой вероятности возникновения исходных (инициирующих) событий, которые приводят к аварии. Существует несколько подходов к ее разрешению. В работе [1] вероятность возникновения аварии предлагается определять на основании имеющихся статистических данных об отказах оборудования и частоте возникновения аварийных ситуаций при его эксплуатации совместно с применением метода экспертного оценивания по аналогичным объектам. В работе описан способ определения априорной частоты (не вероятности) неблагоприятных событий. Приводим его здесь в авторской редакции: «Допустим, известно, что по статистике частота (вероятность) разгерметизации резервуара — $1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Чтобы значение более соответствовало данному опасному объекту, проводится экспертная оценка следующим образом. Составляется опросный лист для работников предприятия. Листы раздаются начальникам, мастерам, рабочим. При этом экспертами уже присвоены числовые значения (вес) каждому пункту. Учитывается также процент износа агрегатов, соблюдение графика техобслуживания, ремонта оборудования». Вызывает сомнение, что указан-

ные лица смогут оперировать величинами частоты неблагоприятного события, которое может произойти один раз в десять или в сто тысяч лет. Такое событие воспринимается как совершенно невозможное, и объяснить персоналу, что надо готовиться к его наступлению, также затруднительно. Этим объясняется поразительное фатальное бездействие по отношению к таким событиям.

Кроме того, даже у специалистов есть непонимание того, что частота не тождественна понятию вероятность. Рассмотрим эти понятия. По определению частота проявления того или иного неблагоприятного события рассчитывается статистически на основе анализа прошлых событий. Экспертная же оценка вероятности проявления события производится до наступления происшествия или аварии. В этом принципиальная разница между частотой и вероятностью. Из основ теории вероятности известно, что вероятность — это число, показывающее степень возможности наступления неблагоприятного события, которое измеряется в пределах от нуля до единицы.

Исходя из этого и будем исследовать способы получения априорных вероятностей. Допущение большинства авторов об известности и неизменности частот или вероятностей исходных событий применительно к конкретному уникальному опасному объекту исследования безопасности, да еще с достаточно большой точностью, более чем спорно.

В качестве научного предположения (гипотезы) автор предлагает экспертный способ назначения точечных или интервальных вероятностей (не частот) с последующей корректировкой в рамках байесовского подхода и адаптацию этих способов для теории безопасности. Обоснование правомерности такого способа — одна из задач исследования, и это трудная задача.

В работе [3] обосновывается лингвистическое представление вероятностей неблагоприятных событий с последующим переводом в численный формат, а также представление вероятностей в виде треугольных чисел на основе теории нечетких множеств. Темой для дальнейших исследований должно стать решение проблемы оценки достоверных априорных и условных вероятностей того, что та или иная внутренняя или внешняя причина (фактор риска) является определяющей по влиянию на опасный объект.

Программное обеспечение экспертной системы

Экспертные системы в зависимости от назначения подразделяются на несколько видов. Для случая идентификации факторов риска и оценки апостериорных вероятностей риска рекомендуется создать собственную *идентификационно-диагностическую экспертную систему* с машиной логического вывода вероятностного типа (байесовская система) и базу знаний по оценке безопасности объектов энергетики, реализуемую в виде компьютерной программы.

Было принято решение о разработке специализированного для данной ЭС программного обеспечения. В нашем случае привлекался сторонний специалист для создания оболочки специализированной ЭС в области оценки риска. Взаимодействие с программистом — это тема отдельного исследования в области управления групповой работой.

Апробация и проверка на адекватность модели представления знаний по идентификации опасных объектов в энергетике

Проверить предложенную и построенную модель представления данных на адекватность, т. е. соответствие реальным процессам, которые происходят на опасном объекте, можно, проведя вычислительный эксперимент в программе, разработанной на основе модели, и сравнивая полученные результаты с результатами и последствиями аварии на аналогичном объекте в ретроспективном плане. Если аналогичный объект не найти (а как правило, аварии на сложных опасных объектах происходят довольно редко, но с тяжелыми последствиями), то соответствие модели проверяют другими способами. Результаты критически интерпретируют и ана-

лизируют на предмет соответствия элементарному здравому смыслу. Если после устранения явных и легко обнаружимых логических ошибок модели результаты противоречат здравому смыслу, то надо вернуться к предыдущим этапам построения модели.

Разработаны модели представления знаний для поддержки принятия решений при создании автоматизированной информационно-управленческой системы безопасности объектов энергетики (АИУСБОЭ). Они являются одной из составляющих теоретических моделей для прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий аварий на атомных электростанциях, гидроэлектростанциях, предприятиях топливно-энергетического комплекса и отличаются тем, что основаны на применении продукционных правил вывода для данной предметной области с машиной логического вывода вероятностного типа (байесовская система). Такие модели составляют основу для разработки соответствующего алгоритмического обеспечения поддержки принятия решений на этапах выявления опасностей и определения возможных сценариев развития аварий на опасных объектах энергетики.

Разработан исследовательский прототип экспертной системы поддержки принятия решений на этапе идентификации опасностей опасного объекта, позволяющий проводить вычислительные эксперименты по реализации сценариев развития аварии на опасных объектах. Прототип создан на основе разработанной модели представления базы знаний об источниках опасностей, угрозах, возможных сценариях развития аварий и реализован в специализированной оболочке на базе программной платформы «ДЕЛЬФИ-6».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсупова, Н.И. Модели представления знаний для идентификации опасностей промышленного объекта [Текст] / Н.И. Юсупова, Г.Р. Шахметова, К.Р. Еникеева // Вестник УГАТУ.— №1 (28).— С. 91–100.
2. Туманов, А.Ю. Концептуальные модели базы данных опасных объектов, источников опасности и факторов риска информационно-управленческой системы прогнозирования техногенных и природных катастроф в энергетике [Текст] /

А.Ю. Туманов // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы международной конференции (17–18 февраля 2011 года), Т. 3.— СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 139–146.

3. Туманов, А.Ю. Экономика и финансовое обеспечение инновационной деятельности. Количественная оценка риска инновационного проекта [Текст]: учеб. пособие / А.Ю. Туманов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 195 с.



УДК 614.84

С.Н. Терехин, А.В. Балов, А.Г. Филиппов

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ МЧС РОССИИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Современный этап информатизации МЧС должен базироваться на передовых технологиях и телекоммуникационных сетях, соединяющих в единое целое совокупность разнородных вычислительных средств, ЛВС, удаленных и местных терминалов. В связи с этим на первый план выходит проблема создания единого информационного пространства (ЕИП) МЧС как неотъемлемой части ЕИП РФ, использование которого может обеспечить существенное повышение качества информационной поддержки процессов управления во всех областях деятельности МЧС.

Актуальность разработки Единого информационного пространства МЧС обусловлена повышением требований к качественным параметрам системы управления.

Есть ряд задач, выполнение которых осуществляется в закрытых помещениях, требует навигационной поддержки, но прием сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в этих условиях проблематичен, а порой и невозможен. Примером может служить навигационное обеспечение на крупных объектах действий пожарных расчетов, отслеживание спасателей внутри зданий в чрезвычайных условиях, решение задач транспортной логистики. В данных обстоятельствах для обеспечения навигационной поддержки необходимо наличие мобильных средств, функционально дополняющих ГНСС. Одним из перспективных вариантов подобного дополнения могут служить псевдоспутники (ПС), интегрированные в единую систему. Преимущества от использования ПС заключаются в следующем: они могут быть оперативно развернуты в непосредственной близости от зоны навигационного обеспечения; выбор частоты излучения может быть осуществлен с учетом конкретной ситуации; низкая стоимость допускает использование нескольких ПС

в общей структуре системы; высокая автономность и автоматизация функционирования; мощность сигнала может варьироваться.

Используя перечисленные достоинства, можно значительно повысить точность навигационного обеспечения потребителей, находящихся в сложной окружающей обстановке. Однако, несмотря на указанные преимущества, имеется и ряд недостатков: геометрия окружающей местности может наложить определенные ограничения на расположение ПС; в зависимости от природы окружающей обстановки могут быть ограничения на частоту излучения сигналов; число используемых ПС непосредственно влияет на стоимость всей системы; решение трехкоординатной навигационной задачи требует выноса одного из ПС по вертикали вверх (или вниз) относительно расположения остальных псевдоспутников; потенциальная близость между приемником и ПС может потребовать использования приемников со значительным динамическим диапазоном.

В зависимости от решаемых задач к системам позиционирования в закрытых помещениях предъявляются различные требования. В качестве примера рассмотрим систему, ориентированную на обслуживание пожарного подразделения, действующего в горящем здании.

В сценарии опасной ситуации может отсутствовать план здания, ограничена из-за задымленности видимость, а местоположение людей и оборудования может изменяться. В дополнение к этому ограниченные запасы воздуха у пожарных и потенциально заблокированные пути эвакуации переводят ситуацию в чрезвычайно опасную. В подобных условиях система позиционирования с точки зрения безопасности пожарных должна иметь следующие характеристики:

компактность — любое снаряжение, носимое пожарным, должно быть достаточно малогаба-

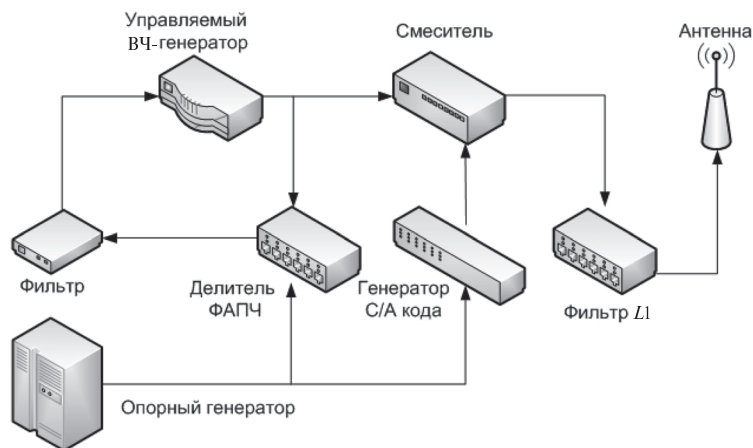


Рис. 1. Блок-схема Псевдоспутника

ритным, чтобы не служить помехой в реализации основной деятельности. Более того, оно должно быть достаточно надежным в экстремальных условиях;

гибкость — система должна быть функциональной в ситуациях, когда отсутствует план здания, а вход в него может осуществляться помимо дверей и окон;

связь — местоположение, состояние здоровья и информация о сложившейся ситуации может передаваться как к пожарному, так и от него;

точность — она должна быть такова, чтобы индивидуальный пользователь мог быть локализован в условиях нулевой видимости;

надежность — система должна быть достаточно надежной, чтобы пожарные были готовы доверить ей свою безопасность.

простота — система должна быть проста в использовании в сложных условиях.

Перечисленные характеристики образуют минимальное число требований к системе, предназначенной для функционирования в экстремальных условиях горящего здания. В подобных условиях накладываются жесткие ограничения на время нахождения пожарного внутри здания, обусловленные запасами воздуха и возрастающей интенсивностью огня и задымленности. Дополнительные требования к системе обусловлены возможным полным или частичным разрушением здания, что может привести к блокированию путей эвакуации.

Технические средства позиционирования, используемые в настоящее время подразделениями МЧС при выполнении свойственных им задач внутри зданий и сооружений в условиях за-

дымлений и разрушений, указанные выше требования в полном объеме не выполняют.

Одно из характерных отличий систем позиционирования с ПС от ГНСС состоит в том, что в спутниках, используемых для местопределения на открытом пространстве, применяют внутренний атомный стандарт частоты, который весьма стабилен, но и чрезвычайно дорогостоящий. По этой причине в ПС применяется не атомный стандарт, а эталоны на основе кристаллического осциллятора с температурной компенсацией (Temperature Compensated Crystal Oscillator — TCXO). Основным недостатком стандартов TCXO является их невысокая стабильность, что обуславливает возникновение взаимных временных смещений.

Известны два разных способа построения систем позиционирования, которые позволяют бороться с ошибками, обусловленными смещениями временных шкал: асинхронный и синхронный. Существует также вариант построения системы на основе измерения обратной дальности с использованием нескольких псевдолитов и множества приемников.

Асинхронная система позиционирования состоит из нескольких псевдолитов, опорной станции и GPS приемника.

Опорная станция имеет возможность работать как на прием, так и на передачу. В асинхронной системе псевдолиты используют собственные стандарты частоты. Однако, как упоминалось ранее, они не являются стабильными. Поскольку в системе применяются псевдолиты с собственными шкалами, она является несинхронизированной и по этой причине называется



асинхронной. Использование местных стандартов частоты служит причиной возникновения системной проблемы — ошибок, обусловленных смещением временных шкал. Для обеспечения выдачи правильных координат необходимо тем или иным способом исключить влияние указанных ошибок.

Этого добиваются за счет использования опорной станции. Заранее известное положение опорной станции и псевдолитов позволяет вычислить величину смещения временных шкал при измерении псевдодальностей на опорной станции. Вычисленные опорной станцией значения расхождения временных шкал псевдолитов передаются по беспроводному каналу связи потребителю.

Синхронная система позиционирования на основе псевдолитов включает опорную станцию, навигационный приемник абонента, несколько псевдолитов, канал связи и ведущий псевдолит.

Ведущий псевдолит обладает собственным стандартом частоты и во многом подобен псевдолитам асинхронной системы, однако остальные псевдолиты имеют отличные от него задающие генераторы. Они представляют собой цифровые управляемые осцилляторы, которые используются для формирования сигналов. Опорная станция передает команды синхронизации шкал на «ведомые» псевдолиты по каналу связи.

Располагая данными о точном положении ведущего псевдолита, опорной станции и ведомых псевдолитов, можно определить ошибки синхронизации временных шкал ведущего и ведомых псевдолитов. При известных смещениях временных шкал опорная станция имеет возможность выработать команды их синхронизации. Каждый ведомый псевдолит подстраивает свою шкалу под шкалу ведущего псевдолита, в результате чего система становится синхронизированной. После завершения синхронизации GPS пользователь способен определять свое местоположение только по сигналам псевдолитов. В подобной системе отсутствует необходимость в канале передаче данных между опорной станцией и потребителем.

Достоинства первого варианта заключаются в отсутствии погрешностей измерения, обусловленных ошибками в определении местоположения спутника и из-за распространения сигнала в атмосфере, благодаря компактному

расположению системы. Кроме того, данный вариант позволяет преодолеть ограничения, присущие ГНСС, при использовании ее для позиционирования в закрытых помещениях. Еще одним достоинством первого варианта можно считать то, что аппаратная и программная части системы функционируют на земной поверхности и поэтому проблемы мощности передатчиков, вычислительной нагрузки и размеров аппаратуры могут быть легко разрешены. В свою очередь, при использовании второго варианта стоимость полной системы оказывается ниже за счет исключения одного псевдолита.

При позиционировании в закрытых помещениях с помощью навигационной системы на основе ПС возникает ряд проблем, требующих своего решения. К их числу относятся проблемы геометрической оптимизации, многолучевого распространения, близости—дальности и ошибок, обусловленных расположением сети приемников, ослабление сигнала в стенах зданий и помещений.

При правильном расположении сети приемников и передатчиков псевдолитов может быть минимизирован геометрический фактор PDOP (Position Dilution of Precision). При размещении сети приемников и передатчиков псевдолитов в одной плоскости векторы прямого распространения сигналов от передатчика к приемнику имеют одинаковую угловую ориентацию, что приводит к неудовлетворительной геометрии системы. Для достижения лучшей геометрии, а значит, лучшего значения PDOP один из приемников должен располагаться на другой высоте и в центре сети. При игнорировании смещения временных шкал геометрический фактор PDOP сводится к GDOP (Geometric Dilution of Precision).

Использование ПС при построении систем позиционирования в закрытых помещениях приводит к возникновению нескольких источников ошибок, что вызывает необходимость их устранения. Наиболее значительными источниками ошибок служат многолучевое распространение, эффект близости—дальности, погрешность синхронизации временных шкал псевдолитов и неопределенность расположения псевдолитов.

Эффект многолучевости требует особого внимания при работе систем позиционирования в условиях плотной городской застройки или в закрытых помещениях. При использовании псевдолитов в системе позиционирования в за-

крытых помещениях эффект многолучевости имеет еще большее значение, поскольку количество потенциальных отражателей значительно возрастает. Данный эффект проявляется в том, что при наличии множества препятствий на приемник поступают множество отраженных от них сигналов. В результате этого сигналы обладают разными задержками и либо искажают исход-

ный сигнал из-за интерференции, либо приводят к неправильной оценке расстояния между приемником и передатчиком. Если длина путей сигналов, которые отражаются от препятствий, превышает на десять метров длину пути прямого распространения сигнала, то эффект многолучевости может быть скомпенсирован за счет специальных методов обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов, А.И.** Полигонные навигационные измерения с использованием спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR [Текст] / А.И. Иванов, Л.М. Романов // Зарубежная радиоэлектроника.— 1989. № 11. С. 16–29.

2. **Шебшаевич, В.С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич [и др.] / Под ред. В.С. Шебшаевича.— 2-е изд., перераб. доп.— М.: Радио и связь, 1993.— 408 с.

3. **Бабуров, В.И.** Анализ влияния точности координатно-временной привязки носителя псевдоспутника на характеристики навигационного поля

СРНС + ПС [Текст] / В.И. Бабуров, Н.В. Иванцевич, Н.В. Васильева [и др.] // Тр. 13-й международной конференции по интегральным навигационным системам.— ЦНИИ «Электроприбор».— СПб., 2006.

4. JLENS: рубеж защиты от крылатых ракет [Электронный ресурс] // CNews.ru, 4 апреля 2008 г.

5. **Власов, И.Б.** Методика и результаты аттестации канала ретрансляции сигналов СРНС [Текст] / И.Б. Власов, А.В. Гребенников, Д.В. Завгородний [и др.] // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф.— Воронеж, 2004.— С. 1674–1684.

ПОЛИТЕХНИКИ — ТРИЖДЫ ГЕРОИ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА



А.П. Александров (1903–1994) — выдающийся советский ученый-физик, организатор науки и общественный деятель, действительный член Академии наук СССР, ближайший соратник И.В. Курчатова, трижды Герой Социалистического Труда (1954, 1960, 1973), лауреат Ленинской (1959), четырех Сталинских (1942, 1949, 1951, 1953) премий. Кавалер девяти орденов Ленина (1945, 1949, 1953, 1954, 1956, 1963, 1975, 1978, 1983), Октябрьской Революции (1971), Трудового Красного Знамени (1945), Отечественной войны 1-й степени (1985), медалей «За оборону Севастополя», «За оборону Сталинграда», «За оборону Ленинграда», Большой Золотой медали им. М.В. Ломоносова, золотых медалей им. С.И. Вавилова, И.В. Курчатова Академии наук СССР. Он в 1930–1946 годах работал в Ленинградском физико-техническом институте, в 1946–1954 годах — в Институте физических проблем, в 1948–1988 в Лаборатории №2 АН СССР — Лаборатории измерительных приборов АН СССР — Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова. Параллельно в 1975–1986 годах был президентом Академии наук СССР, в 1988–1994 годах — советником Президиума АН СССР.

Анатолий Петрович с 1931 по 1941 год работал в нашем университете: ассистентом кафедры общей физики, заведующим лабораторией оптики, доцентом кафедры экспериментальной физики (с 1939 года — технической электроники) и химической физики инженерно-физического (физико-механического) факультета.

УДК 001.:929

Ф.П. Кесаманлы

АКАДЕМИК АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ АЛЕКСАНДРОВ

Анатолий Петрович Александров — выдающийся ученый и организатор науки, научный руководитель программ по развитию атомно-промышленного комплекса СССР, человек, олицетворяющий собой целую эпоху в становлении и развитии нашей Родины, ее науки, промышленности, культуры, образования, в реальном обеспечении ее безопасности и независимости и прошедший вместе со страной весь сложный и трудный путь практически с момента ее образования и до трагических дней распада...

Академик Н. С. Хлопкин

Анатолий Петрович Александров родился 31 января (13 февраля) 1903 года в маленьком городке Тараща Киевской губернии (ныне Киевская область Украины) и стал третьим ребенком в семье мирового судьи, в которой уже росли старшие дети: дочь Валерия и сын Борис.

Отец его, Петр Павлович Александров (1863–1931), был из мещан Саратовской губер-

нии. В 1891 году окончил юридический факультет Киевского университета имени Святого Владимира и в том же году женился на Элле-Марии Эдуардовне Классон (1870–1906) — дочери квартирной хозяйки Анны Карловны Классон (Вебер), у которой в студенческие годы он снимал комнату. После смерти матери воспитанием детей занималась бабушка — Анна Карловна.

Старшие дети были определены — Валерия училась в лютеранской гимназии, Борис — в реальном училище. Анатолий поступил в подготовительный класс реального училища в 1910 году.

Анна Карловна, немка по происхождению, лучше знала по-немецки, чем по-русски. Поэтому дома говорили на трех языках: русском, немецком и украинском. В старших классах реального училища Анатолий стал активно участвовать в работе общегородского физико-химического кружка. Кружком руководил Александр Тимофеевич Любанский, впоследствии известный физик. Кружковцы выступали с докладами, проводили опыты, изготавливали разные приборы. Знания, умения и навыки, приобретенные Анатолием в физико-химическом кружке, очень помогали ему в годы работы учителем и при проведении научных исследований. Реальное училище он окончил в 1919 году.

В 1919–1920 годах участвовал в Гражданской войне на стороне белой армии, где очень преуспел и прославился до такой степени, что был удостоен трех Георгиевских крестов. На руке у него сохранились шрамы — следы сабельных ударов. В ноябре 1920 года попал в плен к красным, был приговорен к расстрелу, но ему удалось бежать (эти факты биографии он всю жизнь скрывал) [4, с. 15, 16].

Впоследствии Анатолий Петрович работал: ассистентом в Киевском горном институте (1920–1930), электромонтером, электротехником в Киевском физико-химическом обществе при Политпросвете (1920–1922), преподавателем Волковской средней школы в селе Белки Киевской области (1922), преподавателем физики и химии в 79-й трудовой школе Киева (1923–1930). В 1924–1930-х годах в качестве вольнослушателя учился на физико-математическом факультете Киевского государственного университета. В последние годы учебы в университете занимался научно-исследовательской работой в области физики диэлектриков в Киевском рентгеновском институте и в 1929 году опубликовал свою первую научную работу — «Высоковольтная поляризация в церезине».

Осенью 1930-го года А.П. Александров переехал в Ленинград. Вот как об этом событии в своей жизни рассказывал в 1978 году сам Анатолий Петрович, уже будучи президентом АН СССР: «...в Одессе проходил Всесоюзный съезд физиков. Вся наша группа, работающая

в Киевском рентгеновском институте, получила на него приглашение. В нее тогда входили профессор Киевского университета Д.Н. Наследов и два студента: В.М. Тучкевич (нынешний академик, директор ЛФТИ) и я. В Одессе мы подробно рассказали А.Ф. Иоффе о работах, проводимых нами». Сразу после съезда Абрам Федорович пригласил всех членов группы на работу в Ленинградский физико-технический институт» [7, с. 19].

Первые работы Анатолия Петровича в Физико-техническом институте были также посвящены физике диэлектриков, и с ними связана интересная история. В конце двадцатых годов прошлого века академик А.Ф. Иоффе был увлечен идеей тонкослойной изоляции. Основывалась эта идея на повышении электрической прочности изоляционных пленок при уменьшении их толщины, что объяснялось развивающейся тогда теорией лавинной ударной ионизации. Абраму Федоровичу казалось, что в тонких слоях диэлектрика не сможет развиваться лавина зарядов (ионов), и пробой, даже при приложении высокой разности потенциалов не произойдет. Отсюда вытекали радужные перспективы создания мощных и вместе с тем миниатюрных аккумуляторов, другие важные технические приложения. Идеей заинтересовались электротехнические фирмы в Германии и Америке. Эксперименты, в которых участвовали ближайшие сотрудники Иоффе, в том числе А.К. Вальтер, И.В. Курчатов, К.Д. Синельников, на первых порах, казалось бы, подтверждали правильность этой идеи. Однако потом ситуация изменилась — в других лабораториях получили иные результаты. Продолжение этой работы Абрам Федорович поручил А.П. Александрову. Вот как об этом пишет сам Анатолий Петрович [9]:

«Меня академик Иоффе назначил в отдел тонкослойной изоляции, руководителем которой был А.К. Вальтер. Я довольно хорошо разбирался в органической химии, и моей задачей было изыскание полимеров, дающих однородные тонкие пленки, и изучение электрических свойств этих пленок. Целью было получение тонких пленок сверхвысокой электрической прочности. Это было дальнейшее развитие работ Иоффе, Курчатова, Синельникова и других, считавших на основании своих работ, что электрический пробой диэлектрика происходит путем лавинного процесса ударной ионизации ионами. При



таком механизме в тонких пленках лавина не могла развиваться, и они должны были обладать в десятки раз более высокой электрической прочностью. Я хорошо подготовил методическую сторону работы и бился буквально с утра до ночи, чтобы на новых тогда полимерных материалах воспроизвести электрическую прочность тонких слоев, которую наблюдали Иоффе, Курчатов, Синельников, Б.М. Гохберг и др. на стеклах и слюде. У меня ничего не выходило. Часто я приглашал Иоффе, Курчатова и других и просил раскритиковать мою методику. Однако все считали, что все, что я делал, — правильно и, значит, в этих пленках какой-то другой механизм пробоя. Тогда я решил воспроизвести их старые опыты и опять же не обнаружил эффекта упрочнения.

Игорь принес мне стекла, на которых он работал, но и тут ничего не получил. Тогда я полностью воспроизвел и их старую методику измерений. Эффект появился, но оказалось, что он был результатом погрешности старой методики! У меня было тяжелейшее положение — мне, мальчишке, опровергнуть результаты Иоффе и его ближайших сотрудников! И вот тут я убедился в поразительной принципиальности настоящих ученых. Курчатов долго сидел в моей лаборатории и измерял вместе со мной. До часу ночи просидел Иоффе, и в результате совместно с ним была опубликована работа, в которой исправлялась ошибка его и его школы» [10].

В 1932 году Государственное технико-теоретическое издательство выпустило большую коллективную монографию «Физика диэлектриков», в которой глава по электрическим свойствам диэлектриков была написана Анатолием Петровичем [11]. Годом позже он был назначен заведующим лабораторией электрических и механических свойств полимеров. В лаборатории он разрабатывал и исследовал свойства новых диэлектриков, таких как полистирол и другие.

Предвидя огромное будущее полимеров, в 1933–1941 годах он со своими сотрудниками и в творческом контакте с П.П. Кобеко выполнил комплексные исследования физических свойств различных высокомолекулярных веществ, получив результаты, которые позволили установить общие для всех полимеров физические закономерности и выявить связь между механическими и электрическими релаксационными процессами. Им совместно с П.П. Кобеко была разработана технология получения моро-

зостойкой резины на основе отечественного синтетического каучука, нашедшая широкое применение в авиации и артиллерии.

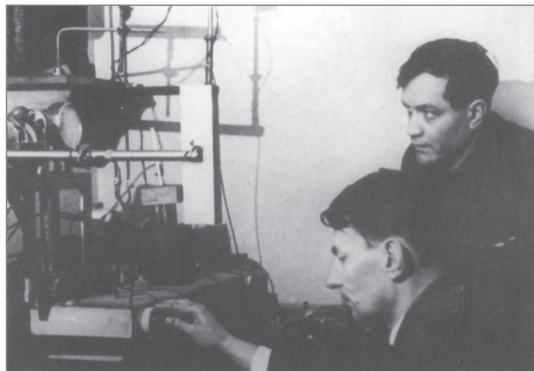
В 1935 году А.П. Александров, С.Н. Журков и П.П. Кобеко предложили статистическую теорию прочности полимеров, которая легла в основу современной физической теории твердых тел. Работы этого цикла составили основное содержание докторской диссертации А.П. Александрова «Релаксация полимеров», успешно защищенной 27 июня 1941 года. Кандидатская диссертация на тему «Пробой твердых диэлектриков» была защищена им в 1937 году.

В 1936–1945 годах в лаборатории А.П. Александрова параллельно с изучением полимеров по заданию руководства Военно-морского флота страны была разработана технология защиты кораблей от бесконтактных магнитных мин и торпед и начата работа по размагничиванию военных кораблей. В этой работе активно участвовали сотрудники лаборатории Б.А. Гаев, В.Р. Регель, П.Г. Степанов, К.К. Щербо и Д.В. Филиппов.

В предвоенные годы А.П. Александров успешно сочетал научную работу с педагогической деятельностью. С 1931 по 1941 год он преподавал у нас в университете. Был ассистентом на кафедре общей физики, заведующим лабораторией оптики, доцентом кафедры экспериментальной физики (с 1939 года технической электроники) и химической физики инженерно-физического (физико-механического) факультета.



Анатолий Петрович. 1935 г.



Анатолий Петрович и Б.А. Гаев. ФТИ, 1940 г.

С началом Великой Отечественной войны вся жизнь ученых Физико-технического института пошла по военному графику. Началось формирование групп для размагничивания кораблей на морских и речных флотах страны. К этой работе примкнули И.В. Курчатов со всей своей лабораторией, В.М. Тучкевич, А.Р. Регель, Н.В. Федоренко, М.М. Бредов, В.А. Иоффе и другие — всего 27 сотрудников Физико-технического института. Им в срочном порядке предстояло выехать для организации работ по размагничиванию кораблей на Краснознаменный Балтийский, Черноморский и Северный флоты, Ладожскую и Беломорскую флотилии, затем — Тихоокеанский флот, несколько позднее — на Каспийскую и Волжскую флотилии. За работу по защите кораблей, способствовавшую сохранению и успешным действиям советского Военно-морского флота в годы войны и спасшей многие тысячи жизни моряков, в апреле 1942 года сотрудникам ФТИ — А.П. Александрову, И.В. Курчатову, Б.А. Гаеву, В.Р. Регелю, П.Г. Степанову — и двум военным морякам — Б.Е. Годзевичу, И.В. Климову — была присуждена Сталинская премия первой степени [12]. Александров, Курчатов и другие физтеховцы размагничиванием кораблей занимались вплоть до 1943 года. К этому времени с их помощью во всех флотах и флотилиях Военно-морского флота была организована самостоятельная Служба размагничивания. К концу войны за эту работу сотрудники ФТИ были награждены: А.П. Александров получил орден Ленина, И.В. Курчатов — орден Красного Знамени, В.Р. Регель, А.Р. Регель, П.Г. Степанов, В.А. Иоффе и другие — ордена и медали за оборону разных городов, где занимались размагничиванием [4, с. 95].

В 1943 году А.П. Александров был избран членом-корреспондентом АН СССР. В конце того же года И.В. Курчатов предложил ему со своей лабораторией подключиться к работам по урановой проблеме — заняться разделением изотопов термодиффузионным методом. Анатолий Петрович согласился заниматься этой работой только после реэвакуации из Казани в Ленинград и стал серьезно готовиться к ее выполнению. Вот, что об этом пишет сам Анатолий Петрович:

«Работа по термодиффузионному обогащению урана шла хорошо. Этот процесс требовал больших энергозатрат, правда, в виде низкопотенциального тепла. В Лесном, в Ленинграде, у здания на Приютской улице, где находилась занимающаяся этой тематикой часть моей лаборатории, был поставлен локомотив. Это древнее устройство давало нам пар для экспериментальной обогатительной установки. Сама установка была уже второго поколения, на ней можно было установить, что мы и сделали, основные параметры полупроизводственной установки. Были налажены удобные методы измерения концентрации урана-235 (по активности урана-234), подобраны некорродирующие материалы и т. д. В 1945 году И.В. Курчатов поставил вопрос о переносе этих работ в Москву и существенном их расширении. Мне очень не хотелось уходить из ЛФТИ, тем более я знал о работах по решению нашей задачи иным способом, которые велись с существенным успехом в других местах. На мой вопрос о смысле дублирования Игорь Васильевич сказал, что если потребуется небольшое обогащение, то, может быть, будет проще и, главное, существенно быстрее построить нашу систему».

В 1946 году А.П. Александров был назначен директором Института физических проблем АН СССР вместо опального П.Л. Капицы. После переезда его лаборатории в Москву в ней была разработана крупная производственная обогатительная установка, которую соорудили на ГЭС-2, расположенной напротив гостиницы Россия на другой стороне Москвы-реки. Она давала в сутки примерно 200 г материала, обогащенного до двух процентов.

В ИФП под руководством Анатолия Петровича, помимо традиционных для этого института исследований, был выполнен комплекс сложнейших работ, имевших большое значение для



А.П. и П.Л. Капица. 1975 г.

решения атомной проблемы. В частности, была отработана технология и построена установка для получения ректификацией жидкого водорода — дейтерия, необходимого для получения тяжелой воды и проведения работ по термоядерным реакциям, разработан проект завода для получения тяжелой воды. Эти работы выполнялись в основном новыми молодыми научными сотрудниками, которых набирали из числа выпускников МГУ, МХТИ, МВТУ, а после 1950—1951 годов — МФТИ и МИФИ; они проходили преддипломную практику и выполняли свои дипломные работы в лабораториях и отделах ИФП. Председателем Государственной экзаменационной комиссии, оценивавшей дипломные работы, был сам Анатолий Петрович. Благодаря этому среди научных сотрудников института не было случайных людей.



А.П. и Н.Н. Семёнов. 1967 г.

В 1948 году А.П. Александров по совместительству был назначен заместителем начальника Лаборатории № 2 АН СССР (лаборатория И.В. Курчатова) по реакторостроению. Такое назначение было связано с необходимостью получения большего количества плутония для обеспечения производства нужного количества бомб. Первый промышленный реактор, пущенный Н.А. Доллежалем в середине 1948 года, давал 40 кг плутония в год. За сравнительно короткий срок под руководством Анатолия Петровича был разработан реактор, дающий 100—120 кг плутония в год. Такие реакторы пошли в серию. 120 кг плутония — это два десятка бомб, таких, какие были сброшены на Хиросиму. В результате у нас в стране гораздо быстрее было развернуто серьезного масштаба производство плутония, чем успели развернуть американцы [4, с. 141]



А.П., Ю.Б. Харитон и Е.П. Славский в музее И.В. Курчатова



А.П. со всеми наградами.
9 мая 1993 г.

29 августа 1949 года был положен конец ядерной монополии США — на Семипалатинском полигоне была успешно испытана отечественная атомная бомба с плутониевым зарядом. В связи с этим по Постановлению Совета Министров СССР № 5070—1944 сс/оп «О награждении и премировании за выдающиеся научные открытия и технические достижения по использованию атомной энергии» от 29 октября 1949 года Анатолий Петровичу было присвоено звание лауреата Сталинской премии 2-й степени и он был представлен к награждению орденом Ленина. Аналогичные награды он получил и через два года, после испытания 24 сентября 1951 года на том же полигоне атомной бомбы с урановым зарядом, а после успешного испытания 12 августа 1953 года водородной бомбы ему



А.П. и И.Д. Папанин. 1981 г.

в четвертый раз была присуждена Сталинская премия и присвоено звание Героя Социалистического Труда.

После семилетнего перерыва, в октябре 1953 года, были проведены выборы в Академию наук СССР. На этих выборах А.П. Александров вместе с Л.А. Арцимовичем, Н.Н. Боголюбовым, И.К. Кикоиным, А.Д. Сахаровым, И.Е. Таммом, Ю.Б. Харитоновым и другими был избран действительным членом АН СССР.

Велик был вклад А.П. Александрова в создание, становление и развитие отечественного атомного флота. В сентябре 1952 года академик И.В. Курчатов, член-корреспондент АН СССР и профессор Н.А. Доллежалев направили в Правительство страны предложение о создании подводной лодки с ядерной энергетической установкой. Предложение было принято. И 9 сентября 1952 года И.В. Сталиным было подписано Постановление Совмина СССР № 4098 — 1616 «О проектировании и строительстве объекта № 627». Научным руководителем разработки проекта был назначен Анатолий Петрович. Сразу после появления этого Постановления под его руководством были развернуты работы по созданию атомных энергетических установок. При этом практически параллельно шло создание реакторов для боевых судов — атомных подводных лодок — и имеющих сугубо мирное назначение атомных ледоколов.

Анатолий Петрович непосредственно руководил пуском реакторов первого в мире атомного ледокола «Ленин» и первой отечественной атомной подводной лодки «Ленинский комсомол». Оба судна были сданы в эксплуатацию в 1959 году. За ними последовали новые, более совершенные разработки. Атомные ледоколы «Арктика», «Сибирь», «Россия» и другие позволили существенно расширить сроки навигации в полярном бассейне, приблизить ее к круглогодичной. Десятки атомных подводных лодок трех поколений, оснащенных мощным ракетно-ядерным оружием, стали одной из важных составляющих того стратегического паритета, который сложился между двумя сверхдержавами в годы холодной войны [6].

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 15 мая 1960 года А.П. Александров был награжден второй золотой медалью «Серп и Молот» с присвоением звания дважды Героя Социалистического Труда.



Широта научных интересов Анатолия Петровича наиболее ярко проявилась на посту директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова, который он занял в 1960 году и возглавлял без малого 30 лет, до декабря 1988 года. В этот период, с 1975 по 1986 год, он параллельно был и президентом АН СССР.

Анатолий Петрович проводил огромную работу по расширению сферы использования ядерных источников энергии в мирных целях (атомные станции теплоснабжения, ядерные энергетические установки для получения высокопотенциального тепла для химической и металлургической промышленности), развитию исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Особое внимание он уделял развитию в Институте фундаментальных исследований, в частности в области биологии и теории твердого тела.

Он сумел предвидеть огромные перспективы исследований молекулярных механизмов наследственности, создав в Институте атомной энергии биологический отдел, впоследствии выделившийся в самостоятельный институт (ныне Институт молекулярной генетики РАН) и ставший одним из ведущих центров в этой области биологических исследований. Интерес его к области физики твердого тела усиливался тем, что развитие атомной науки и техники постоянно ставило перед физикой твердого тела новые вопросы и одновременно давало в руки исследователей новые методы и технические средства изучения свойств твердого тела [5, 6].

В 1960-х годах, предвидя техническое использование сверхпроводимости, он создал в Институте самую крупную в стране установку по оживлению гелия, развернул фундаментальные исследования по физике низких температур и работы по техническому применению сверхпроводимости.

В 1980-е годы по инициативе Анатолия Петровича в ИАЭ был создан источник синхротронного излучения с целью его использования в фундаментальных исследованиях в области физики и биологии для решения прикладных задач.

Самоотверженный труд А.П. Александрова был отмечен многими высокими государственными, правительственными и академическими наградами. Он был трижды Героем Социалистического Труда, лауреатом Ленинской и четырех Сталинских премий. Кавалером девяти орденов

Ленина, Октябрьской революции, Трудового Красного Знамени, Отечественной войны 1-й степени, медалей «За оборону Севастополя», «За оборону Сталинграда», «За оборону Ленинграда», Большой Золотой медали им. М.В. Ломоносова, золотой медали им. С.И. Вавилова и золотой медали им. И.В. Курчатова.

В конце 1988-го года Анатолий Петрович был назначен Почетным директором ИАЭ и советником Президиума АН СССР, успешно исполняя эти должности до конца своей жизни.

Умер Анатолий Петрович 3 февраля 1994-го года в Москве, не дожив 10 дней до своего 91-летия. Похоронили его, как он просил, в Москве на Митинском кладбище рядом с женой, Марианной Александровной. В гроб положили заводской флаг подводной лодки. Этот флаг был подарен ему в 1958 году, и когда он привез его домой, то попросил: «Когда умру, положите этот флаг ко мне в гроб».

Имя Анатолия Петровича увековечено присвоением его Научно-исследовательскому технологическому институту в Сосновом Бору, бывшему филиалу ИАЭ, основанному по инициативе Анатолия Петровича. Напротив НИТИ имени А.П. Александрова был установлен ему памятник, уже второй в Сосновом Бору. Первый был установлен в 1969-м году, как полагалось тогда для дважды Героев Социалистического Труда. Следовало установить этот бюст на родине Анатолия Петровича, в городе Тараша, но он там только родился и больше никогда не был. Поэтому он просил не устанавливать бюст вообще, а уж если необходимо, то поставить его в Сосновом Бору, где Ленинградская АЭС и НИТИ [4].

В 2003-м году к 100-летию А.П. Александрова была выпущена почтовая марка России.



Почтовая марка, выпущенная к 100-летию А.П. Александрова



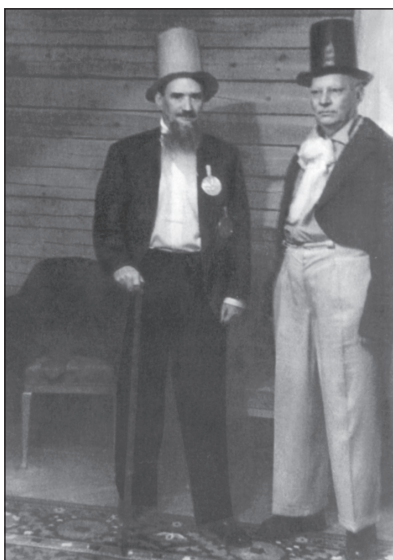
А.П. и Ю.А. Гагарин. 1965 г.

БАЙКИ ОТ А.П. АЛЕКСАНДРОВА

Анатолий Петрович был веселый человек с чувством юмора и любил шутки. Здесь мы приводим три веселые истории, рассказанные им и приведенные в книге [6].

Бдительные генералы

Как-то ночью, когда я был на заводе и работал с плутониевыми деталями, нагрязнуло начальство — М.Г. Первухин, человек пять генералов, директор завода (я в это время был научным руководителем). Они спросили, что я делаю. Я объяснил, и тогда они задали странный вопрос: «Поче-



А.П. и И.В. Курчатов.
Новогодний маскарад. 1957 г.

му вы думаете, что это плутоний?» Я сказал, что знаю всю технологию его получения и поэтому уверен, что это плутоний, ничего другого быть не может! «А почему вы уверены, что его не подменили на какую-нибудь железку?» Я поднес кусок к альфа-счетчику, и он сразу затрещал. «Смотрите, — сказал я, — он альфа-активен!» «А может быть, его только помазали плутонием сверху — вот он и трещит», — сказал кто-то. Я обозлился, взял этот кусок и протянул им: «Попробуйте, он же горячий!» Кто-то из них сказал, что нагреть железку недолго. Тогда я ответил, что пусть он сидит, смотрит до утра и проверит, останется плутоний горячим. А я пойду спать. Это их, по-видимому, убедило, и они ушли. Такого рода эпизоды были нередки.

Розыгрыш И.В. Курчатова

Как-то Борода приехал в Институт физпроблем. Там ему напомнили, что он давал зарок не брить бороду, пока не сделает бомбу. Мы поднесли ему громадную бритву, таз с мыльной пеной и венником и потребовали, чтобы он сбрил бороду. Он посмеялся, увез с собой бритву — она и теперь в его Доме-музее. А за розыгрыш он со мной рассчитался: когда я ехал на завод, дал мне пакет для директора с заданием передать во время обеда. Я так и сделал, но оказалось, что в пакет он положил для меня и требование, чтобы я его тут же надел. Что я и сделал.

«Грязный» Главнокомандующий

Когда начали строить атомные корабли и стали разбираться в радиационной обстановке, которая существует на лодке до загрузки реактора горючим, мы увидели: радиационная обстановка довольно неприятная, потому что до черта приборов было со светящимися шкалами. Они, эти шкалы, были нанесены фосфоресцирующими красками, краски же сделаны на основе радиоактивных веществ.

Тогда мы потребовали снять все светознаки на лодке, чтобы у нас был прямой результат: какое облучение получает персонал за счет атомной техники на лодке, а какое — от всяких посторонних источников. Иначе было бы невозможно отличить, если светознаки остались. Моряки сильно упирались.

Я помню такой комический случай. Когда мы проходили по лодке, были Борис Евстафьевич Бутыма, Сергей Георгиевич Горшков, шел с ними я и еще несколько человек. И как раз матрос «сдирал» букву «Т», которая возле телефона. Бутыма нагнулся, поднял кусочек такой краски и незаметно сунул Сергею Георгиевичу в карман. Мы прошли по лодке. Выходим из корабля, и тут вдруг часовой, который стоит у трапа, выбрасывает свою винтовку перед Сергеем Георгиевичем. Загорается красная лампочка сигнализации, звенит звонок. Часо-



вой говорит: «Товарищ Главнокомандующий, я не могу Вас пропустить». Горшков удивлен: «Почему?» В ответ: «Товарищ Главнокомандующий, Вы грязный. А в то время термин «грязный» обозначал, что замазан в радиоактивных веществах. Для того чтобы соблюсти секретность, нельзя было говорить «радиоактивный». Сергей Георгиевич

страшно возмутился, что его вдруг собственный матрос не пропускает. Тогда Бутوما достал из его кармана тот кусочек буквы «Т» и говорит: «Вот смотри, это буква Т», — и выбросил ее в воду, сразу все звонки прекратились. После этого случая моряки перестали сопротивляться удалению светящихся знаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив СПбГПУ: личное дело преп. № 65 (XII.1933— IX.1940).
2. Архив ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.
3. **Смелов, В.А.** Политехники: Герои Советского Союза. Герои Социалистического Труда [Текст] / В.А. Смелов.— Л.: Изд-во ЛПИ, 1989.— 196 с.
4. **Александров, П.А.** Академик Анатолий Петрович Александров. Прямая речь [Текст] / П.А. Александров.— М.: Наука, 2001.— 248 с.
5. А.П. Александров. Документы и воспоминания. К 100-летию со дня рождения / Отв. ред. акад. Н.С. Хлопкин.— М.: Изд-во АТ, 2003.— 456 с.
6. Успехи физических наук.— 1978.— Т. 109, вып. 3.— С. 99—102.
7. Академик Игорь Васильевич Курчатов [Текст]: Сборник статей.— М.: Знание, 1981.— 64 с. // Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика».— № 9.
8. К 90-летию академика Анатолия Петровича Александрова. Сборник статей [Текст] / ФТИ.— СПб., 32 с.
9. **Александров, А.П.** Годы с И.В. Курчатовым [Текст] / А.П. Александров // Атомная энергия.— 1983.— Т. 54, вып. 1.— С. 3—12.
10. **Александров, А.П.** К вопросу об электрической прочности тонких пленок [Текст] / А.П. Александров, А.Ф. Иоффе // ЖТФ.— 1933. Т. 3, вып. 1.— С. 32—38.
11. **Александров, А.П.** Физика диэлектриков [Текст] / А.П. Александров, А.Ф. Вальтер, Б.М. Вул [и др.].— Л.-М.: ГТТИ, 1932.— 560 с.
12. **Коптев, Ю.** Виза безопасности [Текст] / Ю. Коптев.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 68 с.

УДК 001:929

А.И. Демидов

ОТ ВОЛЬТА ДО ПЕТРОВА (к 250-летию В.В. Петрова)

Алессандро Вольта (1745—1827), итальянский физик и физиолог, в конце 1799 года создал первую в мире батарею химических источников тока (гальванических элементов) — «вольтов столб» [1].

Сообщение об этом им было сделано в письме от 20 марта 1800 года* из города Камо (Италия) на имя президента Королевского общества в Лондоне сэра Джозефа Бэнкса. Бэнкс опубликовал статью Вольты «Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением проводящих веществ» в журнале «Philosophical Transactions» только 26 июня 1800 года. С текстом статьи А. Вольта на русском языке можно ознакомить-

ся в монографии М.И. Радовского [2]. Столб состоял из некоторого числа круглых пластинок из серебра или меди, равного числа цинковых пластинок и такого же числа кружков из картона, кожи, сукна и т. п., пропитанных водой, а лучше соленой водой или раствором щелочи [1]. Эти пластинки были уложены таким образом, чтобы серебро, цинк и влажный картон, чередуясь, следовали бы друг за другом.

Однако Вольта с помощью своего прибора не открыл новых свойств гальванического электричества: при его помощи были воспроизведены известные уже раньше явления, но только в необычайно усиленной степени. Вместо мышечных сокращений получились сильные чув-

*Все даты по старому стилю



Рис. 1. Алессандро Вольта

ствительные удары при прикосновении влажными руками к полюсам столба; световые явления в глазу и вкусовые на языке были гораздо резче прежних; когда проволоки от обоих полюсов вкладывали в уши, то в голове чувствовался треск настолько сильный, что Вольта, однажды проделав этот опыт, не решался уже его повторить.

Сообщение о вольтовом столбе появилось в октябре 1800 года в одном голландском еженедельнике [3], а 20 октября этого же года князь Дмитрий Алексеевич Голицын (1734–1803), почетный член Императорской Академии наук, проживающий в Гааге, сообщил президенту Академии Андрею Львовичу Николаи (1737–1820) о своей попытке произвести опыт с вольтовым столбом: «Гальванисты открыли чрезвычайно любопытное электрическое явление. Цинковые пластины, расположенные попеременно с сереб-

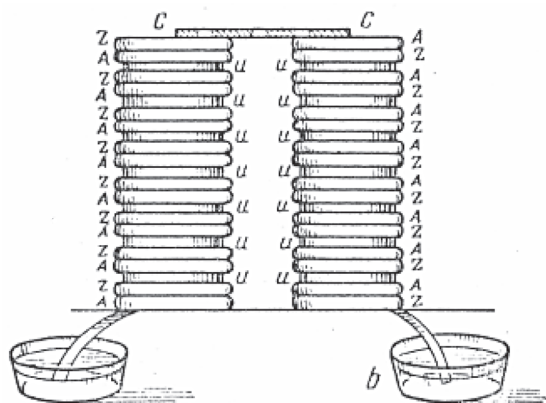


Рис. 2. Вольтов столб:
А — серебро; Z — цинк; U — картон, пропитанный соленой водой;
С — металлическая пластинка

ряными и разделенные влажной фланелью, вызывают удар и даже электрическую искру. Я пробовал произвести опыт с 8 цинковыми и столькими же серебряными пластинами, но он мне не удался; меня, однако, заверили, что нужно иметь, по меньшей мере, по 40 пластин каждого вида». Письмо было оглашено 3 декабря 1800 года.

Российские ученые только 16 сентября 1801 года на заседании Конференции Академии наук смогли увидеть своими глазами вольтов столб, собранный по заказу графа Аполлоса Аполлосовича Мусина-Пушкина (1760–1805), вице-президента Берг-коллегии, почетного члена Императорской Академии наук [4]. Это событие газета «Санкт-Петербургские ведомости» № 81 от 1 октября 1801 года описывает так: «Его сиятельство тайный советник и кавалер граф Аполлос Аполлосович Мусин-Пушкин, первый член Государственной Берг-коллегии и почетный член здешней Академии наук, повторил с таковым Вольтовым столбцом, из трех сот металлических с рубль величиною кружков состоящим, из коих полтораста было серебряных и столько же цинковых, 16-го числа сего месяца, с великим успехом, существенные с электрическими явлениями сходственные Гальваниевы опыты в присутствии его превосходительства Академии наук Президента тайного советника и кавалера барона Андрея Львовича Николаи, вице-президента, всех членов Академии и почетного оной же Академии члена его превосходительства Андрея Андреевича Нартова. На серебряный кружок положен был цинковый и на сей — из фланели вырезанный. Все три смочены были соленою водою, сто пятьдесят таких слоев составили столбец, который держим был тремя отвесно поставленными стеклянными трубками; к нижнему серебряному кружку прицеплена была серебряная цепочка. Если после сего намочишь обе руки соленою водою и если одною будешь держать сию цепочку, а другою дотронешься до верхнего цинкового кружка, то почувствуешь потрясение или удар сходный с получаемым от слабозаряженной Лейденской электрической склянки. Ежели сей опыт повторить с тем только различием, что дотронешься до верхнего цинкового кружка языком или какою другою намоченною частью лица, то в самое время вышеобъявленного удара, от коего чувствительные жилы зрения бывают раздражаемы, виден бывает свет пред лицом того, который сей опыт делает, даже и с закрытыми глазами.



По многим известиям, вероятно, что так названный Гальванизм, или сие особенного рода электрическое вещество животных, доведет нас и в лечебной науке до весьма важных открытий».

Теперь можно считать установленным, что дату 16 сентября 1801 года следует принять за исходную дату начала развития отечественной электротехники и электрохимии [5].

В октябре 1801 года академик Императорской Академии наук Логин Юрьевич (Вольфганг-Людвиг) Крафт (1743–1814), ученик Леонарда Эйлера (1707–1783), заказал у механика Иосифа Меджера, англичанина по происхождению, для Физического кабинета Академии наук вольтов столб из 120 медных и цинковых пластин и получил его в ноябре того же года [6].

В ноябре 1801 года Конференция Медико-хирургической академии (МХА) поддержала просьбу профессора физики Василия Владимировича Петрова (1761–1834) о заказе у И. Меджера вольтов столба из ста цинковых и ста медных кружков [7]. После проведения серии экспериментов с использованием батареи из 200 медных и цинковых кружков В.В. Петров понял, что необходимо заказать гораздо более солидный вольтов столб. 24 января 1802 года В.В. Петров просил Конференцию МХА, а через нее — Государственную медицинскую коллегия о выделении денег на создание огромной батареи для употребления при Санкт-Петербургской медико-хирургической академии. Новая просьба Василия Владимировича была также удовлетворена, и в апреле месяце 1802 года И. Меджер выполнил заказ.

23 мая 1802 года в Прибавлениях к «Санкт-Петербургским ведомостям» № 41 в разделе «Ученые известия» академиком Л.Ю. Крафтом на основе различных опытов и изучения световых действий электрического тока была опубликована интересная статья «О гальваниевых опытах». В Академию наук для печати эта статья была предоставлена Л.Ю. Крафтом 3 марта 1802 года. Приводим текст этой статьи с некоторыми сокращениями: «Многоразличные исследования над Гальванизмом, со времени его открытия учиненные, подают нам множество причин разделить оные на две эпохи. В начале усмотрели действие Гальванизма только в происходящем сжатии и движении мышц в теле животном от соприкосновении оных с металлами; причину сих явлений полагали в свойственном телам жи-



Рис. 3. Аполлос Аполлосович Мусин-Пушкин

вотных особливого рода электрическом веществе, и поэтому, назвав электричество животным, делали над Гальванизмом опыты единственно в отношении к физиологии и врачебной науке. Началом второй эпохи по справедливости можно почитать то важное открытие, что вещества животных, коих соединение с металлами почитали существенно нужным к возбуждению Гальванических действий, ни мало к произведению оных не способствуют, но что сжатие мышц животных и движение оных во время прикосновения с металлами суть токмо следствия уже возбужденной от других причин силы Гальванизма, что оный, может быть, есть не что иное, как обыкновенное, в некоторых только обстоятельствах измененное электрическое вещество, возбуждаемое при взаимном проникновении металлов от некоторой еще нам неизвестной причины. Следствием сего открытия было превосходное изобретение Вольтов столбца, известное уже нашим читателям, которое открыло путь к исследованию химических действий Гальванизма над веществами всякого рода и подает надежду, что может быть при дальнейших в том успехах можно будет с пользой употребить Гальванизм в металлургических и ремесленных производствах.

Живущий здесь Английский механик Иосиф Меджер первый сделал Вольтов столб такой величины, какого чаятельно доселе не бывало, с тем намерением, чтобы действием онаго открыть такие наипаче технические употребления Гальванизма, коих в малом Вольтовом столбце приметить не можно. Меджерова гальваническая батарея уже ныне состоит из 8000 кружков толщиною в одну линию и 1½ дюйма в попе-

речнике; половина сего числа кружков сделана из цинка, а другая из меди, между каждыми двумя кружками из цинка и меди проложена тонкая картузная бумага, раствором нашатыря намоченная. Весь снаряд или все сии кружки кладутся в лежащие горизонтально жёлобы или длинные ящики, во внутренность коих для изолирования кружков положена напоенная маслом бумага; соединение между смежными желобами делается посредством металлических проводников.

Преходя молчанием известное действие Гальванизма на вещества ископаемые, на растения и животных, производимое оным разложением воды, превращение металлов в полукислоты (в известь), заряджение лейденской бутылки и другие оным подобные, упомяну здесь только о том, что между двумя угольями, соединенными с обоими концами столбца, является продолжительный огонь толщиной с палец, которым можно зажечь свечу, бумагу и другие горящие вещества, производится такой свет, что всякие малые предметы ясно видеть можно. Также достойно примечания явление огненных искр, соединенных с осязательным треском, и маленьких светящихся пузырьков в наполненной маслом стеклянной трубке, когда проведена будет в оную струя Гальванического вещества посредством двух проволок с шарами на концах, из которых нижний соединен с медным концом столбца, а верхний с цинковым. Сделанный из древесной сердцевины легкий шарик, повешенный на шелковинке между двумя металлическими проводниками, непрерывно качается между оными на расстоянии 1 или 2 дюймов, доколе оба сии проводника находятся со столбцом в соединении, один с медным, а другой с цинковым концом одного, и доколе действие столбца продолжается, разные степени коего можно сравнивать между собою чрез отдаление обоих проводников и чрез приведение в движение сего шарика Гальваническим веществом. Если вместо шарика из сердцевины употреблен будет шарик, сделанный из угля, то всякое прикосновение такого шарика сопровождается огненными искрами.

Из многих весьма достопамятных наблюдений, вышеупомянутым искусным Английским механиком Коллежским ассесором Меджером посредством его большого Гальваниевого снаряда учиненных, не неприятно будет упомянуть для тех, кто занимается Гальваниевыми опытами, о средстве хранить действие одного через целые

дни во всей его силе. Оно состоит в том, чтобы каждый из картузной бумаги сделанный и раствором нашатыря намоченный кружок вкладывался в вырезанное из такой же бумаги кольцо, покрытое масляным лаком, которое препятствует садиться влажности на края металлических кружков, удерживает испарение оных и тем действие столбца долее сохраняет.

Как видно из текста вышеприведенной статьи, Иосифу Меджеру впервые в России и в мире в начале 1802 года удалось обнаружить явление электрической дуги.

Профессор В.В. Петров начал свои опыты с огромной батареей только в апреле месяце 1802 года. Результаты опытов В.В. Петров изложил в монографии «Известие о Гальвани-Вольтовских опытах, которые проводил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоящей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-хирургической Академии», изданной в Санкт-Петербурге в 1803 году [8]. Монография состоит из предисловия, восьми статей и прибавления:

Статья I. О составлении и употреблении Гальвани-Вольтовских батарей.

Статья II. О средствах чищения составных Гальвани-Вольтовской батареи металлических частей, превращающихся в оксид на поверхности.

Статья III. О разрешении (разложении — <А.Д.>) воды, алкоголя и выжатых масел посредством металлов, некоторых других тел и Гальвани-Вольтовской жидкости.

Статья IV. О действии Гальвани-Вольтовской жидкости на тела живых особливо животных.

Статья V. О переменах количества и качеств атмосферного воздуха от Гальвани-Вольтовской жидкости.

Статья VI. О некоторых светоносных явлениях, происходящих от Гальвани-Вольтовской жидкости.

Статья VII. О расплавлении и сожигании металлов и многих других горючих тел, также о превращении в металлы некоторых металлических оксидов посредством Гальвани-Вольтовской жидкости.

Статья VIII. О светоносных явлениях и сожигании многосложных твердых горючих тел посредством Гальвани-Вольтовской жидкости в безвоздушном месте.



Прибавление. О различии в безвоздушном месте, также и в атмосферном воздухе между световыми явлениями и некоторыми другими действиями Гальвани-Вольтовской и электрической жидкости.

Названия статей и прибавления отражают многоплановость проведенных В.В. Петровым исследований.

Как отмечает Я.А. Шнейберг [9], в различных статьях и книгах приводятся противоречивые данные о количестве металлических кружков в огромной батарее Петрова: в одних источниках утверждается, что батарея состояла из 4200 медных и цинковых кружков, в других — из 4200 пар кружков, встречаются сведения, будто батарея содержала 8000 кружков. На основе внимательного изучения монографии автор [9] утверждает, что созданная Петровым батарея включала 4200 штук медных и цинковых кружков, или 2100 пар медно-цинковых элементов.

Огромная батарея Петрова была размещена в ящике из красного дерева, который глубиной был в два (5,08 см), шириной 12 (30,48 см) дюймов, а длиной в десять английских футов (304,8 см) [8]. Ящик имел три продольные деревянные перегородки длиной в десять футов, разделяющие его на четыре отделения, в которые плотно ребром укладывались медные, цинковые и смоченные насыщенным водным раствором нашатыря (хлорид аммония — NH_4Cl) кружки из картонной бумаги. Медные, цинковые и бумажные кружки всегда располагались в одинаковом порядке, например медь, цинк, мокрая бумага, медь, цинк, мокрая бумага; и так далее до самого конца, на котором вместо бумажного должен быть металлический кружок. Если обозначить медный кружок буквой м, цинковый — буквой ц, бумажный — б, то четыре ряда горизонтально расположенных кружков можно представить следующим образом:

цмбцмбцмб и так далее ... бцм;

мцбмцмцб и так далее ... бмц;

цмбцмбцмб и так далее ... бцм;

мцбмцмцб и так далее ... бмц.

Здесь нужно заметить, что крайние металлические кружки были с крючками, на которые удобно было надевать колечки, находящиеся на концах металлических проволок или цепочек. Ряды были соединены последовательно, и суммарная длина батареи составляла сорок английских футов, или более 12 метров.

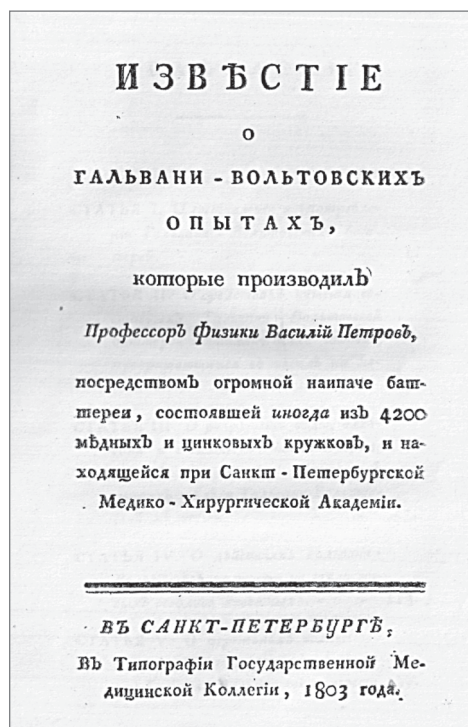


Рис. 4. Факсимиле титульного листа к сочинению В. В. Петрова «Известие о Гальвани-Вольтовских опытах»

Толщины новых металлических и бумажных кружков были одинаковыми примерно в одну линию (0,254 см). Следовательно, суммарная толщина двух металлических и одного бумажного кружка составляла 0,762 см. Если длину ряда 304,8 см разделим на 0,762 см, то получим суммарное количество триад — 400. Таким образом, общее число медных и цинковых кружков в новой батарее Петрова составляло 3200 штук, или 1600 пар.

Как отмечает В.В. Петров, огромная батарея состояла иногда из 4200 медных и цинковых кружков, когда толщина их после многократного употребления и чищения становилась тоньше полулинии. Оценим возможное количество металлических кружков в этом случае. Толщина триады (два использованных металлических и один бумажный кружок) составляет 0,508 см, общая длина 400 триад — 203,2 см, незаполненными остались 101,6 см ряда. Для заполнения ряда новыми металлическими и бумажными кружками необходимо было использовать 133 триады, или 133 пары новых металлических кружков. В этом случае суммарное количество

триад в ряду составит 533, общее число медных и цинковых кружков в батарее Петрова — 4264 штуки, или 2132 пары.

Таким образом, результаты наших расчетов хорошо согласуются с данными, приводимыми в монографии В.В. Петрова, и опровергают утверждения о том, что батарея содержала 4200

пар медных и цинковых кружков, или 8400 металлических кружков [10, 11].

Сочинение В.В. Петрова «Известие о Гальвани-Вольтовских опытах» по глубине освещения явлений, связанных с воздействием электрического тока на различные объекты, не имело себе равных в России в течение многих лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенбергер, Ф. История физики. Ч. 3. История физики за последнее (XIX) столетие [Текст]: Вып. 1. / Ф. Розенбергер.— Пер с нем. под ред. И. Сеченова / Предисл. С.Ф. Васильева.— М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главн. ред. общетехн. лит-ры и номенклатуры, 1935.— 302 с.
2. Радовский, М.И. Гальвани и Вольта. К 150-летию открытия электрического тока [Текст] / М.И. Радовский / С предисл. акад. В.Ф. Миткевича.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1941.— 92 с.
3. Церава, Г.К. Дмитрий Алексеевич Голицын [Текст] / Г.К. Церава.— Л.: Наука, 1985.— 184 с.
4. Раскин, Н.М. Аполлос Аполлосович Мусин-Пушкин— вице-президент Берг-коллегии, химик и минералог (1760—1805) [Текст] / Н.М. Раскин.— Л.: Наука, 1981. 157 с.
5. Елисеев, А.А. Василий Владимирович Петров [Текст] / А.А. Елисеев.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949.— 180 с.
6. Елисеев, А.А. Из истории открытия электрической дуги в России [Текст] / А.А. Елисеев // Труды совещания по истории естествознания 24—26 декабря 1946 г.— М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948.— С. 120—131.
7. Самойлов, В.О. Василий Владимирович Петров— академик двух академий [Текст] / В.О. Самойлов.— Л.: 1987.— 101 с.
8. Петров В.В. Известие о Гальвани-Вольтовских опытах, которые проводил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоящей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-хирургической Академии [Текст] / В.В. Петров // Сб. к столетию со дня смерти первого русского электротехника академика Василия Владимировича Петрова (1761—1834) / Предисл. Г.И. Ломова / Под ред. Л.Д. Белькинд, Г.И. Ломова и А.М. Николаева.— М.-Л.: НКТП СССР. ОНТИ. Главн. редакция энергетич. лит-ры, 1936.— С. I—VIII, 1—195.
9. Шнейберг, Я.А. Василий Владимирович Петров. 1761—1834. [Текст] / Я.А. Шнейберг.— М.: Наука, 1985. 224 с.
10. Русский биографический словарь: Павел преподобный— Петр (Илейка) [Текст] / Издан под наблюдением председателя Императорского Русского исторического общ-ва А.А. Половцева.— СПб.: Тип. И.Н. Скороходова, 1902.— 711 с.
11. Данилевский, В.В. Русская техника [Текст] / В.В. Данилевский.— 2-е изд.— Л: Ленингр. газетно-журн. и книжн. изд-во, 1948.— 548 с.

УДК 001:66

С.Е. Александров, А.И. Демидов

ПРОФЕССОР АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ МОРАЧЕВСКИЙ

(к 85-летию со дня рождения)

1 октября 2011 года исполнилось 85 лет со дня рождения крупного ученого в области высокотемпературной электрохимии и физической химии металлов и сплавов доктора технических наук профессора кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического универ-

ситета, Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, лауреата Государственной премии Украины Андрея Георгиевича Морачевского и 60 лет его научно-педагогической и инженерной деятельности.

Андрей Георгиевич родился в Ленинграде в семье научного работника-химика Юрия (Ге-



оргия) Витальевича Морачевского, который в послевоенные годы был заведующим кафедрой аналитической химии в Ленинградском университете (ЛГУ) и заведующим лабораторией в Институте химии силикатов АН СССР.

А.Г. Морачевский окончил инженерный физико-химический факультет Ленинградского технологического института в 1950 году, выполнив при этом и дипломный проект и дипломную работу. Научным руководителем его дипломного проекта был профессор Александр Философович Алабышев (1905–1983) — крупный специалист в области высокотемпературной электрохимии и электрометаллургии легких металлов, руководителем дипломной работы — выдающийся химик-неорганик академик АН СССР Александр Абрамович Гринберг (1898–1966).

Начало инженерной деятельности Андрея Георгиевича проходило в Красноярске на Красноярском аффинажном заводе НКВД СССР (ныне АООТ «Красноярский завод цветных металлов») под руководством профессоров Ивана Яковлевича Башилова (1892–1953), крупнейшего специалиста в области редких и радиоактивных металлов, и Рудольфа Людвиговича Мюллера (1899–1964), одного из крупнейших специалистов в области структуры, физико-химии и электрохимии стеклообразных материалов. В 1952 году молодым инженером А.Г. Морачевским был предложен вариант технологии, который значительно отличался от первоначально используемого на заводе простотой аппаратного оформления и технологического контроля и значительно большей интенсивностью, что позволило на относительно небольших производственных площадях перерабатывать все обогащенные промпродукты завода.

В 1953 году руководитель его научного проекта профессор А.Ф. Алабышев, в те годы ректор Ленинградского политехнического института, предложил ему поступать в аспирантуру на кафедру общей химии, которой он руководил. После окончания аспирантуры в 1956 г. Андрей Георгиевич работает на кафедре «Физическая химия» (ныне кафедра «Физическая химия, микро- и нанотехнологии») факультета технологии и исследования материалов; занимал должности ассистента (1956–1962), доцента (1962–1971), профессора (1971–1973), заведующего кафедрой (1973–2002), в настоящее время он — профессор кафедры «Физическая химия, микро- и нанотехнологии».

В 1957 году А.Г. Морачевский защитил кандидатскую диссертацию. Им были проведены обширные исследования, результаты которых вошли в крупнейшие международные справочные издания, имеют высокий индекс цитируемости, послужили основой при решении целого ряда конкретных прикладных задач. Уже в 1965 году была опубликована небольшая монография А.Ф. Алабышева, М.Ф. Лантратова, А.Г. Морачевского «Электроды сравнения для расплавленных солей», в том же году книга была переведена и издана в США. В 1969 году Андрей Георгиевич защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В диссертационной работе «Исследование термодинамических свойств металлических систем, равновесий металл — соль и процессов сплавообразования при электролизе расплавленных солей с жидким катодом» был рассмотрен широкий круг вопросов, что позволило в дальнейшем выполнить ряд исследований прикладного характера.

А.Г. Морачевский принимал непосредственное участие во внедрении нового прогрессивного электролита для производства сплавов системы Рb-Na-K на одном из предприятий химической промышленности, в организации промышленного производства калия путем электролиза с жидким катодом, в разработке промышленной технологии получения натрия высокой чистоты для Белоярской атомной станции.

В 1971–1974 годы под редакцией и с дополнениями А.Г. Морачевского были изданы три тома справочника по расплавленным солям (Л.: Химия. Ленингр. отд-ние). В 1978 году совместно с А.Ш. Авалиани и В.Ю. Миндиным была опубликована монография «Жидкие катоды» (Тбилиси: Мецниереба, 182 с.).

Начиная с 70-х годов XX века на кафедре физической химии ЛПИ имени М.И. Калинина под руководством А.Г. Морачевского проводились исследования, направленные на создание среднетемпературных источников тока (ХИТ) различного назначения для автономных объектов. Основным заказчиком работ была организация, впоследствии ставшая известной как НПО «Энергия». Помимо работ, связанных с электрохимическими исследованиями систем и процессов, представляющих интерес для реализации среднетемпературных ХИТ, а также работ термодинамического или технологического характера, в сферу интересов А.Г. Морачевско-

го входили исследования в области электрохимии водных систем и в области электрохимии нитратных расплавов.

В 1986 году за работу «Физико-химических основы, технология и промышленное производство сверхчистых металлов (ртуть, кадмий, цинк, свинец, висмут, галлий, индий, таллий, теллур)» авторскому коллективу, в состав которого входил А.Г. Морачевский, была присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники.

В 1987 году А.Г. Морачевским совместно с И.Б. Сладковым был опубликован справочник «Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений. Экспериментальные данные и методы расчета» (Л.: Химия, 188 с.), который был переведен и издан в Японии. В 1991 году совместно с Л.Ф. Козыным была опубликована монография «Физико-химия и металлургия высокочистого свинца» (М.: Металлургия, 224 с.), в 1992 году в соавторстве — монография «Натрий. Свойства, производство и применение» (СПб.: Химия, 312 с.), в 2000 году — «Калий. Свойства, производство, применение» (М.: Изд. дом «Руда и металлы», 192 с.).

В 1990—1991 годы в связи с экологическими проблемами и геополитическими изменениями А.Г. Морачевский переключился на актуальную проблему современной России — технологию переработки отслуживших свой срок свинцовых аккумуляторов. Результаты исследований по этой теме, выполненных на кафедре физической

химии СПбГПУ под его руководством за последние двадцать лет, нашли отражение в монографии «Физико-химия рециклинга свинца» (СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 270 с.).

В проведении научных исследований на кафедре физической химии большую роль играли аспиранты, А.Г. Морачевский был руководителем 54-х аспирантов или соискателей, успешно защитивших диссертации в различных диссертационных советах.

В последние 15 лет, наряду с основной научно-педагогической работой, Андрей Георгиевич занимается вопросами истории химии. В 2002—2009 годах им опубликованы в издательстве СПбГПУ шесть сборников очерков об ученых-химиках России и зарубежных стран, а в 2010—2011 годах — книги об академиках Н.С. Курнакове, А.А. Байкове, В.А. Кистяковском, члене-корреспонденте АН СССР В.Е. Грум-Гржимайло.

Андрей Георгиевич — автор более тысячи научных работ, в том числе 70 изобретений, 50 книжных изданий. А.Г. Морачевский — заместитель главного редактора «Журнала прикладной химии РАН», член редколлегии журнала «Расплавы» РАН, член диссертационного совета при СПбГПУ.

В 1991 году за заслуги в научно-педагогической деятельности Указом Президента РСФСР Б.Н. Ельцина А.Г. Морачевскому было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

Попечительский совет Санкт-Петербургского государственного политехнического института присоединяется к поступившим в адрес Андрея Георгиевича многочисленным поздравлениям и желает ему дальнейших творческих успехов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АБАКУМОВ Игорь Игоревич — аспирант кафедры автоматизации производственных процессов Северо-Западного государственного заочного технического университета

191186, Санкт-Петербург, Миллионная ул., д. 5
(812) 335-26-18

АЛЕКСАНДРОВ Сергей Евгеньевич — доктор химических наук профессор, заведующий кафедрой физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-61-71
saalexandrov@ftim.spbstu.ru

АТОЯН Грант Леонович — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)294-22-62
ato.bmg@gmail.com

БАЛОВ Анатолий Васильевич — доктор технических наук профессор, ведущий специалист Российского института радионавигации и времени

191124, г. Санкт-Петербург, пл. Растрелли, д. 2
(812)577-10-41
office@rirt.ru

БЕЛОВ Вячеслав Вячеславович — доктор технических наук профессор кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-61-45
belov@cef.spbstu.ru

БОГУСЛАВСКИЙ Илья Зеликович — доктор технических наук, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
тел./факс (812) 552-85-30
B-iz@yandex.ru

БУЛАТОВ Виталий Владимирович — старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов Северо-Западного государственного заочного технического университета.

191186, Санкт-Петербург, Миллионная ул., д. 5, СЗТУ
(812) 335-26-18
bulatov-vitaly@rambler.ru

БУНТЕЕВ Юрий Евгеньевич — магистрант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ВЛАСОВ Андрей Вячеславович — докторант кафедры автоматизации технологических процессов Саратовского государственного технического университета.

413800, г. Балаково, ул. Транспортная, д. 4, БИБиУ
(8453) 32-57-88; 32-57-14
Факс: 8(8453) 32-57-88
bibu_rect@mail.ru

ГАЛЁРКИН Юрий Борисович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-65-80
galerkin@mebil.stu.neva.ru

ГАНИН Сергей Владимирович — аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-52
S.V.Ganin@gmail.com

ГИРГИДОВ Артур Давидович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-64-01, 297-84-15
gidravlika@cef.spbstu.ru

ГИРШОВ Владимир Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-52

ГОНСАЛЕС Илиана — соискатель кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета, преподаватель Горно-металлургического института им. Антонио Нуньеса Хименеса (Моя, Куба).

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ГОРЕЛОВ Александр Стефанович — кандидат технических наук доцент кафедры технологических систем пищевых и перерабатывающих производств Тульского государственного университета.

300600, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, Тульский государственный университет
(4872) 33-24-38
asgorelov@rambler.ru

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — кандидат физико-математических наук начальник научно-исследовательского отделения Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
(812)-294-47-36
gna@rtc.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)248-91-93
kaf-uzchs@mail.ru

ДЕМИДОВ Александр Иванович — доктор химических наук профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-63-87
ph-chem@ftim.spbstu.ru

ЕВГРАФОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук профессор, заведующий кафедрой теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-48-45.

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

ЗОЛОТОВ Александр Максимович — доктор технических наук, профессор кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-52
prf_zam@mail.ru

ИВАНОВ Евгений Константинович — старший преподаватель кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения, соискатель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ПИМаш
(812)540-58-37

КАЛИМОВ Александр Гелиевич — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ.
(812) 552-75-72
kalimov@sptu.spb.su.

КАРПОВ Алексей Сергеевич — аспирант кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-50-72

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812)552-75-31

КИСЕЛЁВ Владимир Геннадьевич — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 2474828

kis_vg@mail.ru

КОНОВАЛОВ Юрий Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры электропривода и электрического транспорта Иркутского государственного технического университета.

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, НИ ИрГТУ (3952) 41-25-41

irvaskon@mail.ru

КОРБУТОВ Иван Иванович — начальник мобильного отдела и специальных программ Министерства образования и науки.

125009, Москва, ул. Тверская, д. 11

(495) 629-29-35

КОРТИКОВ Николай Николаевич — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-73

n-kortikov@yandex.ru

КОСТИН Владимир Николаевич — кандидат технических наук профессор кафедры электроснабжения Северо-Западного государственного заочного технического университета.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5

(812) 335-26-00 доб. 51-19

kostin_vn@mail.ru

КОТОВ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-89-52

plast-ftim@mail.ru

КОЧКАРЁВ Дмитрий Алексеевич — аспирант факультета ГНУ ЦНИИ РТК Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, электроник 61 отдела Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21

(812)-552-43-90

kochdim83@mail.ru

КРАВЧЕНКО Илья Владимирович — аспирант кафедры электроснабжения Северо-Западного государственного заочного технического университета.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5

(812) 335-26-00 доб. 51-19

kravchenko@odusz.so-ups.ru

КРУГЛОВ Александр Владимирович — аспирант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

(812) 328-82-70

КРУЧЕНИНА Ирина Юрьевна — кандидат технических наук заместитель директора по научной работе Института химии силикатов РАН (ИХС РАН).

199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2, ИХС РАН

(812)-325-40-79

ikruch@isc.nw.ru

КРЫЛОВ Николай Александрович — доцент кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения.

195197, Санкт-Петербург, Полостровский пр., д. 14, ПИМаш

(812)540-58-37

КУЗНЕЦОВ Василий Александрович — студент кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

(812) 328-82-70

КУЗНЕЦОВ Михаил Валерьевич — аспирант кафедры сварки и лазерных технологий, ведущий инженер Российско-германского центра лазерных технологий при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ

тел./факс(812) 552-98-43

kuznetsov_mich@ltc.ru

КУКАЛЕНКО Борис Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 5526429

КУЛИНКОВИЧ Алексей Викторович — кандидат химических наук докторант кафедры 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
geochem@mail.ru

КУЛЬЧИЦКИЙ Александр Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизации производственных процессов Северо-Западного государственного заочного технического университета.

191186, Санкт-Петербург, Миллионная ул., д. 5
(812) 335-26-18
doz-ku@rambler.ru

КУРИКОВ Николай Николаевич — аспирант кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 552-77-70
kurikov_n@rambler.ru

МАЗУРЕНКО Иван Александрович — аспирант кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-49-05
corner2007@rambler.ru

МАЗУРОВ Сергей Александрович — аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-52

МАСЛИКОВ Владимир Иванович — доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
vmaslikov@list.ru

МАТВЕЕВ Юрий Владимирович — аспирант кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

МИРОНОВА Марина Викторовна — аспирант кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 326-74-07 (раб),
m.mironova@rambler.ru; mironova_mv@lmz.power-m.ru

МИТРОФАНОВ Юрий Александрович — аспирант кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-21-36

МОДЯГИН Алексей Игоревич — инженер 61 отдела Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21
(812)- 552-43-90
from_da_future@mail.ru

МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-63-87

МОЛОДЦОВ Дмитрий Владиславович — ассистент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
kovu@bigcats.ru

НИКИТИН Станислав Евгеньевич — аспирант кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-61-45
nse85@mail.ru).

ОКРЕПИЛОВ Владимир Валентинович — доктор экономических наук профессор, заместитель председателя Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН, генеральный директор ФГУ «Тест-Санкт-Петербург».

190103, г. Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 291
(812) 575-00-93. 251-47-48, 251-46-48
okrepilov@rustest.spb.ru

ОСАДЧИЙ Александр Иванович — доктор технических наук профессор, старший научный сотрудник НОЦ «Безопасность в ЧС» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)294-22-62

ПАНТАЛЕЕВ Стефан Милчев — конструктор 2-й категории факультета технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ведущий инженер 61 отдела Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21
(812)- 552-43-90

ПЛОТНИКОВ Игорь Геннадьевич — аспирант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2
(812) 328-82-70
plotnikov_igor86@mail.ru

ПОПКОВ Евгений Николаевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-50-72
enpopkov@gmail.com

ПОПОВ Игорь Олегович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-21-36
prof.popov@yandex.ru

ПРЕЙС Владимир Викторович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой технологических систем пищевых и перерабатывающих производств Тульского государственного университета

300600, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, Тульский государственный университет
(4872) 33-24-38
preys@klax.tula.ru

ПУПЫШЕВ Андрей Михайлович — аспирант кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-21-36
lcrfun@rambler.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — доктор технических наук профессор кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

РАДКОВСКИЙ Андрей Константинович — студент кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

РОГАЧЕВСКИЙ Владимир Самойлович — кандидат технических наук ведущий специалист ОАО «Силовые машины», филиал «Электросила».

196000, Московский пр., д. 139, ОАО «Силовые машины», филиал «Электросила».
(812) 676-42-00 доб. 29 738

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук профессор, член-корреспондент РАН, ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
Тел.: +7 (812) 552-9714, факс: +7 (812) 552-6080
rector@spbstu.ru

САМАРИН Геннадий Николаевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой механизации животноводства и применения электрической энергии в сельском хозяйстве Великолукской государственной сельскохозяйственной академии, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники.

182100, г. Великие Луки, ул. Винавского, (корпус №4 ВГСХА)
(81153) 7-16-22
samaringn@yandex.ru

СЕМЁНОВ Александр Георгиевич — кандидат технических наук доцент и ведущий научный сотрудник кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-49-05

СЕМЁНОВА Кристина Андреевна — аспирант кафедры теории и истории государства и права юридического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-69-76

СКОТНИКОВА Маргарита Александровна — доктор технических наук профессор, заведующая кафедрой триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ПИМаш
(812) 540-58-37

СМИРНОВА Екатерина Александровна — аспирант кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-76-43
ekatherins@gmail.com

СНЕТКОВ Виталий Николаевич — доктор политических наук профессор кафедры теории и истории государства и права юридического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-69-76

СОКОЛОВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 535-16-32
sva0808@rambler.ru

СОЛДАТОВА Кристина Валерьевна — кандидат технических наук доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
8(812)552-65-80
buck02@list.ru

СОЛОВЬЕВ Юрий Владимирович — доцент кафедры электрических и электронных аппаратов электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)590-71-93
yury.solovyev@yahoo.com

СОМОНОВ Владислав Валерьевич — аспирант кафедры сварки и лазерных технологий, ведущий инженер Российско-Германского центра лазерных технологий при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
тел./факс(812) 552-98-43
vlad@ltc.ru

ТЕРЁХИН Сергей Николаевич — кандидат технических наук доцент, начальник кафедры автоматики и сетевых технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, подполковник внутренней службы.

196105 г. Санкт-Петербург, Московский пр. д. 149
(812) 388-99-63
expert_terehin@inbox.ru

ТЕРЁШИН Валерий Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-48-45.

ТРОФИМОВ Валерий Васильевич — кандидат физико-математических наук профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-67-26
vtrofimov@mail.ru

ТУМАНОВ Александр Юрьевич — доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
8(904) 333-57-35
toumanov@mail.ru

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук профессор кафедры сварки и лазерных технологий, декан факультета технологий и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
тел./факс (812) 552-98-43
gleb@ltc.ru

ТУРЫШЕВА Анна Вахтанговна — аспирант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70
anna_turysheva_21@mail.ru

УСТИНОВ Денис Анатольевич — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70
bescheiden@rambler.ru

ЧУСОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
chusov17@mail.ru

ФЕДОРОВ Михаил Петрович — доктор технических наук член-корреспондент РАН, профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
gspec@cef.spbstu.ru

ФИЛИПPOB Александр Геннадьевич — преподаватель кафедры автоматики и сетевых технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, старший лейтенант внутренней службы.

196105 г. Санкт-Петербург, Московский пр. д. 149
(812)388-99-63
filippovag@inbox.ru

ХРОСТИЦКИЙ Александр Аркадьевич — аспирант кафедры теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-48-45
hs2@mail.ru

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-80-90
plast-ftim@mail.ru

ЦВЕТКОВ Владислав Владиславович — доцент кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-49-05

ЦИБУЛЬСКИЙ Игорь Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
тел./факс (812) 552-98-43
igor@lrc.ru

ЧУЛКИН Сергей Георгиевич — доктор технических наук заведующий кафедрой машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 552-64-29
Uwc99@mail.ru

ШАБРОВ Николай Николаевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812)552-77-70
shabrov@rwwws.ru

ШИМАНСКИЙ Сергей Александрович — аспирант кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер-конструктор отдела проектирования электрических машин завода «Электросила» ОАО «Силовые машины»

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 657-87-13
s.a.shimanskiy@gmail.com

ШКЛЯРСКИЙ Андрей Ярославович — аспирант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ШКЛЯРСКИЙ Ярослав Элиевич — доктор технических наук член-корреспондент РАЕН, профессор кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ЮШИН Борис Альбертович — кандидат технических наук старший научный сотрудник НУТЦ «Электротехнологии», доцент кафедры электротехники и электротехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ

(812) 552-76-43

ЯБЛОКОВА Наталья Александровна — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения СПбГПУ, ведущий инженер управления главного металлурга ОАО «НПО Сатурн».

152903, г. Рыбинск, пр-т Ленина, д. 163

yabl-natalya@yandex.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Федоров М. П., Масликов В. И., Чусов А. Н., Молодцов Д. В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.

В статье рассматривается задача получения водорода из органосодержащих отходов для последующего его использования в низкотемпературных топливных элементах. Создан и протестирован экспериментальный лабораторный комплекс, включающий в себя модули: генерации биогаза, аккумуляирования и очистки биогаза, реформинга метана, очистки биоводорода и топливного элемента, позволяющий исследовать все стадии процесса получения биогаза с преобразованием его в водород.

ОРГАНОСОДЕРЖАЩИЕ ОТХОДЫ. БИОГАЗ. МЕТАН. ВОДОРОД. ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС.

Рассохин В. А., Забелин Н. А., Матвеев Ю. В. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ.

Рассмотрена роль децентрализованной энергетики в мировой энергетической безопасности, устройство и принцип работы микротурбинных установок, правовые и экономические аспекты. Представлен обзор микротурбинных технологий на российском рынке.

МИКРОТУРБИНА. ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА. РАЗВИТИЕ. ЭНЕРГЕТИКА. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ.

Кручинина И. Ю. О ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.

В статье рассмотрены пути повышения эффективности асинхронных двигателей за счет выбора материалов для массивного ротора с различными характеристиками и вариантов конструкции ротора (массивный, шлицованный, двухслойный). По данным аналитического и численного расчетов выявлены наиболее эффективные материалы и конструкции ротора; дана количественная оценка эффективности.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. МАССИВНЫЙ. ШЛИЦОВАННЫЙ. ДВУХСЛОЙНЫЙ. РОТОР.

Кравченко И. В., Костин В. Н. АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ МЕГАПОЛИСОВ.

Разработаны алгоритмы и принципиальные функциональные схемы микропроцессорного устройства автоматического ограничения снижения напряжения. Устройство позволяет при введении режима напряжения в допустимую область минимизировать объем отключаемой нагрузки. Обоснована и предусмотрена блокировка работы устройства при коротких замыканиях.

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. ЭНЕРГОСИСТЕМА МЕГАПОЛИСА. СНИЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ. ОТКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ. ВЫДЕЛЕНИЕ СТАНЦИИ.

Соловьев Ю. В., Самарин Г. Н. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ В ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ОБОРУДОВАНИЯ ВЛ 6–35 кВ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ПРИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ.

Проведен анализ условий зарождения и развития дефектов в полимерных конструкциях оборудования ВЛ 6–35 кВ с изолированными проводами при воздействии гололедно-ветровых нагрузок. Учитывая конструктивные особенности и физику изменения технического состояния изолированных проводов при климатических воздействиях, обоснованы предпосылки образования дефектных структур в изолированных проводах. На основе построенных адекватных моделей дефектов предложено математическое описание их динамических свойств в условиях их роста. Обоснованы ресурсные модели, позволяющие проводить оценку ресурсных показателей исследуемых конструкций и прогнозировать их техническое состояние в условиях эксплуатации. Практическая реализация предложенных моделей

позволяет повысить эффективность эксплуатации ВЛ 6–35 кВ с изолированными проводами и, в конечном итоге, надежность электроснабжения потребителей.

ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ. ИЗОЛИРОВАННЫЙ ПРОВОД. ДЕФЕКТ. РЕСУРС. ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ.

Шклярский Я. Э., Бунтеев Ю. Е., Радковский А. К., Кузнецов В. А. ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ.

В статье рассматриваются различные варианты измерения реактивной энергии при наличии высших гармоник напряжения и тока в электрической сети. Приведены алгоритмы расчета реактивной энергии, применяющиеся в различных типах электронных счетчиков. Построены зависимости измерений от различных составляющих на пятой и седьмой гармониках. Рассчитаны погрешности и представлены их максимальные значения. Данные, приведенные в статье, могут быть использованы на практике при построении систем измерения реактивной энергии в электрических сетях.

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ. СЧЕТЧИКИ. РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ПОГРЕШНОСТЬ.

Власов А. В. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СРЕДНЕЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

Рассмотрены вопросы расчета магнитного поля на средней линии постоянного магнита. Дан анализ двух основных конфигураций кольцевых постоянных магнитов.

НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ. ГРАДИЕНТ НАПРЯЖЕННОСТИ. УСИЛИЕ ОТРЫВА.

Шклярский Я. Э., Круглов А. В., Шклярский А. Я. УЧЁТ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСКАЖЕНИЯМИ.

В статье рассматривается актуальная тема — оплата за потребление электроэнергии. Особое внимание уделяется реактивной мощности и энергии. Показано, что применяемые в настоящее время счетчики реактивной энергии не отображают фактических затрат на ее передачу от источника и обратно. Предложены новые варианты учета факторов, влияющих на оплату за потребление электроэнергии.

ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ. СЧЕТЧИК.

Богуславский И. З. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ В ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКЕ МОЩНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПОСРЕДСТВОМ ЗАМКНУТОЙ АКТИВНОЙ ЦЕПНОЙ СХЕМЫ.

В каждом звене замкнутой цепной схемы содержится ЭДС, изменяющиеся от номера звена N по гармоническому закону. Такая цепная схема является математической моделью демпферных обмоток современных мощных синхронных машин (явнополюсные генераторы и двигатели, турбодвигатели и мощные турбогенераторы). Из полученных расчетных выражений для токов в продольных и поперечных элементах этой схемы следует, что они содержат три компоненты; из них только одна изменяется от номера звена N по гармоническому закону, две другие — по апериодическому.

ДЕМПФЕРНАЯ ОБМОТКА. РЕГУЛЯРНАЯ ЦЕПНАЯ СХЕМА. АПЕРИОДИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ. ЭДС КОНТУРА. ЯВНОПОЛЮСНАЯ МАШИНА. ТУРБОГЕНЕРАТОР. ТУРБОДВИГАТЕЛЬ.

Гонсалес И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И РАСЧЕТ ЕЕ РЕЖИМОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ.

Представлены различные методы моделирования элементов электрической сети при наличии высших гармоник в напряжении и токе, а также проведено их сравнение. Показано, что при расчете режимов работы сети необходимо учитывать поверхностный эффект и эффект от возникновения вихревых токов. При учете этих факторов погрешность расчета режимов потребления электроэнергии значительно уменьшается.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ. ГАРМОНИКИ. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ. НАПРЯЖЕНИЕ. МОЩНОСТЬ.

Устинов Д. А., Коновалов Ю. В., Плотников И. Г., Турышева А. В. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ.

Рассмотрены вопросы обеспечения рационального электропотребления нефтегазодобывающих предприятий путем формирования графиков электрических нагрузок. Построены профили графиков нагрузок отдельных подстанций и определены профили усреднённых графиков нагрузки нефтегазодобывающих предприятий в целом путем суммирования профилей графиков отдельных подстанций.

ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ. ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК. НОРМИРОВАННАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Карпов А. С., Кравченко И. В., Костин В. Н., Попков Е. Н. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЧАСТОТНОЙ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКИ.

Сформулированы принципы построения автоматизированной системы контроля эффективности действия частотной делительной автоматики, основанной на оценке текущего баланса мощности генерации, нагрузки и мощности, подведенной под действие системы автоматической частотной разгрузки.

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТОТНАЯ ДЕЛИТЕЛЬНАЯ АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТНАЯ РАЗГРУЗКА. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС.

Богуславский И. З., Рогачевский В. С. МЕТОД РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ В ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКЕ.

Использование в качестве базы нелинейной системы уравнений магнитосвязанных контуров, применяемой в практике для определения рабочих характеристик асинхронных машин, позволяет рассчитать и асинхронные режимы синхронных машин (явнополюсных и неявнополюсных). Для этого предварительно предусмотрен ряд линейных преобразований МДС и потока в комплексной плоскости; они представлены в виде комплексов символического метода. Разработан метод определения токов в элементах демпферных обмоток различной конструкции. Приведены практические примеры.

ГИДРОГЕНЕРАТОР. ДЕМПФЕРНАЯ ОБМОТКА. СТЕРЖНИ И КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИЕ КОЛЬЦА. НЕЯВНОПОЛЮСНАЯ МАШИНА. ЯВНОПОЛЮСНАЯ МАШИНА. МДС. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. АСИНХРОННЫЙ РЕЖИМ. ТУРБОДВИГАТЕЛЬ. ТУРБОГЕНЕРАТОР.

Киселёв В. Г. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.

В статье рассмотрены основные принципы проектирования катодной защиты наложенным током подземных металлических сооружений с использованием ряда практических формул, полученных в процессе развития методов электрохимической защиты. Повышенное внимание уделено оценке технико-экономической эффективности катодной защиты от коррозии.

КОРРОЗИЯ. ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Яблокова Н. А., Трофимов В. В. ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС РЕМОНТНЫХ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Проведены экспериментальные исследования ремонтных дисков компрессора низкого давления из сплава ВТЗ-1 методами рентгеноструктурного анализа. Разработана методика оценки остаточного ресурса ремонтных дисков по изменению структурного состояния материала дисков неразрушающим способом. Выявлены закономерности изменения структурных параметров, определяемых по изменению полуширины, смещению и интенсивности интерференционных линий, в зависимости от эксплуатационных параметров диска.

МЕТОДЫ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА. СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. МАКРОНАПРЯЖЕНИЯ. МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ. ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС. ДИСК КОМПРЕССОРЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.

Хростицкий А. А., Евграфов А. Н., Терёшин В. А. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ МЕХАНИЗМА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ.

Исследована общая методика геометрического анализа парадоксальных механизмов с избыточными связями на примере пространственного шестишвенника, в результате выявлен ряд особенностей, свойственных механизмам такого типа.

МЕХАНИЗМ. ИЗБЫТОЧНЫЕ СВЯЗИ. ОСОБОЕ ПОЛОЖЕНИЕ. ГЕОМЕТРИЯ.

Горелов А. С., Прейс В. В. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАССОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ.

Рассмотрены методологические основы автоматизированного статистического контроля качества продукции, обеспечивающие предпосылки для создания систем автоматизированного статистического контроля качества продукции в массовых поточных производствах.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. КОНТРОЛЬ. КАЧЕСТВО. ПЛАН. МАССОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО. АВТОМАТИЗАЦИЯ.

Хростицкий А. А., Терёшин В. А. СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПАРАДОКСАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА С ИЗБЫТОЧНЫМИ СВЯЗЯМИ.

В статье предлагается методика силового расчёта парадоксального механизма с избыточными связями на примере пространственного шестизвенника. В результате исследования определена обобщённая движущая сила и найдены реакции и моменты реакций в кинематических парах механизма.

МЕХАНИЗМ. ИЗБЫТОЧНЫЕ СВЯЗИ. СИЛОВОЙ РАСЧЁТ. ПОДАТЛИВОСТЬ.

Кукаленко Б. Д., Чулкин С. Г. УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МУФТ.

Уточнена методика расчета упруго-демпфирующих характеристик шинно-пневматических муфт. Показано, что полученные формулы расчета помогут оперативно решать задачу модернизации, проектирования и изготовления шинно-пневматических муфт с повышенными эксплуатационными параметрами в приводах судовых энергетических установок.

УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА. ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ МУФТА.

Мазуренко И. А., Семёнов А. Г., Цветков В. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований одного из возможных путей обеспечения стабилизации движения в пространстве подвижного объекта, главным образом автомобиля. Подтверждена принципиальная возможность создания системы стабилизации на основе акселерометров. Даны конкретные рекомендации и намечены планы дальнейших исследований.

ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО. СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ. ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЯ. АКСЕЛЕРОМЕТРЫ. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ.

Пупышев А. М., Попов И. О., Митрофанов Ю. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И ТИТАНА ПРИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ВОССТАНОВЛЕННОГО ТИТАНО-МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА.

Исследованы макрокинетические закономерности окислительного сернокислотного процесса выщелачивания железа из восстановленного при низких температурах (<1150 °С) хибинского титаномагнетитового концентрата. Изучены химический и фазовый составы полученного остатка выщелачивания — искусственного рутилового концентрата.

ТИТАНОМАГНЕТИТ. ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ. МАКРОКИНЕТИКА. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ.

Иванов Е. К., Скотникова М. А., Крылов Н. А. СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА.

В работе приведены экспериментальные данные, полученные с привлечением просвечивающей и растровой электронной микроскопии, об изменении геометрии, структуры и микротвердости стружки из сплавов ВТ23, АМц, ХВГ в интервале скоростей лезвийной обработки 2–6000 м/мин. Установлены закономерности взаимодействия динамической пластической деформации и разрушения на макро-, мезо- и микро- масштабных уровнях.

ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА. СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ. МИКРОТВЕРДОСТЬ. ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ И РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ.

Булатов В. В., Абакумов И. И., Кульчицкий А. А. МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОРОКОВ СТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ КАМЕРЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.

Автоматический визуальный контроль качества стекла необходим в современном производстве на предприятиях машиностроения. Для процесса контроля разработана оптико-электронная установка АДПС. Методика основана на программной обработке изображений, получаемых с камеры технического зрения.

КОНТРОЛЬ. СТЕКЛО. ПОРОКИ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. ПРОГРАММНЫЕ ФИЛЬТРЫ.

Золотов А. М., Цеменко В. Н., Котов С. А., Ганин С. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНОЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

Работа посвящена исследованию процесса деформирования при различных температурах порошковой композиции на основе алюминия. Обоснована методика проведения испытаний порошковых материалов на комплексе Gleeble 3800. Выбран температурный интервал для деформирования, и определены параметры реологических уравнений для данного материала.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. GLEEBLE 3800.



Атоян Г. Л., Корбутов И. И., Осадчий А. И. ОРГАНИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ.

Актуальность данной статьи состоит в том, что существующие системы сбора и обработки данных не могут полностью отвечать современным требованиям. Внедрение беспроводных сенсорных сетей в систему сбора данных и контроля экологической обстановки и будет дополнением существующих программно-технических комплексов, применяющихся в России.

МОНИТОРИНГ. СВЯЗИ. СЕНСОРНЫЕ СЕТИ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Гуменюк В. И., Кулинкович А. В. ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ.

Показана высокая токсичность трансурановых радионуклидов и сложность их экспрессного контроля в пресных природных водах. Предложен простой способ экспресс-контроля α -активной зараженности воды с использованием хемилюминесцентной реакции с люминол-геминовым реактивом. Выдвинуто предположение об изменении энергетических параметров водной среды и увеличении активных форм кислорода в точках фазовых переходов ионов урана.

ТРАНСУРАНОВЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ. ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ. ТОКСИЧНОСТЬ ТРАНСУРАНОВЫХ РАДИОНУКЛИДОВ. ЛЮМИНОЛ-ГЕМИНОВЫЙ РЕАКТИВ.

Гуменюк В. И., Кулинкович А. В. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ УРАНИЛОВ.

Показано, что существующие механизмы генерации активных форм кислорода в водных растворах соединений урана не учитывают возможность наработки радикальных форм за счет процессов фазовой трансформации связанной воды. Обосновывается необходимость изучения данного процесса с целью выявления показателей, указывающих на наличие в воде соединений урана.

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА; СВЯЗАННАЯ ВОДА. СОЕДИНЕНИЯ УРАНА. МЕТАЛЛЫ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ.

Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Сомонов В. В. ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ.

В статье изучена зависимость характера проплавления и свойств металла шва от расстояния «лазерный луч – дуга» при лазерно-дуговой сварке алюминиево-магниевых сплавов. Подтверждено, что присадочный материал компенсирует потери легирующих элементов при лазерно-дуговой сварке. Показана возможность повышения качества сварных швов с помощью сканирования лазерного луча.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. $AlMg$ -СПЛАВЫ. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Шабров Н. Н., Куриков Н. Н. АНАЛИЗ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.

Работа содержит краткое изложение основных достижений компьютерных технологий на кафедре технологий машиностроения СПбГПУ в области виртуальной реальности (*VR*) и дополненной реальности (*AR*) методов. Эти методы служат средством для визуализации виртуальных прототипов будущих продуктов и их поведения. *VR* и *AR* методы используются в СПбГПУ как части общего дизайна и моделирования деятельности.

VR методы особенно ценны, когда приходится иметь дело с большими массивами моделируемых или проектных данных, поскольку они обеспечивают более удобный и захватывающий способ для понимания анализируемых объектов или процессов. *VR* методы могут применяться для визуализации практически в любой области знаний, где используется компьютерный дизайн и моделирование: машиностроении, автомобильном производстве, гидродинамике, медицине, химии, городском планировании и т. д.

AR — новое направление интересов в области компьютерных технологий на инженерной кафедре. Оно дает возможность комбинирования реального мира с цифровыми моделями, открывает новый способ лучшей и быстрой интерпретации полученных результатов.

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ. ТРЕКИНГ СИСТЕМЫ. ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Калимов А. Г., Шиманский С. А. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

В статье рассматривается применение метода пространственных интегральных уравнений для расчета стационарных магнитных полей в трехмерных системах, включающих замкнутые ферромагнитные сердечники. Показано, что использование традиционной формулировки рассматриваемого интегрального метода для моделирования потоков в сердечнике трансформатора приводит к появлению значительной погрешности. В то же время применение векторных конечных элементов для аппроксимации напряженности магнитного поля внутри области, занятой материалом ферромагнетика, позволяет получить гораздо более точные и надежные результаты.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ТРАНСФОРМАТОР. НАМАГНИЧЕННОСТЬ. ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Грязнов Н. А., Кочкарев Д. А., Модягин А. И., Панталеев С. М. РЕГИСТРАЦИЯ ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗА СЦЕНЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКИ.

Проанализированы преимущества использования лазерно-телевизионной триангуляционной системы формометрии для реализации функции построения трехмерного портрета сцены в реальном времени. Рассмотрены вопросы применения структурированной лазерной подсветки при создании систем технического зрения реального времени для мобильных платформ и космических манипуляторов, функционирующих в автономном или полуавтономном режимах. На базе бионического подхода к проблеме анализа окружающей обстановки предложена идея аппаратного разделения систем технического зрения и оптического дистанционного осязания.

ФОРМОМЕТРИЯ. ДИСТАНЦИОННОЕ ОСЯЗАНИЕ. ЛАЗЕРНАЯ СТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОДСВЕТКА. МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА.

Кортиков Н. Н., Миронова М. В. ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПАРОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ.

В статье представлена математическая модель расчета сопряженного теплообмена в ротор-статорных зазорах с учетом реальных свойств пара, описанных с помощью специальных функций пользователя UDF (User defined functions) на базе газодинамического комплекса FLUENT.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ.

Гиргидов А. Д. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИНТА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.

Отмечена слабая зависимость потерь мощности на трение лопастей винта о воздух и затрат мощности на закручивание потока от скорости ЛА. Предлагается эти потери и затраты считать как части от соответствующих мощностей, реализующихся в неподвижном ЛА. Получена зависимость для полного КПД, структурно совпадающая с экспериментальной в области близких к единице значений идеального КПД. Установлено, что учет затрат мощности на закручивание потока позволяет оценить максимальные значения КПД винта.

ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ. ВОЗДУШНЫЙ ВИНТ. ПРОПЕЛЛЕР. ПРОФИЛЬНЫЙ. ОКРУЖНЫЙ И ИДЕАЛЬНЫЙ КПД ВИНТА. ЗАКРУЧИВАНИЕ ПОТОКА ЗА ВИНТОМ. ТРЕНИЕ ЛОПАСТЕЙ ВИНТА О ВОЗДУХ. МАКСИМУМ КПД ВИНТА.

Соколов В. А. ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В БАЙЕСОВСКОМ ПОДХОДЕ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ.

Приведены результаты исследования влияния изменений входной (априорной) информации на выходные (апостериорные) данные о состоянии диагностируемого объекта. Диагностирование выполнено с использованием вероятностных методов распознавания состояний сложных технических систем на основе байесовской процедуры. Для исследования влияния «входа» на «выход» интервалы вероятностей задавались с применением обобщенной модели Дирихле.

ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ. ФОРМУЛА БАЙЕСА. АПРИОРНЫЕ И АПОСТЕРИОРНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ СОСТОЯНИЙ. ИНТЕРВАЛЫ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. МОДЕЛЬ ДИРИХЛЕ.

Цеменко В. Н., Гиршов В. Л., Мазуров С. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

Методами компьютерного моделирования оценено влияние вытяжки и конусности матрицы на уплотняемость стальных капсул, заполненных порошком быстрорежущей стали 10P6M5-МП. Определено давление, развиваемое прессом в процессе экструдирования таких капсул.

ПОРОШКОВАЯ БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВАРИАНТЫ ЭКСТРУЗИИ. УПЛОТНЕНИЕ.

Галёркин Ю. Б., Солдатова К. В. РАЗРАБОТКА «ВИРТУАЛЬНЫХ» МОДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ 5-ГО ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

По проектам, выполненным Методом универсального моделирования, выпущено более 35 типов промышленных центробежных компрессоров. Газодинамические характеристики 17 компрессоров, полученные при заводских испытаниях, сопоставлены с проектными. После уточнения эмпирических коэффициентов характеристики моделируются во всем рабочем диапазоне с большой точностью. Характеристики 72-х ступеней, входящих в состав компрессоров, включены в банк данных для использования при разработке новых проектов.

МЕТОД УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ. МОДЕЛЬНЫЕ СТУПЕНИ.

Смирнова Е. А., Юшин Б. А. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ.

Предложен метод экспериментального исследования индукционного нагрева деталей с газотермическими покрытиями на основе физического моделирования. Представлены результаты лабораторного анализа структуры самофлюсующихся покрытий в результате индукционной обработки.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ОБРАБОТКА. ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ. ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ. САМОФЛЮСУЮЩИЕСЯ ПОКРЫТИЯ. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Белов В. В., Никитин С. Е. ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.

В статье рассматривается методика определения работоспособности изгибаемых железобетонных конструкций в агрессивных средах эксплуатации. Предлагается диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов с макротрещинами (швами). Приводятся результаты численных экспериментов и сопоставления с опытными результатами.

ИЗГИБАЕМЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. АГРЕССИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДЫ.

Смирнова Е. А. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ. ИНДУКЦИОННОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ.

Представлен обзор основных современных методов обработки газотермических покрытий. Предложен метод индукционного оплавления. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований индукционного нагрева деталей с самофлюсующимися покрытиями.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ОБРАБОТКА. ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ. ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ. САМОФЛЮСУЮЩИЕСЯ ПОКРЫТИЯ. НАГРЕВ СЛОИСТЫХ СРЕД. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА.

Туманов А. Ю. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОСФЕРЫ И ЗАЩИТЫ ОТ УГРОЗ В ЭНЕРГЕТИКЕ.

Исследованы модели и алгоритмы представления знаний для прогнозирования опасностей объектов техносферы и защиты от угроз в энергетике на примере опасного объекта — теплоэлектростанции. Выявлены сущности и атрибуты для создания базы знаний факторов риска опасного объекта.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. МОДЕЛЬ. АЛГОРИТМ. ОПАСНОСТЬ. ОПАСНЫЙ ОБЪЕКТ. ЭНЕРГЕТИКА. БАЗА ЗНАНИЙ.

Терехин С. Н., Балов А. В., Филиппов А. Г. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ МЧС РОССИИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

Рассмотрены типы систем позиционирования в закрытых помещениях. Представлены асинхронная и синхронная системы позиционирования. Рассмотрено применение псевдоспутников в системах навигации с обратной дальностью. Проведен анализ источников ошибок в системах позиционирования в закрытых помещениях.

ПСЕВДОСПУТНИК. ПСЕВДОЛИТ. СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ. МНОГОЛУЧЕВОСТЬ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Fedorov M. P., Maslikov V. I., Chusov A. N., Molodtsov D. V. THE EXPERIMENTAL COMPLEX FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM ORGANIC WASTES FOR USE IN FUEL CELLS.

The problem of producing hydrogen from organic wastes for use in low-temperature fuel cells is considered in the article. An experimental laboratory complex was created and tested. It includes the following modules: generation of biogas, storage and purification of biogas, methane reforming, purification biohydrogen and fuel cell module. The complex make possible to research all stages of the producing biogas process and converting it into hydrogen.

ORGANIC WASTES. BIOGAS. METHANE. HYDROGEN. FUEL CELL. EXPERIMENTAL LABORATORY COMPLEX.

Rassokhin V. A., Zabelin N. A., Matveev Y. V. GUIDELINES OF THE MICROTURBINE TECHNOLOGY IN RUSSIA AND ABROAD.

Role of the decentralized energetics in global energy security, device and the principle of microturbine systems, legal and economic aspects are considered.

OVERVIEW OF MICROTURBINE TECHNOLOGY IN THE RUSSIAN MARKET IS PRESENTED. MICRO-TURBINE. GAS TURBINE POWER PLANT. DEVELOPMENT. ENERGETICS. ELECTRICITY SUPPLY.

Kruchinina I. Yu. THE CHOICE OF DESIGNS AND MATERIALS INDUCTION MOTOR.

The Improvement of induction motor efficiency due to choice of solid rotor with different material characterizations and rotor design modification (solid, slitted, two-ply) are considered.

The most perspective modes of rotor materials and design are determined by numerical and analytical solutions; the quantitative efficiency estimation is produced.

EFFICIENCY. INDUCTION MOTOR. SOLID. SLITTED. TWO-PLY. ROTOR.

Kravchenko I. V., Kostin V. N. AUTOMATION LIMITED REDUCE THE VOLTAGE IN THE POWER SYSTEM FOR METROPOLIS.

The algorithms and the fundamental functionality of the microprocessor circuit of the automatic voltage reduction limits. The device allows the introduction of mode voltage in the acceptable range to minimize the amount of load shedding. Grounded and provides blocking of the device during short circuits.

RELIABILITY OF SUPPLY. THE POWER METROPOLIS. THE VOLTAGE DROP. LOAD SHEDDING. THE ALLOCATION OF THE STATION.

Solovyev Y. V., Samarin G. N. INVESTIGATION OF EXTREME CLIMATIC CONDITIONS IMPACTS ON DEFECTS BEHAVIOR IN POLYMERIC CONSTRUCTION ELEMENTS OF OHL WITH COVERED CONDUCTORS UNDER OPERATING VOLTAGES OF 6–35 KV.

Investigation of service conditions with different phenomena for defects behavior in elements of OHL with covered conductors under operating voltages of 6–35 kV is provided. With aspect to the construction design of covered conductors and condition changes under climatic impacts backgrounds for defect structures formation in metal parts as well as in protection polymeric layers of covered conductors are found. Using offered models mathematical description of defect properties dynamically changing in time is given. Approved OHL construction elements lifetime models help to assess its technical condition in time under service factors impact. Introduction of offered models in practice presents the opportunity to improve the efficiency of service operation and provide the reliability of power supply.

OVERHEAD LINE (OHL). COVERED CONDUCTOR. DEFECT. SERVICE LIFE. TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT.

Shklyarskiy Y. E., Bunteev Y. E., Radkovskiy A. K., Kuznetsov V. A. INFLUENCE OF THE HIGHER HARMONICS AT MEASUREMENT OF REACTIVE ENERGY IN ELECTRIC CIRCUITS.

In given article various variants of measurement of reactive energy in the presence of the higher harmonics of voltage and a current in an electric circuits are considered. Algorithms of calculation of the reactive energy, applied in various types of electronic meters are resulted. Dependences of measurements on various components on the fifth and seventh harmonics are constructed. Errors are calculated and their maximum values are presented. The data presented in article can be used in practice at construction of systems of measurement of reactive energy in electric circuits.

HIGHER HARMONICS. METERS. REACTIVE ENERGY. QUALITY OF ELECTRIC ENERGY. ERROR.

Vlasov A. V. CALCULATION OF MAGNETIC FIELD INTENSITY IN THE MIDLINE PERMANENT MAGNET.

The questions of the calculation of the magnetic field on the center line of the permanent Magnet. The analysis of the two main configurations of the annular permanent Magnets.

THE MAGNETIC FIELD STRENGTH. PERMANENT MAGNETS. VOLTAGE GRADIENT. BREAKOUT.

Shklyarskiy Y. E., Kruglov A. V., Shklyarskiy A. Y. ACTIVE AND REACTIVE POWER REGISTRATION IN ENERGY SUPPLY SYSTEMS WITH DISTORTIONS.

The article discusses topical issue devoted to paying for electricity consumption. This topic is discussed at the last few years. Particular attention is paid to reactive power and energy. It is shown that currently used reactive energy counters do not reflect the actual costs of energy transmission to and from the source and back. We propose new versions of accounting factors affecting the payment for electricity consumption.

CONSUMPTION. ELECTRICITY. REACTIVE POWER. COUNTER.

Boguslawsky I. Z. SIMULATION OF CURRENTS DISTRIBUTION IN DAMPER WINDINGS OF LARGE SYNCHRONOUS MACHINES BY MEANS OF ENCLOSED REGULAR CHAIN CIRCUIT.

In every link of the enclosed regular chain circuit contains EMF with changing from number of link N according to harmonic law. The methods of currents research and theirs distribution in the elements of enclosed regular chain circuits is given. In article receive the expressions for calculation of currents in all elements of circuit. They contain three components; only one change from number of link N according to harmonic law, two others – according to aperiodical law. The connection between this circuits and damper windings of large synchronous machines (salient pole and non salient pole types) is given.

DAMPER WINDING. REGULAR CHAIN CIRCUIT. APERIODICAL DISTRIBUTION OF CURRENTS. EMF. PHASE ANGLES. SALIENT POLE TYPE OF MACHINE. TURBOGENERATOR. TURBOMOTOR.

Gonsales I. ELECTRICAL NETWORK MODELING AND OF ITS MODES OF CALCULATION IN THE PRESENCE OF HARMONIC DISTORTION.

The article content different methods of modeling elements of the electrical network in the presence of harmonics in voltage and current, but also studied and compared. It is shown that when calculating the power network should be considered a surface effect and the effect on the occurrence of eddy currents. When accounting for these factors, the calculation error mode power consumption is significantly reduced.

ELECTRICAL NETWORK. HARMONICS. POWER FACTOR. VOLTAGE. POWER.

Ustinov D. A., Konovalov J. V., Plotnikov I. G., Turysheva A. V. PROBABILISTIC POWER CONSUMPTION CHARACTERISTICS OF OIL AND GAS INDUSTRY.

The questions of rational energy consumption of oil and gas companies, by creating graphs of electrical loads. Constructed chart profiles of individual loads and substations are defined profiles averaged schedules oil and gas industry as a whole, by summing the individual profiles schedules substations.

POWER CONSUMPTION. GRAPHICS ELECTRICAL LOADS. THE NORMALIZED CORRELATION FUNCTION. DISTRIBUTION LAW. PROBABILISTIC CHARACTERISTICS.

Karpov A. S., Kravchenko I. V., Costin V. N., Popkov E. N. PRINCIPLES OF THE AUTOMATED SYSTEM CONTROL EFFECTIVENESS OF AUTOMATIC FREQUENCY DIVIDING.

The principles of constructing an automated system for monitoring the effectiveness of the pitch frequency of automation based on an assessment of the current balance of power generation, load and capacity of the input to the system of automatic load shedding.

RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY. FREQUENCY DIVIDING AUTOMATIC. AUTOMATIC LOAD SHEDDING. SOFTWARE.

Boguslawsky I. Z., Rogachewsky W. S. CALCULATION METHOD OF THE ASYNCHRONOUS OPERATING OF LARGE SYNCHRONOUS MACHINES (TAKING INTO ACCOUNT THE DISTRIBUTION OF CURRENTS IN THE DAMPER WINDING).

Use as a base of non-linear system of equations for magnetically linked meshes used in practice for defining the duty of asynchronous machines lets you calculate and asynchronous operating of synchronous machines (salient pole and non salient pole types). The first provides a set of linear transformations of MMF and flux in the complex plane; they are presented as sets of symbolic method. A method for determining the currents in the elements of damper windings for varying constructions of large synchronous machines is developed. Practical examples are given.

HYDROGENERATOR. DAMPER WINDINGS. BAR. SHORT CIRCUIT RING. SALIENT POLE AND NON SALIENT POLE TYPES OF ELECTRICAL MACHINES. MMF. MAGNETIC FLUX. ASYNCHRONOUS PERFORMANCE. TURBO-MOTOR. TURBOGENERATOR.

Kiselev V.G. BASIC DESIGN PRINCIPLES OF CATHODIC PROTECTION OF UNDERGROUND METALLIC STRUCTURES.

In the article are examined the basic principles of the design of cathode protection by the superimposed current of underground metallic construction with the use of a number of the practical formulas, obtained in the process of the development of the methods of electrochemical protection. The increased attention is given to the estimation of the technical and economic effectiveness of cathodic protection.

THE KEYWORDS: CORROSION. CORROSION PROTECTION. ELECTROCHEMICAL PROTECTION. CATHODE PROTECTION. ECONOMIC EFFECTIVENESS.

Yablokova H. A., Trofimov V. V. RESIDUAL LIFE REPAIR DISK LOW PRESSURE COMPRESSOR X-RAY DIFFRACTION.

Experimental researches of repair discs of low pressure compressor (LPC) from alloy VT3-1 by methods X-ray diffraction (XRD) are spent. The method of determination of resource of repair disk to change the structural state of the disk material by non-destructive way is developed. The regularities of changes in structural parameters determined from the change in the half, the displacement and intensity of the interference lines, depending on the operating parameters of the disc are developed.

METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS. STRUCTURAL PARAMETERS. MACROSTRESSES. MICROSTRESSES. THE RESIDUAL RESOURCE. THE DISC LPC.

Hrostitsky A. A., Evgrafov A. N., Tereshin V. A. RESEARCH PROBLEM GEOMETRY FEATURES MECHANISM TO REDUNDANT LINKS.

We research a general method of geometrical analysis of the mechanisms of paradoxical with the redundant links as an example of spatial six-link of the mechanisms, as a result, reveals a number of features inherent in the mechanisms of this type.

MECHANISM. REDUNDANT LINKS. SPECIFIC POSITION. GEOMETRY.

Gorelov A. S., Prejs V. V. METHODOLOGICAL BASES OF THE AUTOMATED STATISTICAL QUALITY ASSURANCE OF PRODUCTION OF MASS PRODUCTIONS.

Methodological bases of the automated statistical quality assurance of production, providing preconditions for creation of systems of the automated statistical quality assurance of production in mass line productions are considered.

STATISTICAL METHODS. THE CONTROL. QUALITY. THE PLAN. MASS PRODUCTION. AUTOMATION.

Hrostitsky A. A., Tereshin V. A. POWER ANALYSIS OF PARADOXICAL MECHANISM WITH REDUNDANT LINKS.

The paper provides a methodology of calculation of power paradoxical with the redundant links as an example of spatial six-link of the mechanisms. The study defined a generalized driving force, and there are moments of reaction and the reaction mechanism in the kinematic pairs.

MECHANISM. REDUNDANT LINKS. CALCULATION OF POWER. SUPPLENESS.

Kukalenko B. D., Chulkin S. G. ELASTIC-DAMPING CHARACTERISTICS OF THE TIRE-TYPE PNEUMATIC CLUTCH.

The design procedure of elastic-damping characteristics of the tire-type pneumatic clutch is specified. It is shown, that the received formulas of calculation will help to solve operatively a problem of modernization, designing and manufacturing of the tire-type pneumatic clutch with the raised operational parameters in drives ship power.

ELASTIC-DAMPING CHARACTERISTIC. THE TIRE-TYPE PNEUMATIC CLUTCH.

Mazurenko I. A., Semenov A. G., Zwetkov V. V. THE STUDY OF THE POSSIBILITY STABILIZATIONS OF THE MOVING THE TRANSPORT FACILITY WITH USE SENSOR OF THE SPEEDUPS.

The Brought results theoretical and experimental studies of one of the possible ways of the provision to stabilizations of the motion in space rolling object, mainly car. It Is Confirmed principle possibility of the making the system to stabilizations on base sensor of the speedups. Concrete recommendations and intended plans further of the studies are Given.

THE TRANSPORT FACILITY. STABILIZATION of the MOTION. SENSORS of the SPEEDUP. AKSELEROMETRY. SYSTEM TO STABILIZATIONS OF THE MOTION.

Pupyshev A. M., Popov I. O., Mitrofanov J. A. INVESTIGATION OF PROCESSES OF SEPARATION OF IRON AND TITANIUM IN TITANOMAGNETITE CONCENTRATE LEACHING REDUCED.

Macrokinetic laws of oxidative sulfuric acid leaching of iron from reduced at low temperatures ($<1150^{\circ}\text{C}$) Hibinsky titanomagnetite concentrate was studied. Studied the chemical and phase resulting residue leaching - artificial rutile concentrate.

TITANOMAGNETITE. LEACHING. MICROKINETICS. PHASE COMPOSITION.

Ivanov E. K., Skotnikova M. A., Krylov N. A. STRUCTURALLY-PHASE TRANSFORMATIONS INTO DIFFICULTLY PROCESSABLE MATERIALS AS A WAY OF INCREASE OF WEAR RESISTANCE OF THE TOOL.

In this work with attraction of a transmission and scanning electronic microscopy the experimental result of change geometry, structure and microhardness of chip from alloys VT23, AMc, HVG in an interval of speeds of cutting treatment 2–6000 m / min are adduced. The laws of interplay of dynamic plastic deformation and destructions on macro-, mezo- and mikro- levels are established.

CUTTING TREATMENT. CUTTINGS FORMATION. MICROHARDNESS. TRANSMISSION AND SCANNING ELECTRONIC MICROSCOPY.

Bulatov V. V., Abakumov I. I., Kulchitsky A. A. THE METHOD OF DETECTING GLASS DEFECTS BASED ON MACHINE VISION.

Automatic optical visual quality control of glass is necessary in modern production at machine industry. An opto-electronic installation (ADDG) was developed for the verification process. The method is based on program processing of images from the camera machine vision.

CONTROL. GLASS. DEFECTS. MASHINE VISION. PROGRAM FILTERS.

Zolotov A. M., Tsemenko V. N., Kotov S. A., Ganin S. V. DEFINITION OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MECHANICALLY ALLOYED ALUMINIUM POWDER AT HIGT TEMPERATURES.

In the present work the process of deformation for powder composition based on aluminum at various temperatures is analysed. Test procedure for powder materials on Gleeble 3800 system is proved. The temperature interval for deformation is chosen, and parameters of the rheological equations for the given material are defined.

MECHANICAL ALLOYING, RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS, GLEEBLE 3800.

Atoyan G. L., Korbut I. I., Osadchy A. I. THE ORGANIZATION COLLECTING DATA ON THE STATUS OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE BASIS OF A WIRELESS SENSOR NETWORK.

The relevance of this paper is that the existing system of data collection and processing can not fully meet modern requirements. The introduction of wireless sensor networks in the collection system, environmental monitoring and will be a complement existing software and hardware systems in use in Russia.

MONITORING. COMMUNICATION. SENSOR NETWORKS. ECOLOGICAL CONDITIONS.

Gumenyuk V. I., Kulinkovich A. V. CHEMILUMINESCENT RAPID CONTROL OF URANIUM COMPOUNDS IN NATURAL WATERS.

High toxicity of transuranium radionuclides and complexity of their express control in fresh natural waters is shown. The simple way of express-control of α -active contamination of water is offered with use chemiluminescent reaction with a lujminol-gemin reagent. The assumption of change of power parameters of the water environment and increase in active forms of oxygen in points of phase transitions of ions of uranium is put forward.

TRANSURANIUM RADIONUCLIDES. EXPRESS-CONTROL. CHEMILUMINESCENT ANALYSIS. TOXICITY OF TRANSURANIUM RADIONUCLIDES. LJUMINOL-GEMIN REAGENT.

Gumenyuk V. I., Kulinkovich A. V. ANALYSIS OF EXISTING MECHANISMS OF GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN IN URANIUM WATER SOLUTIONS.

It is shown that existing mechanisms of generation of active forms of oxygen in water solutions of connections of uranium don't consider possibility of an operating time of radical forms at the expense of processes of phase transformation of the connected water. Necessity of studying of the given process for the purpose of revealing of the indicators specifying in presence in water of connections of uranium is proved..

CHEMILUMINESCENT EXPRESS-CONTROL. GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN. CONNECTED WATER. CONNECTIONS OF URANIUM. METALS OF VARIABLE VALENCY.

Turichin G.A., Tsibulsky I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V. LASER - ARC WELDING OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS.

In article dependence of character of profusion and properties of metal of a seam on distance a laser beam – arc is studied at laser-arc welding of Al-Mg alloys. It is confirmed that adding material compensates losses of alloying elements at laser-arc welding. Possibility of improvement of quality of welded seams by means of scanning of a laser beam is shown.

LASER - ARC WELDING. Al-Mg ALLOYS. SYSTEM OF REGISTRATION OF THE PLASMA TORCH. MODELLING.

Shabrov N. N., Kurikov N. N. ANALYSIS AND VISUALIZATION OF RESEARCH RESULTS THROUGH VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY.

This work contains a brief summary of main achievements of Computer Technologies in Engineering Dept. of the SPbGPU in the field of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) techniques. These techniques are means to visualize virtual prototypes of future products and their behavior. VR and AR techniques are used in SPbGPU as parts of overall design and simulation activities.

VR techniques become especially valuable when one has to deal with large amounts of simulation array or design data as they provide a more comfortable and immersive way to comprehend analyzed objects or processes. VR techniques can be applied for visualization in almost any field of knowledge where computer design and simulation take place: mechanical engineering, automotive production, fluid dynamics, medicine, chemistry, urban planning, etc.

AR is a new field of interest of Computer Technologies in Engineering Dept. Giving a possibility to combine the real world with digital models, it opens a new way to better and faster understand and interpret obtained results.

VIRTUAL REALITY. TRACKING SYSTEMS. AUGMENTED REALITY. SIMULATION/

Kalimov A. G., Shimansky S. A. APPLICATION OF THE VECTOR FINITE ELEMENTS FOR INCREASING ACCURACY OF THE MAGNETIC FIELD COMPUTATION IN ELECTRICAL TRANSFORMERS.

In this paper application of the space integral equation method for computation of the magnetic fields in 3D systems including closed ferromagnetic yokes is considered. It is demonstrated, that conventional approach to the solution of this problem, based on the approximation of the magnetization vector in the iron cores leads to enormously big errors. At the same time application of the vector finite elements for approximation of unknown field intensity allows to get accurate and reliable results.

MAGNETIC FIELD. TRANSFORMER. MAGNETIZATION. INTEGRAL EQUATION. FINITE ELEMENT METHOD.

Gryaznov N.A., Kochkarev D. A., Modyagin A. I., Pantaleev S.M. 3D IMAGE REAL-TIME RECORDING BY STRUCTURED LIGHT APPLICATION.

Advantages of using laser-TV triangular shape-measuring system allow us to consider it as the promising technique for 3D scene image recording in real time. Application of structured light for creation of real-time machine-vision systems is considered for mobile robots and space manipulators, operating in autonomous and partly autonomous mode. Bionic approach to the problem of environment analysis results in an idea to separate machine vision system from the optical distant touching one.

SHAPE MEASUREMENT. DISTANT TOUCHING. LASER STRUCTURED LIGHTING. MOBILE PLATFORM. TV CAMERA.

Kortikov N. N., Mironova M. V. THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF THERMAL STATE OF HIGH-TEMPERATURE TURBINE ELEMENTS COOLED BY STEAM.

The paper presents the mathematical model for calculation of the conjugate heat transfer in rotor-stator gaps with real gas effects described by means of special User Defined Functions which are added to the gas-dynamic soft ware package FLUENT.

STEAM TURBINE. SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS. COMPUTER SIMULATION. CONJUGATE HEAT TRANSFER. COOLING SYSTEM.

Girgido v A. D. EFFICIENCY ESTIMATION OF AIRSCREW.

The values of the power loss due to air friction on propeller blades and the power input to swirling of air have a weak dependence on aircraft velocity.

To consider these two values as a part of the relevant power of immobile aircraft is proposed. The relationship for efficiency similar to experimental one is derived. Inclusion of swirling power in power balance makes it possible to obtain the maximum of airscrew efficiency.

AIRCRAFT. AIRSCREW. PROPELLER. AIR FRICTION ON BLADES. SWIRLING OF AIR. EFFICIENCY. MAXIMUM OF AIRSCREW EFFICIENCY.

Sokolov V. A. INTERVAL METHODS IN THE BAYESIAN APPROACH TO THE BUILDING STRUCTURES TECHNICAL CONDITION DIAGNOSIS.

The paper describes research results of the influence of changes in the prior information on the posterior data for the diagnosed object state. The diagnosis is conducted with the help of probabilistic methods of the complex engineering systems state recognition based on the Bayesian procedure. Probability intervals were determined by using the generalized Dirichlet model in order to research the influence of the prior information on the posterior data.

INTERVAL METHODS. THE BAYESIAN FORMULA. STATE PROBABILITIES. PROBABILITY INTERVALS. THE DIRICHLET MODEL.

Tsemenko V. N., Hirschov W. L., Mazurov S.A. MODELLING OF HOT EXTRUSION OF POWDER HIGH-SPEED STEEL.

The influence of reduction and matrix cone on compatibility of capsules is estimated with computer modeling of hot extrusion process. The capsules with powder high speed steel 10R6M5-MP were modeled to extrude. Pressure of the extrusion was estimated.

POWDER HIGH SPEED STEEL. COMPUTER MODELING. VARIANTS OF EXTRUSION. COMPACTION.

Galerkin Y. B., Soldatova K. V. WORKING OUT OF «VIRTUAL» MODELLING STEPS BY MEANS OF PROGRAMS OF 5 TH GENERATION OF THE METHOD OF UNIVERSAL MODELLING.

Under the projects executed by the Method of universal modeling it is let out more than 35 types of industrial centrifugal compressors. The gas dynamic characteristics of 17 compressors received at production tests, are compared with the design. After specification of empirical factors, characteristics are modelled in all working range with the big accuracy. Characteristics of 72 steps which are a part of compressors are included in a databank for use by working out of new projects.

THE METHOD OF UNIVERSAL MODELLING. EMPIRICAL FACTORS. CENTRIFUGAL COMPRESSORS. MODELLING STEPS.

Smirnova E. A., Yushin B. A. EXPERIMENTAL RESEARCH METHODS FOR INDUCTIVE HEATING OF COATED PARTS.

Method of experimental research of inductive parts with gas-thermal coatings based on physical simulation is put forward. Results of laboratory analysis for self-fluxing coatings structure subsequent to induction heat treatment are introduced.

INDUCTION HEATING. HIGH FREQUENCY TREATMENT. COATING TREATMENT. RUNNING ABILITIES IMPROVEMENT. PLASMA COATINGS. SELF-FLUXING COATINGS. PHYSICAL MODEL EXPERIMENT. EXPERIMENTAL TEST PROCEDURE.

Belov V. V., Nikitin S. E. VERIFICATION CORROSION-DAMAGED REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS MODEL.

In the publication estimation of reinforced concrete constructions durability under the influence of hazard environment is being discussed. The diachronic deformation model of corrosion-damaged reinforced concrete elements with cracks/joints is suggested. Numerical results and comparison with practical experiments are presented.

REINFORCED CONCRETE. DURABILITY. CORROSION INFLUENCE.

Smirnova E. A. SELF-FLUXING COATINGS TREATMENT METHODS. INDUCTIVE VITRIFICATION.

A review of main contemporary methods for gas-thermal coatings treatment is presented. Inductive vitrification method is introduced. Results of theoretical and experimental researching for induction heating of pieces with self-fluxing coating are introduced.

INDUCTION HEATING. HIGH FREQUENCY TREATMENT. COATING TREATMENT. RUNNING ABILITIES IMPROVEMENT. PLASMA COATINGS. SELF-FLUXING COATINGS. MULTILAYER MATERIALS INDUCTION HEATING. MATHEMATIC SIMULATION OF HEATING PROCESS.

Tumanov A.Y. MODELS AND ALGORITHMS FOR FORECASTING HAZARDS OBJECTS TECHNOSPHERE AND THREAT PROTECTION IN ENERGY.

In article models and algorithms of representation of knowledge for forecasting of dangers of objects of a technosphere and protection against threats in power on an example of dangerous object — thermal power stations are investigated. Are revealed essence and attributes for creation of the knowledge base of risk factors of dangerous object.

FORECASTING. MODEL. ALGORITHM. THE DANGER. DANGEROUS OBJECT. POWER. THE KNOWLEDGE BASE.

Terehin S. N., Balov A. V., Filippov A. G. THE ANALYSIS OF FACTORS AND PRINCIPLES OF FUNCTIONING OF POSITIONING SYSTEMS OF STATE FIRE SERVICES OF EMERCOM OF RUSSIA INDOORS OF BUILDINGS AND STRUCTURES.

It is considered the types of positioning systems indoors. Asynchronous and synchronous positioning systems are represented. The application of pseudo-satellite in the navigation systems with a reverse range is considered. The analysis of sources of error in positioning systems indoors was held.

PSEUDO-SATELLITE. PSEUDO-LIT. NAVIGATION AND POSITIONING SYSTEMS. MULTIPATH.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

№ 4 (135) 2011

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Учредитель — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция

академик РАН *Ю.С. Васильев* — председатель редакционной коллегии
д-р ист. наук профессор *Р.В. Дегтярева* — заместитель председателя
д-р техн. наук профессор *В.Н. Боронин* — заместитель председателя
канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова* — научный редактор, корректор
Н.П. Измайлова — помощник выпускающего редактора
О.А. Матенев — технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Подписано в печать 28.12.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 39,5. Тираж 1000. Заказ 609.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ» Серия «Наука и образование»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Госкомпечати РФ (свидетельство № 013165 от 23.12.94) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; СТРОИТЕЛЬСТВО; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Журнал выпускается в пяти сериях:

1. Физико-математические науки.
2. Экономические науки.
3. Наука и образование.
4. Информатика. Телекоммуникации. Управление.
5. Гуманитарные и общественные науки.

Периодичность выхода серии журнала «Наука и образование» – 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рекомендация на имя заместителя главного редактора журнала, подписанная научным руководителем автора и/или руководителем структурного подразделения. Рекомендация должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости 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