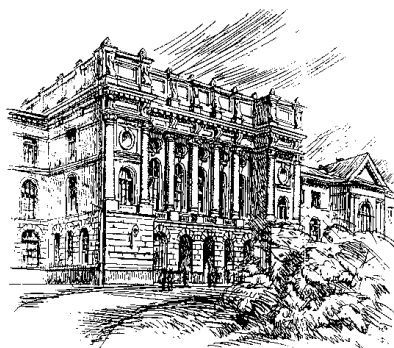


4(159)/2012



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПБГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012

Содержание

Энергетика. Электротехника

Тендлер М.Б., Третьяк Д.В. Перспективы энергетики в XXI веке	7
Богуславский И.З., Иванов В.Г., Рогачевский В.С., Турусов С.Е. Метод определения МДС обмотки статора для исследования эксплуатационных характеристик частотно-регулируемых двигателей .	10
Зайцев А.В., Костин В.Н. Автоматика ограничения частоты при аварийном выделении энергорайона с избытком генерируемой мощности	17
Шакиров М.А. Теория трансформаторов. Часть 2: Идеализированный трансформатор с обмотками конечной толщины	21
Богов И.А., Безухов А.П., Суханов В.А., Волковицкий И.Д., Донцов Н.Ю. Стенд для исследования рабочих процессов в паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсационных установках	52
Иванов В.Н., Иванов Д.В. Распространение электромагнитной энергии в системе, состоящей из токоподводов, индуктора и нагреваемой детали	59
Зайцев А.В., Костин В.Н. Автоматизированная система контроля эффективности действия автоматики ограничения повышения частоты	69
Косоруков А.В., Титков В.В. Расчет перенапряжений в кабельных линиях вторичных цепей при последующих ударах молнии	73
Шклярский Я.Э., Добуш В.С. Влияние энергетических характеристик нелинейной нагрузки на определение параметров электрической сети	77
Каган А.В., Виноградов А.Л. Математическая модель асинхронной машины с различными видами асимметрии	81

Машиностроение. Металлургия и материаловедение

Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А. Об изменении коэффициента поперечной вязкопластической деформации	85
Фукс М.Д., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П. Длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26H33C252	92
Васильева Е.С., Кидалов С.В., Шевырталов С.Н., Кольцова Т.С. Получение и структура порошков меди, дисперсно-упрочненной детонационными наноалмазами с использованием метода распыления растворов	97
Цзи Пугуанг, Сизова И.А., Климова О.Г. Синтез, структура и свойства композиционных материалов на основе меди, упрочненных наноразмерными включениями оксида алюминия	100
Мишин М.В., Александров С.Е., Кретушева И.В., Боричева И.К. Формирование фрактальных структур микрометрового размера из наночастиц диоксида кремния	105
Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Шелюховская Д.В. Распределение магния в металле шва при лазерно-дуговой сварке алюминиево-магниевого сплавов	110
Протопопова В.С., Александров С.Е., Шаганов А.П., Лесин С.В. Исследование морфологии никелевых слоев, полученных из бис-(этилциклопентадиенил) никеля	116
Бундур М.С., Прокопенко В.А., Пелевин Н.А. Повышение эксплуатационно-технических характеристик технологического оборудования	121
Максаров В.В. Повышение эффективности процесса резания за счет локальной мегастабильности.	128

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

Бритвин С.Н., Глуховской А.В., Коршунов А.В. Установка для демеркуризации люминесцентных ламп с фильтрацией ртути на адсорбенте из диоксида титана и селена	133
Грязнов Н.А., Кочкарев Д.А., Хохряков С.В., Широков А.А. Распределенные сети на базе сверх-малых космических аппаратов для измерения напряженности магнитного поля Земли	138
Агеев В.О., Качанова Т.Л., Фомин Б.Ф., Фомин О.Б. Аналитическая подготовка реинжиниринга производства металлопродуктов на основе системного знания	141
Григорьев Б.С., Головин О.А., Викторов Е.Д., Кудряшов Е.В. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог	155
Никитков Н.В., Дорофеев П.А. Выявление доминирующего фактора, вызывающего трещины в поверхностном слое шлифуемых заготовок из твердых хрупких материалов	162
Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю. Метод расчета энергозатрат на движение колесной транспортной машины	168
Поляков П.А. Аналитический метод определения средних температур рабочих поверхностей обода тормозного барабана	173
Гучинский Р.В., Петин С.В. Разработка узла конструкции судна по условию усталостной долговечности	177
Маслов В.И., Седлер М.И. Повышение качества управления процессами подготовки научных статей к публикации	186

Природопользование

Козырев С.В., Кораблев В.В., Якуцени П.П. Новый фактор экологического риска: лекарственные вещества в окружающей среде и питьевой воде	195
Петров Н.В., Гуменюк В.И. Причины таяния полярных шапок планеты	201
Гуменюк В.И., Куликович А.В. Влияние естественных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах уранилов	210

Строительство

Петриченко М.Р., Петросова Д.В., Петроченко М.В. Фильтрационный перенос воздухом консервативной примеси (температуры и теплоты) сквозь стену	221
Киселёв В.Г. Оценка защищенности подземных металлических сооружений от коррозии	226

Вопросы образования

Лагушкин С.Г. Совет ректоров вузов Ленинграда: структура и основные направления деятельности (70-е — 80-е годы XX века)	232
Горюнов В.П. Об инженерном образовании на «Санкт-Петербургском образовательном форуме — 2012»	247
Митрофанов А.М., Никулина С.П. Повышение эффективности выполнения государственного задания на НИР в вузе	249

Хроника событий

Демидов А.И. Профессор В.Е. Грум-Гржимайло о проблемах высшего и среднего специального образования в России	253
Кесаманлы М.Ф., Кесаманлы Ф.П. Политехники, прославившие нашу страну. Член-корреспондент АН СССР Павел Павлович Кобеко	255
Липин В.А. А.К. Ван-дер Беллен — забытое имя в истории отечественной цветной металлургии ..	261
Сведения об авторах. Контактные данные	269
Аннотации. Ключевые слова	276



Contents

Energy. Electrical engineering

Tendler M.B., D.V. <i>Tretiak Future energy XXI Century</i>	7
Boguslawsky I.Z., Ivanov V.G., Rogachevsky V.S., Turusov S.E. <i>Determination stator winding MMF method of frequency controlled a.c. machines for their performance investigation</i>	10
Zaitsev A.V., Kostin V.N. <i>Automatic frequency limitations accidental release power district with excess power generated</i>	17
Shakirov M.A. <i>Theory of transformers. Part 2: Idealized winding transformer with finite thickness</i>	21
Bogov I.A., Bezukhov A.P., Sukhanov V.A., Volkovitsky I.D., Dontsov N.Y. <i>Stand for research workflows in steam turbine air-condensing units</i>	52
Ivanov V.N., Ivanov D.V. <i>The propagation of electromagnetic energy in the system consisting of current leads, inductor and heated workpiece</i>	59
Zaitsev A.V., Kostin V.N. <i>Automated system for monitoring the effectiveness of the automatic increase in the frequency limits</i>	69
Kosorukov A.V., Titkov V.V. <i>Calculation of the surge in the control cable lines during subsequent lightning strikes</i>	73
Shkliarsky J.E., Dobush V.S. <i>Effect of the energy characteristics of the nonlinear load to determine the electrical parameters</i>	77
Kagan A.V., Vinogradov A.L. <i>Mathematical model of induction machines with different types of asymmetry</i>	81

Mechanical engineering Metallurgy and materials technology

Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Ju., Popov V.A. <i>Change the transverse deformation of viscoplastic</i>	85
Fuks M.D., Orischenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P. <i>Long-term strength of cast heat-resistant alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2</i>	92
Vasil'eva E.S., Kidalov S.V., Shevitalov S.N., Koltsova T.S. <i>Production and structure of copper powder, dispersion-strengthened nanodiamonds detonation</i>	97
Puguang J., Sizova I.A., Klimova O.G. <i>Synthesis, structure and properties of composite materials based on copper and hardened by nanosized inclusions of aluminum oxide</i>	100
Mishin M.V., Alexandrov S.E., Kretysheva I.V., Boricheva I.K. <i>Formation of micrometer gauge fractal structures from silicon dioxide nanoparticles</i>	105
Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Shelyukhovskaya D.V. <i>Distribution of magnesium in weld metall seam at laser-arc welding of aluminium-magnesium alloys</i>	110
Protopopova V.S., Alexandrov S.E., Shaganov A.P., Lesin S.V. <i>Study of morphology of mofvd-processed nickel films from bis-(ethylcyclopentadienyl) nickel</i>	116
Bundur M.S., Prokopenko V.A., Pelevin N.A. <i>Increase of eksplutatsionno-technical characteristics of the process equipment</i>	121
Maksarov V.V. <i>Increase of cutting through local metastability</i>	128

Mathematical Methods. Modeling. Experimental studies

Britvin S.N., Glukhovskoy A.V., Korshunov A.V. Installation for demercurization fluorescent lamps with mercury on the adsorbent filtrations of titanium dioxide and selenium	133
Gryaznov N.A., Kochkaryov D.A., Khokhryakov S.V., Shirokov A.A. Distributed network based midget spacecraft voltage measuring earth's magnetic field	138
Ageev V.O., Kachanova, T.L., Fomin, B.F., Fomin O.B. Analytical preparation for reengineering of manufacturing the metal products on the basis of system knowledge	141
Grigoriev B.S., Golovin O.A., Wiktorov E.D., Kudryashov E.V. Mathematical modelling of pantograph catenary mechanical interaction for the high-speed electrified railways	155
Nikitkov N.V., Dorofeev P.A. Revealing of the dominating factor causing the cracks in the superficial layer of ground preparations from firm fragile materials	162
Avotin E.V., Dobretsov R.Yu. Method for moving wheel energy consumption for transport vehicles.....	168
Polyakov P.A. Analytical method determination of the average temperature of the working rims drum.....	173
Guchinsky R.V., Petinov S.V. Development unit construction ship condition fatigue life	177
Maslov V.I., Sedler M.I. Improvement of the quality control processes for preparation of scientific articles for publication.....	186

Nature Management

Kozyrev S.V., Korablev V.V., Yakutseni P.P. New environmental risk factors: medicinal substances into the environment and drinking water.....	195
Petrov N.V., Gumeniuk V.I. Melting polar ice causes the planet	201
Gumenyuk V.I., Kulinkovich A.V. Influences of natural electromagnetic fields on generation of active forms of oxygen in water uranium solutions.....	210

Construction

Petrichenko M.R., Petrosova D.V., Petrochenko M.V. The filtration transport of air conservative impurities (temperature and heat) through the wall	221
Kiselev V.G. Estimation problems of the protection of underground metallic construction from the corrosion	226

Educational issues

Lagushkin S.G. The council of rectors of Leningrad: structure and principal activities (70th — 80th. Twentieth century.).....	232
Goryunov V.P. Of engineering education in the «St. petersburg educational forum — 2012»	247
Mitrofanov A.M., Nikulin S.P. Improve the methods of allocation of public NIR job for in high school.....	249

Chronicle of events

Demidov A.I. Professor V.E. Grum-Grzhimailo, problems of higher and secondary special education in Russia.....	253
Kesamanly M.F., Kesamanly F.P. Polytechnics, celebrate our country. corresponding member of the USSR Pavel Kobeko.....	255
Lipin V.A. A.K. Van-Der Bellen – disremember name in history of national nonferrous metallurgy.....	261
About the authors. Contact information.....	269
Abstracts. Keywords	283

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИКИ В XXI ВЕКЕ

Энергетика как совокупность естественных и искусственных подсистем, использующих энергетические ресурсы всех видов, обеспечивает производство энергии путем преобразования первичной (природной) энергии во вторичную (электрическую, тепловую). Значение энергетики в экономике страны, как и в ее общественной жизни, трудно переоценить — это основа всей современной жизни, включая промышленность, освещение, транспорт, быт, тепло.

В связи с развитием экономики и ростом населения увеличивается мировой спрос на энергию и, как ожидается, он резко возрастет в ближайшие 40 лет. Перспективы развития мировой энергетики являются одним из наиболее актуальных и обсуждаемых глобальных вопросов. Острота ситуации обусловлена ограниченностью используемых традиционных энергетических ресурсов, а также экологическими последствиями, связанными с ростом выбросов парниковых газов в атмосферу при росте потребления энергии.

Таким образом, дефицит энергии и загрязнение окружающей среды — это критические вопросы в энергетике XXI века, решение которых относится к международной энергетической политике.

Как удовлетворить энергетические потребности миллиардов людей, стремящихся повысить свой уровень жизни, и как сделать это безопасным и устойчивым образом? Рост численности населения и доходов — две самые мощные движущие силы спроса на энергию. С 1900 года население мира увеличилось более чем в 4 раза, реальный доход — в 25 раз, а потребление первичной энергии — в 22,5 раза [1]. В ближайшие 20 лет продолжится усиление международной интеграции и быстрый рост эко-

номик с низким и средним уровнем доходов населения, при этом рост численности населения замедлится, а рост доходов ускорится. На мировом уровне рост численности населения при росте доходов приводит к увеличению добычи и потребления энергии. Сегодня политика многих стран направлена на уменьшение энергоемкости, т. е. объема энергии, используемого для производства единицы внутреннего валового продукта (ВВП). Тем самым рассчитывают повысить энергоэффективность (использование меньшего количества энергии для обеспечения того же уровня энергоснабжения зданий или технологических процессов на производстве).

Энергоэффективность, измеренная как объем энергии на единицу ВВП, продолжает повышаться во всем мире и все более быстрыми темпами. Ускорение роста энергоэффективности имеет важное значение. Оно ограничивает рост требующейся миру первичной энергии. Рост энергоэффективности и долгосрочный структурный сдвиг от промышленности к менее энергоемким видам деятельности — эти тенденции рассматриваются как приоритетные в первую очередь в богатых странах, а затем в новых индустриально развитых экономиках.

Цены, экономическое развитие (рост промышленного сектора при сокращении его доли), а также энергетическая политика (стимулирование энергоэффективности) играют очень важную роль в распространении новых технологий и в определении объема энергоресурсов, необходимого для поддержки непрерывного экономического роста.

Прогнозируемые изменения в мировом энергетическом балансе показаны на рис. 1. До 2030 года топливный баланс будет меняться относительно медленно, доля ископаемого топлива нарастает за счет нефти, угля и природного

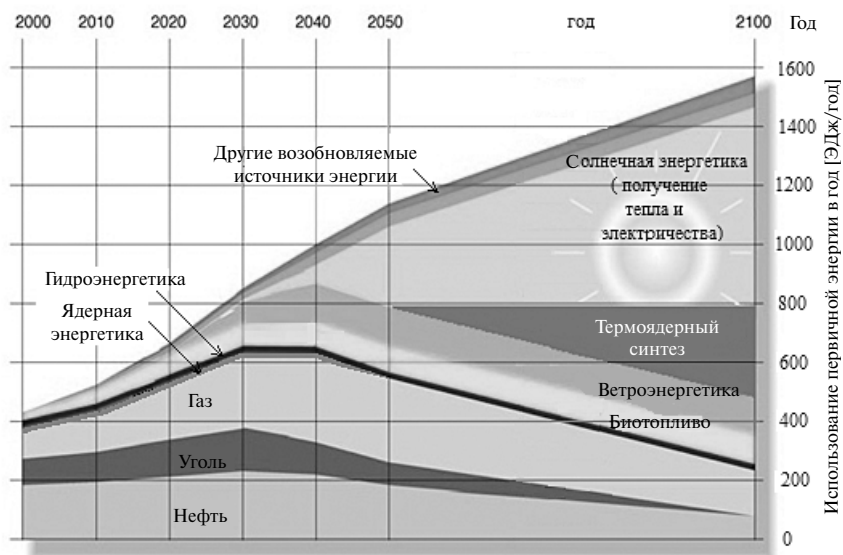


Рис. 1. Перспективы (2000–2100 гг.) использования первичной энергии, ЭДж, [2]

газа и доминирует в мировом потреблении энергии. После 2040 года спрос на традиционные энергоресурсы будет снижаться. (В настоящее время 80 % энергии получают в результате сжигания ископаемого топлива, которое является основной причиной глобального изменения климата, а также загрязнения окружающей среды.)

Наиболее быстрый рост будет у возобновляемых источников энергии, чья роль в топливном балансе значительно возрастет после 2040 года и будет ключевой. В этой области перспективна и востребована солнечная энергетика, основанная на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии. Мировое потребление энергии в 2006 году составило около $5 \cdot 10^{17}$ ВТУ ($1 \text{ ВТУ} = 1,055 \cdot 10^3 \text{ Дж}$). Для сравнения: солнечная энергия, достигающая поверхности Земли в течение одного года, равна примерно $3 \cdot 10^{21}$ ВТУ. При этом солнечная энергетика использует неисчерпаемый источник энергии и экологически чиста, т. е. не производит вредные отходы.

Применение термоядерной реакции (практически неисчерпаемый источник энергии) связано в первую очередь с перспективой освоения технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Пока достигнутая научная и технологическая база не позволяет использовать УТС в промыш-

ленных масштабах, но именно на этот «новый» источник энергии возлагают большие надежды.

Таким образом, при рассмотрении общемировых показателей становится понятно, что мировой спектр источников энергии весьма разнообразен. И как фундаментальные, так и прикладные исследования в области энергетики должны быть направлены на изучение спектра энергоресурсов и их возможного использования.

Для этой цели необходимо учесть и рассмотреть:

1) потенциальные энергоисточники с минимальным выбросом парниковых газов в атмосферу;

2) внедрение и использование высокоэффективных энергетических технологий. Введение новых технологий снизит накопление углекислого газа в атмосфере, обеспечит рациональное использование ресурсов, поможет создать альтернативное сырье для синтеза органических веществ, а значит, решить важные экологические проблемы;

3) идентификацию критических факторов развития технологий для массового использования, в том числе основных препятствий для их вывода на рынок. Прежде всего в их числе — барьеры технического характера, имеющие определяющее значение при выработке решений



о поддержке тех или иных разработок. Также необходимо учитывать экономические правовые или социальные сдерживающие факторы;

4) фундаментальные исследования в области энерготехнологий для преодоления барьеров и обеспечения основы их массового использования;

5) коммерциализацию, внедрение результатов исследований в работу научных и инженерных сообществ, правительственных программ, частного производства, средств массовой информации, бизнес.

В основу дальнейшей оценки технологической области положены следующие критерии [3]:

1. Общий потенциал, включая экономический, а также потенциал, который может проявиться в среднесрочной перспективе при благоприятных рамочных условиях, таких, как отсутствие правовых или политических барьеров и т. п. С помощью этого критерия можно оценить, в какой степени та или иная технология способна внести вклад в энергообеспечение.

2. Ранжирование потребности технологий в инфраструктуре по категориям: 1) потребность отсутствует; 2) возможно применение в условиях сложившейся инфраструктуры; 3) необходима модернизация существующей инфраструктуры; 4) требуется строительство новой инфраструктуры.

3. Эффективность затрат (возможное сокращение затрат в краткосрочной (2020 г.), среднесрочной (2030 г.) и долгосрочной (2050 г.) перспективах в сравнении с эталонной технологией).

4. Зависимость от выбранной траектории развития и связанная с ней способность к гибкому реагированию на внешние изменения, что позволит оценить, как и в какой мере вывод технологии на рынок повлияет на структуру энергетических систем в кратко-, средне- или долгосрочной перспективе. За основу берутся такие показатели, как плановое время строительства типовой установки, реальное время строительства, средние сроки амортизации, необходимые инвестиции (евро/кВт).

5. Вклад в энергоэффективность. Определяется исходя из потенциала экономии первичной энергии в кратко-, средне- и долгосрочной перспективах в сравнении с эталонной технологией.

6. Вклад в защиту окружающей среды и предотвращение изменений климата. Предполага-

емое сокращение объема выбросов CO₂ и других основных загрязняющих веществ в кратко-, средне- и долгосрочной перспективах в сравнении с эталонной технологией.

Критерии подбирались таким образом, чтобы можно было провести сравнительную оценку потенциального вклада отдельных технологических областей в решение задач энергоснабжения: обеспечение надежности, рентабельность, конкурентоспособность на международном уровне и защита окружающей среды.

Заинтересованность в обеспечении систем энергоснабжения чистыми и безопасными энергоисточниками стремительно растет, возможными и перспективными путями развития энергетики занимаются как федеральные, так и региональные органы власти.

Любая энергетическая стратегия, направленная на переход энергосистемы из текущего состояния в желаемое будущее состояние, должна руководствоваться сильной и вдохновляющей мотивацией. Краткий обзор (рис. 2) освещает основные идеи и возможные модели развития энергетики. Так, в настоящее время акцент сделан на развитие традиционной энергетики, солнечных батарей, теплоизоляции домов, ветряных мельниц. В ближайшем будущем с учетом новых технологий повышенный интерес будет к солнечным водонагревателям, «интеллектуальному» учету электроэнергии, эффективному освещению и эффективности работы транспорта. Затем последует внедрение солнечных ферм, ветряных электростанций, нетрадиционной и локальной (то есть, малой) энергетик. Через 20–100 лет, предполагается, будут освоены волновая и геотермическая энергетики, а также управляемый термоядерный синтез, рассматриваемый многими исследователями в качестве «естественного» источника энергии в долгосрочной перспективе. Таким образом, необходимость разработок в XXI веке очевидна, именно они обеспечат основу новых технологий для крупномасштабного применения новых источников энергии.

Необходимы дальновидность и лидерство для разработки и продвижения энергетических стратегий, которые способствуют внедрению одних и прекращению использования других источников энергии. Прогресс в энергетике осуществляется путем заполнения пробелов между

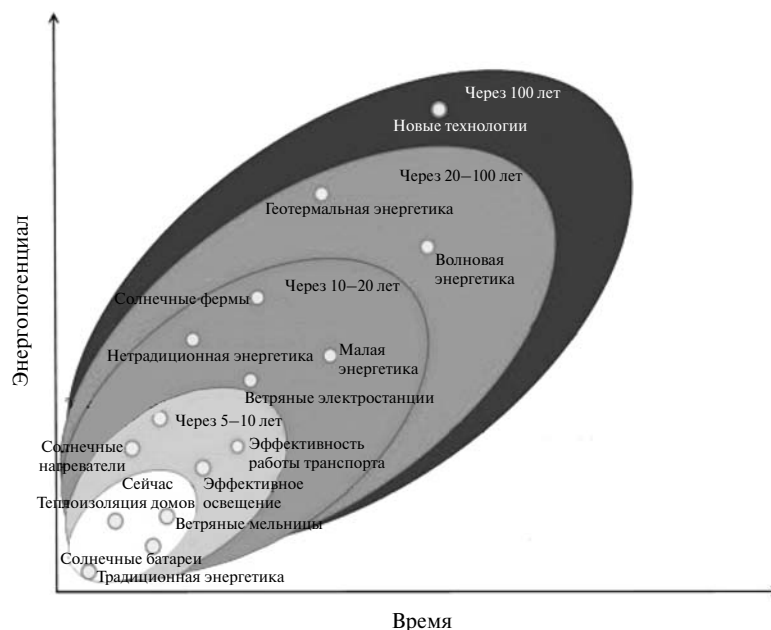


Рис. 2. Прогнозируемая модель развития энергетики [4]

практическим выбором и оптимальной моделью решения. Энергетическая политика, обусловленная вопросами безопасности, а также вопро-

сами изменения климата, занимается разработками энергетических стратегий и играет главную роль в выборе направления развития энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 г. [Текст] / ВР.— 2011 г.
2. Solarstorm tragende Säule im zukünftigen Energiemix [Электрон. ресурс].— <http://www.solarwirtschaft.de/>, accessed: 31/05/2012
3. Аренс, М. Энергетические технологии-2050 [Текст] / М. Аренс, М. Витшель, К. Дётч, В. Кревитт [и др.].— 2011 г.
4. Wiejermars, R. / R. Wiejermars [et al.].— Energy Strategy Reviews.— 2012. Vol. 1, № 5.

УДК 621.313

И.З. Богуславский, В.Г. Иванов,
В.С. Рогачевский, С.Е. Турусов

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МДС ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Формулировка задачи

В практике создания современных частотно-регулируемых двигателей, например вентильных, предназначенных для различных отраслей промышленности, возникают проблемы иссле-

дования их эксплуатационных характеристик (момент на валу, предел устойчивости, КПД и др.), которые определяются в основном величиной МДС и полем обмотки статора. Одна из проблем, требующих решения, — определение



этой МДС и поля в общем случае, а именно в несимметричных режимах, причем когда токи в фазах обмотки изменяются во времени с периодом $T_{\text{вpm}}$ по произвольному (не только гармоническому [1, 2]) закону, а обмотка выполнена с дробным числом Q пазов на полюс и фазу, так что ширина ее фазных зон может быть неодинаковой. В одной из конструкций двигателя возможен, например, следующий режим изменения во времени токов в обмотке статора:

в промежуток времени $\Delta t_0 = t_1 - t_0$ мгновенные значения токов в фазах A , B и C обмотки равны соответственно $i_A = 100\% = \text{const}$, $i_B = 100\% = \text{const}$, $i_C = 0$;

в промежуток времени $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ при повороте ротора двигателя на угол $\Psi_1 = \omega t_1 = \pi/3$ — $i_A = 0$, $i_B = 100\% = \text{const}$, $i_C = 100\% = \text{const}$;

в промежуток времени $\Delta t_2 = t_3 - t_2$ при повороте ротора двигателя на угол $\Psi_2 = \omega t_2 = 2\pi/3$ — $i_A = 100\% = \text{const}$, $i_B = 0$, $i_C = 100\% = \text{const}$;

при повороте ротора двигателя на угол $\Psi_6 = \omega t_6 = 2\pi$ (в промежуток времени $\Delta t_6 = t_7 - t_6$) мгновенные значения токов в фазах A , B и C совпадают со значениями токов при $t = 0$.

Таким образом, период изменения этих токов во времени равен $T_{\text{вpm}} = 2\pi$ эл. гр., причем в течение этого периода токи изменяются не по гармоническому закону. Возможны и иные режимы с аналогичным изменением во времени токов в фазах. Изменение во времени токов i_A , i_B , i_C по произвольному (не только гармоническому) закону с периодом $T_{\text{вpm}}$ приводит к тому, что МДС обмотки тоже изменяется во времени по произвольному негармоническому закону с тем же периодом.

Отметим особенности современных трехфазных обмоток: они выполняются шестизонными, весьма часто — с дробным числом Q ; для машины с числом полюсов, равным p , число этих зон равно $6p$. Рассмотрим для определенности шесть фазных зон такой обмотки, считая $p = 1$. Обозначим ширину первой из этих шести зон (зона фазы A) как b_A ; соответственно, обозначения для остальных зон — $b_{C'}$, b_B , $b_{A'}$; b_C ; $b_{B'}$. Для такой обмотки МДС (функция тока статора) [2, 3] изменяется на границе между каждыми двумя соседними фазными зонами скачком. Например, при движении по периферии статора (вдоль координаты x) от фазной зоны шириной b_A (по ней протекает ток i_A) в сторону

фазной зоны шириной $b_{C'}$ (по ней протекает ток $(-i_C)$) функция тока [2, 3] изменяется на границе между этими зонами скачком от величины i_A до величины $(i_A - i_C)$. При обходе в этом направлении всех шести фазных зон мы получаем, что функция тока — ступенчатая; ее пространственный период в общем случае — для обмоток с дробным числом Q на полюс и фазу [1] — равен $T_{\text{пр}} = \pi D_{\text{раст}}$, где $D_{\text{раст}}$ — диаметр расточки статора.

Ширина каждой из этих шести зон обмотки может быть неодинаковой. Обозначим угол, занимаемый такой фазной зоной шириной b_A , как

$$\Delta\alpha_A = 2\pi b_A / T_{\text{пр}} \text{ эл. рад.} \quad (1)$$

Аналогично записываются и выражения для углов $\alpha_{C'}$, α_B , $\alpha_{B'}$, α_C ; $\alpha_{A'}$ остальных фазных зон. С учетом (1) углы, занимаемые фазными зонами обмотки, имеют такой вид:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_A &= \pi/3 \pm \Delta\beta_A; & \Delta\alpha_{C'} &= \pi/3 \pm \Delta\beta_{C'}; \\ \Delta\alpha_B &= \pi/3 \pm \Delta\beta_B; & \Delta\alpha_{A'} &= \pi/3 \pm \Delta\beta_{A'}; \\ \Delta\alpha_C &= \pi/3 \pm \Delta\beta_C; & \Delta\alpha_{B'} &= \pi/3 \pm \Delta\beta_{B'}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\Delta\beta_A$, $\Delta\beta_{C'}$, ..., $\Delta\beta_{B'}$ — дополнительные углы, расширяющие (или сужающие) фазные зоны обмотки. Знаки при них (\pm) должны быть выбраны так, чтобы удовлетворялось условие

$$\begin{aligned} \pm\Delta\beta_A \pm \Delta\beta_{C'} \pm \Delta\beta_B \pm \Delta\beta_{A'} \pm \\ \pm \Delta\beta_C \pm \Delta\beta_{B'} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Метод расчета МДС обмотки статора при произвольном питании ее фазных зон, изложенный ниже, справедлив при произвольных значениях дополнительных углов $\Delta\beta_A$, $\Delta\beta_{C'}$, ..., $\Delta\beta_{B'}$ с учетом этого условия.

Отметим, что обычно в практике проектирования обмотки статора эти дополнительные углы принимают равными следующему:

$$\Delta\beta_A = -\Delta\beta_{C'}, \Delta\beta_B = -\Delta\beta_{A'}, \Delta\beta_C = -\Delta\beta_{B'}. \quad (4)$$

Запишем расчетные выражения для положения границ между фазными зонами по периферии статора (считая от фазной зоны A):

$$\begin{aligned} \alpha_A &= \Delta\alpha_A; & \alpha_{C'} &= \Delta\alpha_A + \Delta\alpha_{C'}; \\ \alpha_B &= \Delta\alpha_A + \Delta\alpha_{C'} + \Delta\alpha_B; \\ \alpha_{A'} &= \Delta\alpha_A + \Delta\alpha_{C'} + \Delta\alpha_B + \Delta\alpha_{A'}; \end{aligned}$$

$$\alpha_C = \Delta\alpha_A + \Delta\alpha_{C'} + \Delta\alpha_B + \Delta\alpha_{A'} + \Delta\alpha_{A'} + \Delta\alpha_C;$$

$$\alpha_{B'} = \Delta\alpha_A + \Delta\alpha_{C'} + \Delta\alpha_B + \Delta\alpha_{A'} + \Delta\alpha_C + \Delta\alpha_{B'}. \quad (5)$$

Таким образом, поле трехфазной обмотки и ее МДС изменяются вдоль расточки статора в виде ступенчатой функции тока с периодом $T_{пр}$, а во времени — по произвольному закону с периодом $T_{врм}$.

Определение МДС реакции якоря машин переменного тока в режиме симметричной нагрузки в варианте, когда ширина фазных зон обмотки одинакова [1–3], является лишь частным случаем проблемы определения МДС реакции якоря этих машин. Возможны несколько путей ее решения с учетом указанных особенностей конструкции машин и режимов их работы.

Предварительно примем, что для частотно-регулируемых двигателей, используемых в промышленности, отношение зазора δ к периоду $T_{пр}$ обычно менее 0,0125; при таких значениях $\delta/T_{пр}$ коэффициент затухания [5] поля в зазоре равен $k_{зат} \approx 1$ для гармоник порядка $m < 11$, так что это поле имеет практически только радиальную составляющую.

Метод решения в частном случае

Рассмотрим сначала метод решения при условии, что режим работы двигателя — несимметричный, а ширина фазных зон обмотки статора — одинаковая (частный случай проблемы).

Исходные данные. Заданными предполагаются:

а) токи в фазах

$$i_A = I_A \cos(\omega t + \varphi_A); i_B = I_B \cos(\omega t + \varphi_B);$$

$$i_C = I_C \cos(\omega t + \varphi_C). \quad (6)$$

Здесь I_A, I_B, I_C — амплитуды токов; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ — их фазовые углы, причем для несимметричных режимов машины

$$I_A \neq I_B \neq I_C; |\varphi_A - \varphi_B| \neq |\varphi_B - \varphi_C|; \quad (7)$$

ω — круговая частота сети;

б) трехфазная шестизонная обмотка статора с равными по ширине фазными зонами $\alpha_A = \alpha_{C'} = \alpha_B = \alpha_{A'} = \alpha_C = \Delta\alpha_{B'} = \pi/3$. Отметим, что излагаемый далее метод может быть реализован и для анализа несимметричных режимов

двигателя с обмоткой статора, у которой ширина фазных зон неодинакова согласно (2) и (3). Однако его реализация для такой конструкции обмотки вызывает дополнительные сложности.

Определим МДС такой обмотки.

Метод состоит из следующих этапов:

представления тока в каждой фазе в виде ряда гармоник порядка k ;

приведения каждой гармоники порядка k несимметричных токов i_A, i_B, i_C к трем системам симметричных составляющих того же порядка k ;

определения гармоник МДС порядка k для каждой системы.

Временные гармоники тока. Фазный ток $i_A = i_A(t)$ представим в виде ряда временных гармоник [2] порядка k :

$$i_A(t) = \sum I_{Ak} \sin(2\pi k t / T_{врм} + \varphi_{Ak}). \quad (8)$$

Здесь суммирование ведется по параметру k ; I_{Ak} — амплитуда гармоники порядка k ; φ_{Ak} — фазовый угол. Аналогично могут быть представлены и токи $i_B(t), i_C(t)$. В общем случае амплитуды гармоник порядка k этих токов могут отличаться: $I_{Ak} \neq I_{Bk} \neq I_{Ck}$; также могут отличаться по величине и разности их фазовых углов: $|\varphi_{Ak} - \varphi_{Bk}| \neq |\varphi_{Bk} - \varphi_{Ck}|$.

Симметричные составляющие токов. Системе из токов в фазах согласно (8) с амплитудами I_{Ak}, I_{Bk}, I_{Ck} и с их фазовыми углами $\varphi_{Ak}, \varphi_{Bk}, \varphi_{Ck}$ для определения МДС обмотки целесообразно представить в общем случае в виде трех систем из симметричных [1, 2] составляющих с амплитудами токов прямой последовательности ($I_{Ak}^{пр}, I_{Bk}^{пр}, I_{Ck}^{пр}$), обратной последовательности ($I_{Ak}^{обр}, I_{Bk}^{обр}, I_{Ck}^{обр}$) и нулевой последовательности ($I_{Ak}^{нул}, I_{Bk}^{нул}, I_{Ck}^{нул}$). Токи этих последовательностей имеют соответственно фазовые углы ($\varphi_{Ak}^{пр}, \varphi_{Bk}^{пр}, \varphi_{Ck}^{пр}$); ($\varphi_{Ak}^{обр}, \varphi_{Bk}^{обр}, \varphi_{Ck}^{обр}$); ($\varphi_{Ak}^{нул}, \varphi_{Bk}^{нул}, \varphi_{Ck}^{нул}$).

При конструкции обмотки с изолированной нейтралью токи нулевой последовательности отсутствуют; они возникают только при наличии нулевого провода или при соединении фаз обмотки в треугольник.

Результат: гармоники МДС обмотки статора для каждой системы.

Выражение для гармоники МДС порядка k обмотки при $\Delta\beta_A = \Delta\beta_{C'} = \Delta\beta_B = \Delta\beta_{A'} = \Delta\beta_C = \Delta\beta_{B'} = 0$ известно [1, 2]. Например, для систе-

мы токов прямой последовательности с амплитудами $I_{Ak}^{np} = I_{Bk}^{np} = I_{Ck}^{np}$ оно имеет вид

$$F_k^{np} = [3 / \pi k] I_k^{np} W_F K_{Wm} / p, \quad (8')$$

где W_F — число витков в фазе обмотки; K_{Wm} — обмоточный коэффициент для пространственной гармоники порядка m . Аналогично записывается и выражение для токов обратной последовательности. МДС токов нулевой последовательности для временных гармоник порядка $k = 1$ и порядков, не кратных трем ($k \neq 3d$, где $d = 1, 3, 5, \dots$), не создают поля взаимной индукции; при $k = 3d$ амплитуды этих полей малы, и ими обычно пренебрегают [1].

Прямая и обратная системы токов статора индуцируют токи в контурах ротора. Поля, образованные токами статора прямой последовательности и токами в контурах ротора, создают вращающие моменты, совпадающие с направлением вращения ротора, а поля токов обратной последовательности — тормозные вращающие моменты.

Таким образом, решение проблемы предполагает двойное преобразование токов (разложение в гармонический ряд фазных токов и использование метода симметричных составляющих для каждой временной гармоники) даже для частного случая: при $\Delta\beta_A = \Delta\beta_{C'} = \Delta\beta_B = \Delta\beta_{A'} = \Delta\beta_C = \Delta\beta_{B'} = 0$.

Метод решения общей задачи

Перейдем теперь к решению общей задачи: режим работы двигателя — несимметричный, изменение токов в фазах — не по гармоническому закону, а фазные зоны обмотки статора — различной ширины.

Метод решения этой задачи позволяет избежать двойного преобразования токов для конструкции обмотки с различной шириной фазных зон согласно (2) и (3); он сводится к определению МДС путем представления функции токов [2, 3] в фазах обмотки в виде гармонического ряда с двумя переменными [6, 7]. Метод включает следующие этапы:

вычисление ряда пространственных гармоник МДС порядка m с периодом T_{np} , определяемых мгновенными значениями токов в фазах $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ для отрезков времени $\Delta t_1, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$. Для этого ступенчатая функция МДС обмотки вне зависимости от ширины ее фазных

зон представляется в виде ряда пространственных гармоник порядка m для мгновенных значений токов $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ вне зависимости от их формы; эти пространственные гармоники определяются для нескольких отрезков времени $\Delta t_1, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$, причем $\Delta t_S \ll T_{врм}$. Предполагается, что в течение каждого из этих отрезков времени Δt_S значения токов в фазах $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ сохраняются неизменными. Число V таких отрезков времени определяется точностью вычислений $\epsilon_{расч}$, которая задается предварительно (об этом будет подробнее сказано далее);

аппроксимацию значений гармоник МДС порядка m (их число равно V) с помощью ряда временных гармоник МДС порядка k с периодом $T_{врм}$. Значения этих гармоник МДС рассматриваются как узлы пространственной функции МДС.

Рассмотрим этапы реализации этого метода подробнее. Отметим предварительно, что пространственная гармоника порядка $m = p$ (при выборе периода T_{np} согласно сказанному в начале статьи) является основной, гармоника порядка $m < p$ — низшей, а порядка $m > p$ — высшей.

Исходные данные. Заданными предполагаются:

а) токи в фазах (i_A , i_B , i_C) для ряда отрезков времени $\Delta t_1, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$. В пределах каждого такого отрезка они задаются постоянными и равными соответственно

$$i_A = I_A \cos \varphi_A; i_B = I_B \cos \varphi_B; i_C = I_C \cos \varphi_C, \quad (9)$$

где I_A , I_B , I_C — амплитуды токов; φ_A , φ_B , φ_C — фазовые углы, которые изменяются в пределах $0-2\pi$. Метод решения, излагаемый далее, предусматривает определение МДС обмотки для общего случая — несимметричного режима машины:

$$I_A \neq I_B \neq I_C; |\varphi_A - \varphi_B| \neq |\varphi_B - \varphi_C|; \quad (10)$$

б) трехфазная шестизонная обмотка статора с фазными зонами $\Delta\alpha_A$; $\Delta\alpha_{C'}$; $\Delta\alpha_B$; $\Delta\alpha_{A'}$; $\Delta\alpha_C$; $\Delta\alpha_{B'}$ согласно (2); положения границ α_A ; $\alpha_{C'}$; α_B ; $\alpha_{A'}$; α_C ; $\alpha_{B'}$ между фазными зонами по периферии статора определяются согласно (5);

в) обмотка — однослойная с числом $Q = 1$ и сокращением шага $\beta = 1$.

Однако общность излагаемого метода решения сохраняется и для конструкции двухслойной обмотки ($S_N = 2$) при $Q > 1$ и $\beta < 1$. При $Q > 1$ число ступеней функции тока [2, 3] возрастает;

соответственно амплитуды пространственных гармоник порядка $m > 1$ уменьшаются, что учитывается коэффициентом распределения обмотки [1]. Двухслойную обмотку ($S_N = 2$) при $\beta < 1$ нетрудно представить в виде двух однослойных, сдвиг между которыми определяется коэффициентом сокращения [1] для соответствующей гармоники порядка m .

Определим МДС такой обмотки.

Представим ступенчатую функцию тока статора в виде гармонического ряда

$$\Sigma F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem}),$$

где $\alpha = 2\pi x / T_{\text{пр}}$.

Найдем для токов в фазах (i_A, i_B, i_C) $_{\Delta t_1}$, соответствующих отрезку времени Δt_1 , ступенчатую функцию МДС $F(\alpha, \Delta t_1)$ [1, 3, 4]. Она может быть разложена в гармонический ряд с периодом $T_{\text{пр}}$: $F(\alpha, m, \Delta t_1) = \Sigma F(\alpha, m, \Delta t_1)$. Здесь суммирование предполагается по номерам гармоник m . Аналогично для отрезков времени $\Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$ мы найдем ступенчатые функции МДС общим числом V . Каждой такой функции соответствует сумма членов гармонического ряда $\Sigma F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})$. Отметим, что в пределах каждого из этих отрезков времени токи постоянны по амплитуде и фазе согласно (9).

Для пространственной гармоники порядка m расчетное выражение для МДС имеет вид [6, 7]

$$F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem}) = |F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})| \sin(\alpha m + \gamma_{mS}). \quad (11)$$

Здесь $|F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})| = (a_{mS}^2 + b_{mS}^2)^{0,5}$ — амплитуда МДС; $\gamma_{mS} = \arctg a_{mS} / b_{mS}$ — ее фазовый угол в пространстве; индексы при коэффициентах a_{mS}, b_{mS} и угле γ_{mS} означают: m — порядок пространственной гармоники, S — отрезок времени Δt_S , определяющий значение токов в фазах (i_A, i_B, i_C) $_{\Delta t_S}$; a_{mS}, b_{mS} — коэффициенты разложения Фурье [6], [7]. Для первого из них расчетное выражение таково:

$$\begin{aligned} a_{mS} = (1/\pi) \{ & [(i_A) \sin(m\alpha_A) + \\ & + (i_A - i_C) [\sin m(\alpha_A + \alpha_{C'}) - \sin(m\alpha_A)] + \\ & + (i_A - i_C + i_B) [\sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B) - \\ & - \sin m(\alpha_A + \alpha_{C'})] + (i_A - i_C + i_B - i_A) \times \\ & \times [\sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B + \alpha_{A'}) - \sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B)] + \\ & + (i_A - i_C + i_B - i_A + i_C) \times \\ & \times [\sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B + \alpha_{A'} + \alpha_C) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B + \alpha_{A'})] + \\ & + (i_A - i_C + i_B - i_A + i_C - i_B) [\sin 2\pi m - \\ & - \sin m(\alpha_A + \alpha_{C'} + \alpha_B + \alpha_{A'} + \alpha_C)]. \quad (12) \end{aligned}$$

Расчетное выражение для коэффициента разложения b_{mS} аналогично (12).

Число расчетных выражений вида (11) равно числу отрезков времени Δt_S , на которое подразделен временной период $T_{\text{врм}}$ (то есть числу V).

В выражениях (12) для a_{mS} сумма некоторых токов в скобках равна нулю; например, в предпоследнем слагаемом в скобках заключена сумма $(i_A - i_C + i_B - i_A + i_C)$. В ней попарно суммы токов i_A и $(-i_A)$, i_C и $(-i_C)$ равны нулю. Все эти токи приведены в (12) лишь для того, чтобы указать соответствие между ними и углами, занимаемыми фазными зонами, например между углом $\alpha_{C'}$ и током $(-i_C)$, углом α_B и током i_B и др. Это соответствие является дополнительной проверкой записи коэффициентов вида a_{mS} .

Выражения (11), (12) справедливы для каждого отрезка времени $\Delta t_S = \text{idem}$ согласно условию (9), (10).

Отметим особенность расчетного выражения для МДС (11). Пусть, например, мы вычисляем амплитуду МДС $|F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})|$ для ряда из трех последовательных отрезков времени — $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$. Для момента времени $t = t_0$ имеем: $t_1 = \Delta t_1$; соответственно, $t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = t_1 + \Delta t_2$, $t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = t_2 + \Delta t_3$. В практических расчетах МДС обмотки может оказаться, что токи (i_A, i_B, i_C) $_{\Delta t}$ в моменты времени t_1 и t_2 сохраняются неизменными, а в момент t_3 в соответствии с режимом работы машины их величина изменяется. Например, в моменты времени t_1 и t_2 токи неизменны и равны $i_A = 100\%$, $i_B = 100\%$, $i_C = 0$; в момент же времени t_3 они изменились и стали равными $i_A = 0$, $i_B = 100\%$, $i_C = 100\%$. Следовательно, для этого примера справедливы следующие соотношения между их амплитудами и фазовыми углами:

$$|F(\alpha, m, \Delta t_1)| = |F(\alpha, m, \Delta t_2)| \neq |F(\alpha, m, \Delta t_3)|;$$

$$\gamma_{m1}|_{\text{при } \Delta t_1} = \gamma_{m2}|_{\text{при } \Delta t_2} \neq \gamma_{m3}|_{\text{при } \Delta t_3} \quad (13).$$

Таким образом, соотношения между амплитудами МДС, а также между фазовыми углами зависят:



от режима работы машины (графика изменения токов во времени),

от выбора величины отрезков времени Δt_S (шага дискретизации процесса изменения токов в фазах во времени). Подробнее вопрос о выборе этого шага дискретизации Δt_S рассмотрен ниже.

Аппроксимация гармоник ступенчатой функции тока статора $\Sigma F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})$ с помощью гармонического ряда (временные гармоники порядка $k \geq 1$). Получены расчетные выражения (11), (12) для пространственной гармоники МДС $F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})$ порядка m с учетом произвольного изменения во времени фазных токов (i_A, i_B, i_C) $_{\Delta t}$ при условии, что на отрезке времени Δt_1 они сохраняются неизменными; то же относится и к остальным отрезкам времени $\Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$, причем эти отрезки времени удовлетворяют соотношению

$$\Delta t_1 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_S + \dots + \Delta t_V = T_{\text{врм}}. \quad (14)$$

Значения гармоник МДС $F(\alpha, m, \Delta t_S = \text{idem})$ порядка m для последовательности из отрезков Δt_S удобно рассматривать в качестве узлов интерполяции и аппроксимировать с помощью ряда, содержащего гармоники временного порядка k [6, 7].

Для того чтобы записать выражения для членов этого временного гармонического ряда, примем предварительно $t = t_0 = 0$ (начало отсчета); тогда момент времени $t_1 = \Delta t_1$; соответственно, $t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = t_1 + \Delta t_2$. Обобщим эти соотношения и запишем выражения для произвольно момента времени $t_S < T_{\text{врм}}$ и для момента $t_V = T_{\text{врм}}$:

$$\begin{aligned} t_S &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_S = t_{S-1} + \Delta t_S; \\ t_V &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_V = \\ &= t_{V-1} + \Delta t_V = T_{\text{врм}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Вычислим член такого ряда для временной гармоники порядка k сначала для отрезка времени $\Delta t_S = \Delta t_1 = t_1$. Расчетное выражение имеет вид [6, 7]

$$F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_1, k) = |F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_1, k)| \sin(2\pi t_1 k / T_{\text{врм}} + \gamma_{kS}). \quad (16)$$

Здесь $|F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_1, k)| = (a_{kS}^2 + b_{kS}^2)^{0.5}$ — амплитуда МДС, $\gamma_{kS} = \text{arctg } a_{kS}/b_{kS}$ — ее фазовый угол во времени; момент времени t соответствует отрезку $\Delta t_S = \Delta t_1$; a_{kS}, b_{kS} — коэффициенты Фурье разложения в ряд, содержащий гармоники временного порядка k .

Выражения для коэффициентов Фурье a_k, b_k в (16) для отрезка времени $\Delta t_S = \Delta t_1 = t_1$ с учетом (15) принимают вид [6, 7]

$$a_{kS} = (1/\pi) F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_1) \times \int_0^{t_1} \cos(2\pi k t / T_{\text{врм}}) dt. \quad (17)$$

Выражение для коэффициента разложения b_{kS} записывается [6, 7] аналогично (17).

Следует отметить, что в выражении (17) отрезок времени $\Delta t_S = \Delta t_1$ для МДС $F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_1)$ соответствует пределам интегрирования $(0; t_1)$ согласно (15). То же справедливо и для МДС, соответствующих остальным отрезкам времени согласно (15), например для МДС $F(\alpha, m, \Delta t_S = \Delta t_2)$ и пределов интегрирования $(t_1; t_2)$, для МДС $F(\alpha, m, \Delta t_S)$ и пределов интегрирования $(t_{S-1}; t_S)$.

Число слагаемых в выражениях вида (16) определяется числом выбранных отрезков времени — $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$ — и равно V .

При выводе соотношений для расчета временных гармоник МДС порядка k этого ряда целесообразно провести некоторые преобразования. С учетом (14) запишем

$$\begin{aligned} 2\pi\Delta t_1/T_{\text{врм}} + 2\pi\Delta t_2/T_{\text{врм}} + 2\pi\Delta t_3/T_{\text{врм}} + \dots + \\ + 2\pi\Delta t_S/T_{\text{врм}} + \dots + 2\pi\Delta t_V/T_{\text{врм}} = 2\pi. \end{aligned}$$

Обозначим отдельные слагаемые в этом выражении так:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_1 &= 2\pi\Delta t_1/T_{\text{врм}}; \Delta\Psi_2 = 2\pi\Delta t_2/T_{\text{врм}}; \\ \Delta\Psi_3 &= 2\pi\Delta t_3/T_{\text{врм}}; \dots; \\ \Delta\Psi_S &= 2\pi\Delta t_S/T_{\text{врм}}; \dots; \Delta\Psi_V = 2\pi\Delta t_V/T_{\text{врм}}. \end{aligned} \quad (18)$$

В результате получаем:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \Delta\Psi_1; \Psi_2 = \Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 = \Psi_1 + \Delta\Psi_2; \\ \Psi_3 &= \Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 + \Delta\Psi_3 = \Psi_2 + \Delta\Psi_3; \dots; \\ \Psi_S &= \Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 + \Delta\Psi_3 + \dots + \Delta\Psi_S = \Psi_{S-1} + \Delta\Psi_S; \\ \Psi_V &= \Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 + \Delta\Psi_3 + \dots + \Delta\Psi_V = \\ &= \Psi_{V-1} + \Delta\Psi_V = 2\pi. \end{aligned} \quad (19)$$

Эти соотношения мы используем далее.

Условия для обеспечения минимальной погрешности аппроксимации МДС ε_k (расчетные выражения для вычисления коэффициентов a_k, b_k гармонического ряда) сформулируем с по-

мощью гармонического ряда (17), содержащего гармоники временного порядка k [6, 7].

Первое условие определяет соотношение между отрезками времени $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$ согласно [6, 7].

Величина погрешности вычисления МДС ε_k минимальна, если при интерполяции отрезки времени одинаковы: $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_S = \dots = \Delta t_V = T_{\text{врм}}/V$. Тогда с учетом выражений (18), (19) получаем $\Delta \Psi_1 = \Delta \Psi_2 = \dots = \Delta \Psi_S = \dots = \Delta \Psi_V = \Delta \Psi = 2\pi/V$. Соответственно выражения для углов таковы:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= 2\pi/V; \quad \Psi_2 = (2\pi/V)_2; \dots \\ \Psi_S &= (2\pi/V)_S; \dots; \Psi_V = 2\pi.\end{aligned}\quad (20)$$

Выражения вида (17) для слагаемых гармонического ряда и соответственно коэффициентов Фурье [6, 7] a_k, b_k принимают с учетом (20) следующий вид:

для отрезка $\Delta t = t_1$ будет $0 - a_{kS} = (1/\pi)F \times (\alpha, m, \Delta t_1) \sin \Psi_1$;

для отрезка $\Delta t = t_2 - t_1$ — соответственно $a_{kS} = (1/\pi)F(\alpha, m, \Delta t_2) [\sin(k2\Psi_1) - \sin(k\Psi_1)]$;

для произвольного отрезка времени $\Delta t = t_S - t_{S-1}$

$$a_{kS} = (1/\pi)F(\alpha, m, \Delta t_S) \{ [\sin(kS\Psi_1) - \sin[(k(S-1)\Psi_1)] \}. \quad (21)$$

Выражение для коэффициентов Фурье вида b_{kS} [6, 7] записывается аналогично (21).

Второе условие определяет число отрезков времени $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$ (число V), на которые подразделяется временной период $T_{\text{врм}}$:

$$\begin{aligned}|1 - E_{\text{дискр}}| &< \varepsilon_{\text{расч}}, \text{ где } E_{\text{дискр}} = \\ &= |F(\alpha, m, t, k)|_W / |F(\alpha, m, t, k)|_Z.\end{aligned}\quad (22)$$

Здесь амплитуда МДС $|F(\alpha, m, t, k)|_W$ вычислена при числе отрезков времени $W = V$, а МДС $|F(\alpha, m, t, k)|_Z$ — при числе отрезков $Z = V + 1$.

Уравнения (11)–(13) определяют амплитуды пространственных гармоник МДС порядка m для ряда отрезков $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$, а уравнения (16)–(21) — изменение этих амплитуд во времени в виде гармоник порядка k для тех же значений $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_V$.

Из этих уравнений следует, что МДС обмотки за период $T_{\text{врм}}$ определяется в виде ряда слагаемых (числом V), каждое из которых содержит произведение вида $\Delta F_{mkS} \equiv \sin(\alpha m + \gamma_{mS}) \times \sin(2\pi t_1 k / T_{\text{врм}} + \gamma_{kS})$. Оно может быть представлено в виде

$$\begin{aligned}\Delta F_{mkS} &\equiv \\ &\equiv 0,5[\sin(2\pi t_1 k / T_{\text{врм}} - \alpha m + \gamma_{kS} - \gamma_{mS})] \times \\ &\times [\sin(2\pi t_1 k / T_{\text{врм}} + \alpha m + \gamma_{mS} + \gamma_{kS})].\end{aligned}\quad (23)$$

Первый сомножитель в квадратных скобках в (23) соответствует полю обмотки статора, которое в течение отрезка времени Δt_S вращается в сторону вращения ротора, а второй — в противоположную. При суммировании этих слагаемых получаем МДС обмотки в виде

$$\begin{aligned}F_{mk} &= \Delta F_{mk} + \Delta F_{mk} + \dots + \\ &+ \Delta F_{mkS} + \dots + \Delta F_{mkV}.\end{aligned}$$

МДС F_{mk} определяет оба поля временного порядка k и пространственного порядка m , создаваемых токами в обмотке статора; при взаимодействии с токами в контурах ротора одно из них создает вращающий момент, а второе — тормозной.

Пример расчета

Требуется получить изложенным методом известное [1, 2] расчетное выражение МДС (8') для обмотки двухполюсной машины ($p = 1$), токи в трех фазах которой изменяются по гармоническому закону, причем режим работы — симметричный; ширина фазных зон обмотки одинакова; $Q = 1$; при этом $W_F = 1$; $K_{\text{обм}} = 1$.

Результаты. В таблице сопоставлены погрешности определения МДС изложенным методом при подразделении периода $T_{\text{врм}}$ на следующее число отрезков: $V = 3$ и $V = 15$ ($m = 1, k = 1$).

Погрешность дискретизации периода $T_{\text{врм}}$

V	Ψ_1 по (20), эл. гр.	$\varepsilon_{\text{расч}}$ по (22)
3	120	0,173
15	24	0,0074

Эти результаты подтверждают корректность метода: при выборе числа узлов интерполяции $V = 15$ мы получили выражение (8') с точностью, значительно превышающей требования практики: погрешность вычисления МДС — не более 1 %.

Изложен общий метод определения МДС обмотки статора. Он учитывает, что токи в фазах различны по амплитуде, изменяются во времени



по произвольному (не только гармоническому) закону, а ширина фазных зон в обмотке статора — неодинакова. Метод позволяет определить мгновенные значения электромагнитного момента двигателя и его пульсации, КПД с учетом влияния на потери временных и пространственных гармоник.

Реализация метода включает следующие этапы:

период $T_{\text{врм}}$ изменения токов в фазах i_A, i_B, i_C подразделяется на N отрезков времени ($\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_S, \dots, \Delta t_N$). В пределах каждого из них предполагается, что амплитуда и фазовый угол токов неизменны;

с учетом значений токов i_A, i_B, i_C для каждого отрезка времени Δt_S определяется ступенчатая

функция распределения МДС по периферии рашочки статора. Эта функция представляется для каждого отрезка времени Δt_S в виде ряда с пространственными гармониками порядка m ; значения пространственных гармоник МДС порядка m используются в виде узлов для аппроксимации с помощью ряда с временными гармониками порядка k [6, 7]. Количество N этих узлов определяется точностью $\varepsilon_{\text{расч}}$ вычисления МДС, задаваемой предварительно.

Расчетное выражение для МДС обмотки содержит ряд слагаемых (числом N); каждое из них соответствует двум составляющим поля обмотки статора: одна из них в течение отрезка времени Δt_S вращается в сторону вращения ротора, а вторая — в противоположную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек, А.И. Электрические машины (в двух томах) [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов. — М.: СПб., 2006.
2. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники (в трех томах) [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. — М.: СПб., 2004.
3. Богуславский, И.З. Генераторы и двигатели переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами (в двух томах) [Текст] / И.З. Богуславский. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
4. Богуславский, И.З. Метод расчета асинхронных режимов мощных синхронных машин с учетом распределения токов в демпферной обмотке [Текст] / И.З. Богуславский, В.С. Рогачевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. № 4.
5. Шуйский, В.П. Расчет электрических машин [Текст] / В.П. Шуйский. — М.: Энергия, 1968.
6. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — Пер. с англ. — М.: Наука, 1970.
7. Джефрис, Г. Методы математической физики [Текст] / Г. Джефрис, В. Свирас. — Вып. 2. — М.: Мир, 1970.

УДК 621.316.9

А.В. Зайцев, В.Н. Костин

АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫДЕЛЕНИИ ЭНЕРГОРАЙОНА С ИЗБЫТКОМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ

Выделение части крупной энергосистемы (энергорайона) на изолированную работу может быть обусловлено:

аварийным отключением связей энергорайона с единой системой;

нарушением устойчивости параллельной работы электростанций энергорайона с единой системой;

работой частотной делительной автоматики (ЧДА) при развитии аварии в энергосистеме.

Анализ ряда крупных аварий* показал, что при выделении энергорайона с большим из-

* Аварии в энергосистемах США и Канады (ноябрь 1965 г. и август 2003 г.), Швеции (декабрь 1983 г.), Ленинградской обл. (декабрь 2008 г.), Калининградской обл. (август 2011 г.) и др.

бытком генерируемой мощности работа существующей автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ) приводит, как правило, к излишнему отключению генераторов, дефициту генерации и «погашению» района с полным нарушением электроснабжения потребителей.

В настоящей статье изложена разработка математической модели восстановления баланса мощности при аварийном выделении энергоблока с избытком генерации и различными типами электростанций.

Для ликвидации аварийного избытка мощности необходимо быстрое отключение части генерирующих мощностей. Очевидно, что в первую очередь следует отключать агрегаты, не участвующие в регулировании частоты в системе, и агрегаты, скорость разгрузки которых имеет меньшие значения.

Рассмотрим некоторый крупный энергоблок потенциального выделения, включающий в себя несколько электростанций различного типа. Вне зависимости от типа электростанций разделим их энергоблоки на две категории по возможным способам разгрузки (или отключения) при аварийном выделении энергоблока с избытком генерируемой мощности:

- энергоблоки, допускающие отключение;
- энергоблоки неотключаемые.

Допускающие отключение энергоблоки — это агрегаты станций, не участвующие в регулировании частоты, и агрегаты с относительно медленной скоростью разгрузки, которая практически не оказывает влияния на изменение частоты в энергоблоке после его аварийного выделения с избытком мощности. К ним, в частности, относятся:

агрегаты ТЭЦ, имеющие турбины с противодавлением;

гидроагрегаты, постоянная времени изохрома которых достигает 30 с, а переходный процесс регулирования мощности имеет постоянную времени, достигающую 40 с;

газотурбинные установки (ГТУ), в том числе входящие в состав парогазовых установок (ПГУ), скорость изменения мощности которых не превышает $0,1 P_{ном}$ в минуту [1].

На таких агрегатах следует устанавливать локальные АОПЧ с уставками по частоте 50,5–51,0 Гц и возможностью ввода/вывода этой автоматики в режиме реального времени.

Неотключаемые энергоблоки — это агрегаты станций, участвующие в регулировании частоты и имеющие достаточно высокую скорость разгрузки, которая влияет на снижение частоты в энергоблоке после его аварийного выделения с избытком мощности. Это, в частности, турбоагрегаты тепловых станций. К неотключаемым блокам относятся также такие, отключение которых недопустимо по каким-либо соображениям, например в связи с риском техногенной аварии.

Среди неотключаемых энергоблоков можно выделить нерегулируемые и регулируемые. К нерегулируемым блокам, в частности, относятся энергоблоки, имеющие турбины с противодавлением. Регулируемые энергоблоки можно подразделить так:

агрегаты, мощность которых может быть снижена до величины технического минимума $P_{тех мин}$;

агрегаты, мощность которых может быть снижена до нижней границы регулировочного диапазона $P_{нгрд}$;

агрегаты, имеющие автоматическую систему аварийной разгрузки блока (АСАРБ).

Ставится задача снижения генерируемой мощности в аварийно выделившемся энергоблоке до величины, минимально превышающей мощность нагрузки [2]. В самом общем виде целевая функция задачи будет иметь следующий вид:

$$|\sum P_g - P_n| \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\sum P_g$ — суммарная мощность генерации в энергоблоке; P_n — мощность нагрузки энергоблока в режиме, предшествующем выделению.

Полагая, что мощность нагрузки P_n неизменна, рассмотрим более подробно величину генерации $\sum P_g$

Суммарная мощность энергоблоков (кроме блоков ПГУ), допускающих отключение, составит

$$\sum_i \delta_i P_{исх}, \quad (2)$$

где i — количество энергоблоков; δ_i — двоичные переменные; $P_{исх}$ — мощности энергоблоков в режиме, предшествующем выделению энергоблока.

В блоках ПГУ с одной паровой турбиной могут работать 1, 2, 3, ... ГТУ [2]. Здесь следует учесть, что при отключении одной ГТУ мощность паротурбинной установки снижается про-



порционально, а при отключении всех ГТУ отключается и паротурбинная установка. Следовательно, при условии, что каждая ГТУ определяет равную долю мощности паротурбинной установки, суммарную мощность ПГУ можно записать так:

$$\sum_j \left(\sum_k \delta_k + \frac{\sum_k \delta_k}{k} \right) \frac{P_{\text{ПГУ}j}}{k+1}, \quad (3)$$

где j — количество ПГУ в энергорайоне; $P_{\text{ПГУ}j}$ — мощность j -й ПГУ в режиме, предшествующем выделению энергорайона; k — количество ГТУ в одной ПГУ; δ_k — двоичные переменные, принимающие значения 1 или 0.

Суммарная мощность неотключаемых и нерегулируемых энергоблоков равна

$$\sum_l P_{l\text{исх}}, \quad (4)$$

где l — количество энергоблоков; $P_{l\text{исх}}$ — мощности энергоблоков в режиме, предшествующем выделению энергорайона.

Суммарная мощность неотключаемых регулируемых энергоблоков, у которых есть возможность снижать мощность до величины технического минимума, равна

$$\sum_m P_m, \text{ где } P_{m\text{тех мин}} \leq P_m \leq P_{m\text{исх}}; \quad (5)$$

$P_{m\text{тех мин}}$ — мощности, соответствующие техническому минимуму энергоблока; $P_{m\text{исх}}$ — мощности энергоблоков в режиме, предшествующем выделению энергорайона.

Суммарная мощность неотключаемых регулируемых энергоблоков, у которых есть возможность снижать мощности до нижней границы диапазона регулирования, равна

$$\sum_n P_n, \text{ где } P_{n\text{НГДР}} \leq P_n \leq P_{n\text{исх}}; \quad (6)$$

$P_{n\text{НГДР}}$ — мощности, соответствующие нижней границе диапазона регулирования энергоблока; $P_{n\text{исх}}$ — мощности энергоблоков в режиме, предшествующем выделению энергорайона.

Суммарная мощность неотключаемых регулируемых энергоблоков, оснащенных АСАРБ, равна

$$\sum_q P_q, \text{ где } 0 \leq P_q \leq P_{q\text{исх}}; \quad (7)$$

$P_{q\text{исх}}$ — мощности энергоблоков в режиме, предшествующем выделению энергорайона.

Итак, целевая функция в поставленной задаче будет иметь вид

$$F = \left| \sum_i \delta_i P_{i\text{исх}} + \sum_j \left(\sum_k \delta_k + \frac{\sum_k \delta_k}{k} \right) \frac{P_{\text{ПГУ}j}}{k+1} + \sum_l P_{l\text{исх}} + \sum_m P_m + \sum_n P_n + \sum_q P_q - P_n \right| \rightarrow \min. \quad (8)$$

Минимум целевой функции F необходимо найти при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} P_{m\text{тех мин}} &\leq P_m \leq P_{m\text{исх}}; \\ P_{n\text{НГДР}} &< P_n < P_{n\text{исх}}; \\ 0 &\leq P_q \leq P_{q\text{исх}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение оптимизационной задачи поиска экстремума целевой функции (8) при ограничениях (9) должно выполняться для любого текущего момента времени. В результате этого решения будут получены значения двоичных переменных δ , которые определяют направление действия локальных АОПЧ. При значении некоторой двоичной переменной $\delta = 1$ локальная АОПЧ на соответствующем энергоблоке должна быть выведена, при $\delta = 0$ — введена.

После отключения энергоблоков, для которых двоичные переменные δ равны нулю, баланс мощности в энергорайоне будет достигнут за счет регулирования мощностей P_m , P_n и P_q оставшихся в работе энергоагрегатов.

Поставленная задача сводится к задаче целочисленного линейного программирования; методы ее решения основаны на использовании вычислительных возможностей методов линейного программирования. Алгоритм целочисленного программирования включает три шага [3]: «ослабление» пространства допустимых решений целочисленной задачи путем замены двоичной переменной непрерывным ограничением в диапазоне $0 \leq \delta \leq 1$;

решение задачи линейного программирования симплекс-методом и нахождение непрерывных значений переменных δ ;

введение дополнительных ограничений, которые итерационным путем изменяют пространство допустимых решений задачи линейного программирования таким образом, чтобы в конечном счете получилось оптимальное решение, удовлетворяющее требованиям целочисленности.

Пусть δ — целочисленная переменная, значение которой в предварительном решении получилось дробным. Примем интервал

$$\beta_k \leq \delta_k \leq (\beta_k + 1), \quad (10)$$

который не содержит целочисленных компонентов решения. Допустимое целое значение δ_k должно удовлетворять одному из следующих двух неравенств:

$$\delta_k \geq (\beta_k + 1) \text{ или } \delta_k \leq \beta_k. \quad (11)$$

Это и есть дополнительные ограничения. Введение их порождает две не связанные между собой подзадачи. Каждая подзадача решается как задача линейного программирования с исходной целевой функцией.

После конечного числа шагов будет найдено целочисленное оптимальное решение.

Пример расчета. Рассмотрим район Юга энергосистемы Санкт-Петербурга.

Генерацию в районе осуществляют:

ТЭЦ-14 «Первомайская» (2 блока ПГУ по 180 МВт каждый);

Юго-Западная ТЭЦ (блок ПГУ мощностью 180 МВт);

ТЭЦ-15 «Автовская» (установленная мощность 320 МВт);

ТЭЦ-7 «Василеостровская» (установленная мощность 135 МВт).

Блоки ПГУ состоят каждый из двух ГТУ мощностью по 60 МВт и одной ПТУ мощностью 60 МВт. Блок ПГУ Ю-3 ТЭЦ и один блок ПГУ ТЭЦ-14 не подлежат отключению.

На ТЭЦ-15 четыре агрегата суммарной мощностью 90 МВт способны снизить мощность до технологического минимума 10 МВт, один агрегат мощностью 100 МВт имеет АСАРБ (разгрузка до холостого хода), один агрегат мощностью 100 МВт может разгружаться до нижней границы регулировочного диапазона (до 60 МВт), один агрегат мощностью 30 МВт — нерегулируемый с возможностью отключения.

На ТЭЦ-7 один агрегат мощностью 50 МВт может разгружаться до нижней границы регулировочного диапазона (до 20 МВт), два агрегата 25 и 60 МВт — нерегулируемые, допускающие отключение.

Район Юга является избыточным: мощность генерации в режиме зимнего максимума составляет около 995 МВт, мощность нагрузки — 595 МВт, небаланс между вырабатываемой и потребляемой мощностями — 400 МВт.

В соответствии с выражением целевой функции (8) имеем:

$$\sum_i \delta_i P_{i\text{исх}} = 30\delta_1 + 25\delta_2 + 60\delta_3;$$

$\left(\delta_4 + \delta_5 + \frac{\delta_4 + \delta_5}{2} \right) \frac{180}{3}$ — для блока ПГУ с возможностью отключения;

$\sum_l P_{l\text{исх}} = 180 + 180 = 360$ — неотключаемые два блока ПГУ;

$\sum_m P_m, \sum_n P_n, \sum_q P_q$ — регулируемые мощности;

$P_n = 595$ МВт — мощность нагрузки.

Целевая функция будет иметь следующий вид:

$$F = | 30\delta_1 + 25\delta_2 + 60\delta_3 + \left(\delta_4 + \delta_5 + \frac{\delta_4 + \delta_5}{2} \right) \frac{180}{3} + 360 + \sum_m P_m + \sum_n P_n + \sum_q P_q - 595 | \rightarrow \min.$$

Минимум целевой функции F ищем при следующих ограничениях (в МВт):

$$10 \leq P_m \leq 90; \quad 60 \leq P_{n1} \leq 100; \quad 20 \leq P_{n2} \leq 50; \\ 0 \leq P_q \leq 100.$$

Результаты решения:

отключение одного блока ПГУ 180 МВт на ТЭЦ-14;

отключение агрегата мощностью 30 МВт на ТЭЦ-15;

отключение двух агрегатов 25 и 60 МВт на ТЭЦ-7;

действие АСАРБ на агрегате 100 МВт на ТЭЦ-15;

снижение мощности четырех агрегатов ТЭЦ-15 до 88 МВт;

снижение мощности агрегата 100 МВт на ТЭЦ-15 до 98 МВт;

снижение мощности агрегата 50 МВт на ТЭЦ-7 до 49 МВт.

Суммарная генерируемая мощность в районе не снизится на 400 МВт, и баланс мощности будет восстановлен.

Таким образом, в режиме наибольшей нагрузки в районе Юга должны быть введены в действие локальные АОПЧ на агрегатах 30 МВт ТЭЦ-15, агрегатах 25 и 60 МВт ТЭЦ-7, АСАРБ на агрегате 100 МВт ТЭЦ-15. По предлагаемой математической модели могут быть выполнены аналогичные расчеты для любого другого момента времени.



Полученные результаты могут быть рекомендованы проектным организациям для использования при разработке алгоритмов и уставок автоматики ограничения повышения частоты крупных энергорайонов с учетом технических возможностей станционного оборудования.

Внедрение результатов исследований в диспетчерские управления позволит вести постоянный мониторинг районов потенциального выделения и автоматически менять уставки и направления действия локальных комплексов противоаварийной автоматики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические требования к маневренности энергетических парогазовых установок блочных тепловых электростанций [Текст] / РАО «ЕЭС России». — СО 34.30.741–96 — М.: Изд-во РАО «ЕЭС России», 1996. — 12 с.

2. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты

при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка) [Текст]: Стандарт ОАО «СО ЕЭС» / СО ЕЭС. — М.: Изд-во РАО «ЕЭС» 2009. — 12 с.

3. Вагнер, Г. Основы исследования операций [Текст] / Г. Вагнер. — М.: Изд-во «Мир», 1973. — 503 с.

УДК 621.314

М.А. Шакиров

ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Часть 2: ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ОБМОТКАМИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Настоящая работа — этап, следующий за [1], по ознакомлению с новой теорией силовых трансформаторов и их 2Т-образными схемами замещения [2–4] в то время, как учебники содержат неверные представления о физических процессах в них. В [1] на примере броневых трансформаторов с тонкими обмотками было показано, что используемые в учебниках понятия об «общей МДС» и создаваемом ею «общем магнитном потоке $\dot{\Phi}_0$ в магнитопроводе трансформатора» противоречат такому доказанному в [4] неперемому условию передачи мощности из первичной обмотки в вторичную, как наличие разности фаз θ между потоками в стержне ($\dot{\Phi}_1$) и боковом ярме ($\dot{\Phi}_2$).

В действительности обмотки имеют конечную толщину, что приводит к еще более сложным взаимосвязям между потоками в стержне и ярмах, в частности к возникновению в стали так называемых аномальных (то есть необъяснимых с точки зрения традиционной теории) сверх- и антипотоков при КЗ одной из обмоток [3, 4]. Это подтверждено как численно [5], так

и экспериментально [6, 7]. Рассматриваемые явления весьма сложны для понимания и вызывают наибольшее число дискуссий, о чем свидетельствует сама публикация статей [3, 6] под грифом «в порядке обсуждения», призывающим к активной дискуссии.

Цель статьи — снять любые сомнения по поводу возникновения аномальных потоков при КЗ и дать им ясное физическое объяснение на основе аналитических соотношений с использованием, как и в [1], идеализированного броневых трансформатора ($\mu_{\text{стали}} = \infty$, высота обмоток равна высоте окна), но содержащего концентрические обмотки конечной толщины. Уточняется смысл понятий сверх- и антипотоков для динамических процессов при внезапных КЗ и подтверждается достоверность 2Т-образных схем замещения трансформатора.

Электрическая схема замещения трансформатора

Пусть $a = a_1$ — толщина обмотки НН, $b = a_2$ — толщина обмотки ВН, а $\delta = a_{12}$ — расстояние между ними, как принято на рис. 1, где также

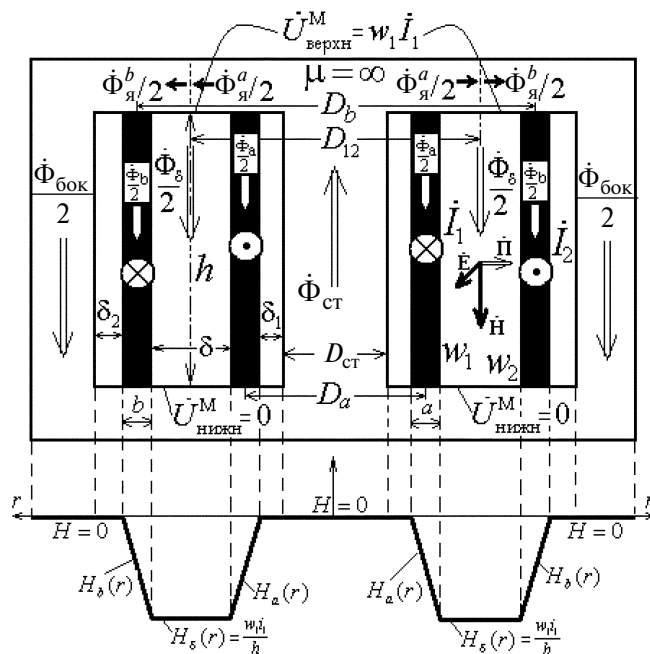


Рис. 1. Распределение напряженности магнитного поля в некоторый момент времени в идеализированном броневом трансформаторе с обмоткой НН толщиной a (число витков w_1) и обмоткой ВН толщиной b (число витков w_2)

показаны условные положительные направления потоков в стержне ($\Phi_{\text{ст}}$) и в межобмоточном пространстве (Φ_{δ}); величина $\Phi_{\text{бок}}$ — суммарный поток в боковых ярмах. Показаны также потоки Φ_a^a , Φ_a^b в стыковых ярмах до и после межобмоточного пространства. Аналогично Φ_{δ} направлены поток Φ_a внутри обмотки НН и поток Φ_b внутри обмотки ВН. Очевидно, что в областях между обмотками и сталью шириной δ_1 и δ_2 поле равно нулю. Так что поток в окне трансформатора при установившемся синусоидальном режиме определяется суммой

$$\Phi_{\text{окно}} = \Phi_a + \Phi_{\delta} + \Phi_b, \quad (1)$$

в которой все слагаемые совпадают по фазе с током \dot{I}_1 .

Как и в [1], в качестве первичной, питаемой напряжением \dot{U}_1 , примем обмотку НН с активным сопротивлением R_1 . Потокосцепление с ней обозначим через $\dot{\Psi}_1$, а индуцируемое в ней напряжение (ЭДС \dot{E}_1) — как

$$\dot{U}_{01} = j\omega\dot{\Psi}_1. \quad (2)$$

Аналогично, напряжение (ЭДС \dot{E}_2), индуцируемое в обмотке ВН потокосцеплением $\dot{\Psi}_2$, представим в виде

$$\dot{U}_{02} = j\omega\dot{\Psi}_2. \quad (3)$$

Активное сопротивление обмотки ВН равно R_2 , а подсоединенное к ней сопротивление нагрузки — Z_n . Напряжение на нагрузке — $\dot{U}_n = Z_n \dot{I}_2$. Коэффициент трансформации равен

$$n = w_1 / w_2. \quad (4)$$

При обходе любого контура в магнитопроводе, включающем путь вдоль стержня бокового яра (рис. 1), согласно закону полного тока

$$w_1 \dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_2 = 0, \quad (5)$$

откуда следует, что в идеализированном трансформаторе

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (6)$$

(в режиме ХХ $\dot{I}_1^{\text{ХХ}} = 0$; $\dot{I}_2^{\text{ХХ}} = 0$ (или $\dot{I}_2^{\text{ХХ}} = \dot{I}_2^{\text{ХХ}} = 0$)).

В общем случае, включая переходные процессы,

$$i_1(t) = i_2'(t) \text{ (где } i_2'(t) = i_2(t) / n; i_1^{XX} = i_2^{XX} = 0 \text{)}; \quad (7)$$

$$\Phi_{CT}(t) = \Phi_{OKHO}(t) + \Phi_{\bar{6}OK}(t);$$

$$\Phi_{\text{OKHO}}(t) = \Phi_a(t) + \Phi_\delta(t) + \Phi_b(t), \quad (8)$$

причем все потоки и индукции в окне изменяются во времени синхронно с током $i_1(t) = i_2'(t)$. Уравнение для напряжения $u_1(t)$ на обмотке НН можно представить в виде

$$R_1 i_1 + u_{01} = u_1, \quad (9)$$

где согласно (2)

$$u_{01}(t) = \frac{d\Psi_1(t)}{dt}. \quad (10)$$

Для индуктированного на обмотке ВН напряжения имеем два уравнения:

$$u_{02}(t) = \frac{d\Psi_2(t)}{dt} \quad \left(\text{или} \quad u'_{02} = \frac{d\Psi'_2}{dt} \right); \quad (11)$$

$$R_2 i_2 + u_{\text{H}} = u_{02} \quad (\text{или} \quad R_2' i_2' + u_{\text{H}}' = u_{02}'). \quad (12)$$

Здесь

$$u'_{02} = nu_{02}, \Psi'_2 = n\Psi_2, R'_2 = n^2 R_2, u'_H = nu_H. \quad (13)$$

Важным параметром электрической схемы замещения трансформатора является его *продольная внутренняя индуктивность* $L_{\text{внут}}$, совпадающая с индуктивностью КЗ ($L_{\text{внут}} = L_{\text{КЗ}}$). Наиболее просто она определяется на основе соотношения для магнитной энергии в окне трансформатора в произвольный момент времени

$$W_{\text{OKHO}}^{\text{M}}(t) = W_a^{\text{M}}(t) + W_{\delta}^{\text{M}}(t) + W_b^{\text{M}}(t) = \frac{L_{\text{BHYT}} i_1^2(t)}{2}, \quad (14)$$

где W_a^M , W_δ^M и W_b^M — значения магнитных энергий соответственно в области обмотки НН, межобмоточном пространстве шириной δ и области обмотки ВН (см. рис. 1). Из (14) следует

$$L_{\text{BHT}} \equiv L_{\text{K3}} = \frac{2W_a^{\text{M}}}{i_1^2} + \frac{2W_\delta^{\text{M}}}{i_1^2} + \frac{2W_b^{\text{M}}}{i_1^2} = L_a + L_\delta + L'_b, \quad (15)$$

где индуктивность L'_b обозначена со штрихом, поскольку она получена делением магнитной

энергии W_b^M на квадрат тока $i_1^2 = i_2'^2$ (а не на i_2^2).
Очевидно, справедливо соотношение

$$L'_b = n^2 L_b \quad \left(\text{где } L_b = 2W_b^M / i_2^2 \right). \quad (16)$$

Равенство $i_1^{XX} = 0$ подсказывает, что электрическая схема замещения трансформатора не может содержать поперечных ветвей. Выражения (9) и (12) с учетом разложения (15) отображают схемы замещения на рис. 2. Величины L_a , L'_b в [3] обозначены как L_{aa} , L'_{bb} . Внутреннее сопротивление трансформатора равно

$$Z_{\text{BHYT}} \equiv Z_{\text{K3}} = r_{\text{K3}} + jx_{\text{K3}}, \quad (17)$$

где

$$r_{\text{K}3} = R_1 + R'_2, \quad x_{\text{K}3} = \omega L_{\text{K}3}. \quad (18)$$

Согласно схеме (рис. 2, б)

$$u_{01} = u'_{02} + (L_a + L_\delta + L'_b) \frac{di_1}{dt}. \quad (19)$$

Представляет интерес использование коэффициентов L_a, L'_b в выражениях для потоко-сцеплений $\Psi_1(t), \Psi_2(t)$ первичной и вторичной обмоток.

Замечание 1. Эта непростая задача имеет ключевое значение, поскольку нет никаких оснований использовать представленные ниже как зачеркнутые соотношения типа

~~$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - L_{q1} i_1(t) ;$$~~

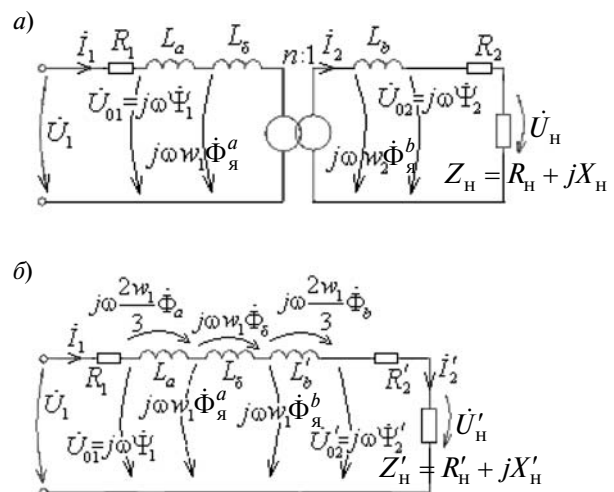


Рис. 2. Электрические схемы замещения идеализированного трансформатора с идеальным трансформатором (а) и без него (б)

$$\Psi_2(t) = w_2 \Phi_2(t) + L_b i_2(t) ;$$

$$\Psi_2'(t) = w_1 \Phi_2(t) + L_b' i_1(t) .$$

По этой же причине

$$w_1 \Phi_a(t) \neq L_a i_1(t) , \quad w_2 \Phi_b(t) \neq L_b i_2(t) ,$$

$$w_1 \Phi_{\text{окно}}(t) \neq L_{\text{внут}} i_1(t) . \quad (20)$$

Примечание 1. Схемы на рис. 2 формально могут быть получены из известной Т-образной, однако в них исключено разделение сопротивления КЗ — $L_{\text{внут}} = L_{\text{КЗ}}$ — на составляющие $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ и отсутствует одиозная точка подключения «ветви намагничивания» между ними для выявления искусственного «общего потока Φ_0 ». Вместо них на схеме (рис. 2) выделены элементы L_a, L_δ, L_b' , играющие ключевую роль в определении *реальных потоков* и объяснении *нового принципа передачи мощности* из первичной во вторичную обмотку трансформатора с использованием вектора Пойнтинга, рассматриваемого в конце статьи.

Внутренняя индуктивность трансформатора

Из (15) вытекает: чтобы выразить величины L_δ , L_a и L_b (или L_b') через геометрические параметры обмоток, необходимо располагать выражениями для энергии во всех зонах окна трансформатора. На основании кривой распределения напряженности магнитного поля, показанного в нижней части рис. 1, для мгновенного значения магнитной энергии в *межобмоточном пространстве* шириной δ можем написать

$$\begin{aligned} W_\delta^M(t) &= \frac{\mu_0 H_\delta^2(t)}{2} h \delta \pi D_{12} = \\ &= \frac{\mu_0 \pi \delta D_{12} w_1^2}{2h} i_1^2(t) = \frac{L_\delta i_1^2(t)}{2} . \end{aligned} \quad (21)$$

Энергия магнитного поля в зоне *внутренней* обмотки шириной a равна

$$\begin{aligned} W_a^M(t) &= \frac{\mu_0 H_a^2(t)}{2} \int_{(D_a-a)/2}^{(D_a+a)/2} h 2\pi r dr = \\ &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{6h} a \left(D_a + \frac{a}{2} \right) i_1^2(t) = \frac{L_a i_1^2(t)}{2} , \end{aligned} \quad (22)$$

где $H_a(t, r)$ — напряженность поля в зоне внутренней обмотки, изменяющаяся согласно графику на рис. 1 по закону

$$H_a(t, r) = \frac{w_1 i_1(t)}{h} \frac{r - (D_a - a)/2}{a} . \quad (23)$$

Энергия магнитного поля в зоне *внешней* обмотки шириной b равна

$$\begin{aligned} W_b^M(t) &= \int_{(D_b-b)/2}^{(D_b+b)/2} \frac{\mu_0 H_b^2(t)}{2} h 2\pi r dr = \\ &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{6h} b \left(D_b - \frac{b}{2} \right) i_1^2(t) = \frac{L_b' i_1^2(t)}{2} , \end{aligned} \quad (24)$$

где $H_b(t, r)$ — напряженность поля в зоне внешней обмотки, изменяющаяся согласно графику на рис. 1 по закону

$$H_b(t, r) = \frac{w_1 i_1(t)}{h} \frac{(D_b + b)/2 - r}{b} . \quad (25)$$

Решая (22), (21) и (24) относительно индуктивностей, получаем

$$L_a = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{3h} a \left(D_a + \frac{a}{2} \right) \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{3} ; \quad (26)$$

$$L_\delta = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \delta D_{12} ; \quad (27)$$

$$L_b' = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{3h} b \left(D_b - \frac{b}{2} \right) \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{b D_b}{3} , \quad (28)$$

откуда следует, что они соотносятся между собой как

$$L_a : L_\delta : L_b' = \frac{a D_a}{3} : \delta D_{12} : \frac{b D_b}{3} , \quad (29)$$

или (грубо), полагая приближенно $D_a \approx D_b \approx D_{12}$, как $(a/3) : \delta : (b/3)$. Суммируя соотношения (26), (27), (28), получаем

$$\begin{aligned} L_{\text{внут}} \equiv L_{\text{КЗ}} &= L_a + L_\delta + L_b' = \\ &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \left(\frac{a D_a}{3} + \frac{a^2}{6} + \delta D_\delta + \frac{b D_b}{3} - \frac{b^2}{6} \right) . \end{aligned}$$

Учитывая геометрические зависимости

$$D_a = D_{12} - \delta - a ; \quad D_b = D_{12} + \delta + b , \quad (30)$$

нетрудно получить также следующее выражение для внутренней индуктивности (15) идеализированного трансформатора:

$$\begin{aligned} L_{\text{внут}} \equiv L_{\text{КЗ}} &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \times \\ &\times \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3} (b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right) \right] . \end{aligned} \quad (31)$$

Замечание 2. Обозначая магнитные сопротивления пространств, занимаемых обмотками, и промежутка между обмотками соответственно как

$$R_a^M = h / (\mu_0 a \pi D_a); \quad R_b^M = h / (\mu_0 b \pi D_b);$$

$$R_\delta^M = h / (\mu_0 \delta \pi D_{12}), \quad (32)$$

можно приближенные выражения для индуктивностей представить в виде

$$L_a \approx \frac{w_1^2}{3R_a^M}; \quad L_b' \approx \frac{w_1^2}{3R_b^M}; \quad L_\delta \approx \frac{w_1^2}{R_\delta^M}. \quad (33)$$

Магнитные потоки в окне трансформатора и их отображение на схеме замещения

Новое объяснение принципа действия трансформатора основывается на представлении обмоток как *единой системы*, предназначенной для создания в межобмоточном пространстве *разности магнитных потенциалов* между верхним и нижним торцевыми ярами (см. рис. 1):

$$u_{\text{верхн}}^M - u_{\text{нижн}}^M = w_1 i_1(t) \equiv w_2 i_2(t).$$

Под ее действием возникают магнитный поток и индукция:

$$\Phi_\delta(t) = \frac{w_1 i_1(t)}{R_\delta^M}, \quad B_\delta(t) = \frac{\Phi_\delta(t)}{\delta \pi D_{12}}. \quad (34)$$

Они играют важнейшую роль в формировании вектора Пойнтинга в межобмоточном пространстве. После подстановки (32) в (34) и учета (27) получаем

$$\Phi_\delta(t) = \frac{\mu_0 \pi \delta D_{12}}{h} w_1 i_1(t) = \frac{L_\delta i_1(t)}{w_1}. \quad (35)$$

Магнитный поток во *внутренней* обмотке с учетом распределения (23) равен

$$\Phi_a(t) = \int_{(D_a-a)/2}^{(D_a+a)/2} \mu_0 H_a(t, r) 2\pi r dr =$$

$$= \mu_0 \frac{\pi}{2} a \left(D_a + \frac{a}{3} \right) \frac{w_1 i_1(t)}{h}, \quad (36)$$

или, принимая во внимание (26),

$$\Phi_a(t) = \frac{3}{2} \left(\frac{D_a + a/3}{D_a + a/2} \right) \frac{L_a i_1(t)}{w_1} \approx \frac{3}{2} \frac{L_a i_1(t)}{w_1}. \quad (37)$$

Магнитный поток во *внешней* обмотке с учетом распределения (25) равен

$$\Phi_b(t) = \int_{(D_b-a)/2}^{(D_b+a)/2} \mu_0 H_b(t, r) 2\pi r dr =$$

$$= \mu_0 \frac{\pi}{2} b \left(D_b - \frac{b}{3} \right) \frac{w_1 i_1(t)}{h}, \quad (38)$$

или, принимая во внимание (28),

$$\Phi_b(t) = \frac{3}{2} \left(\frac{D_b - b/3}{D_b - b/2} \right) \frac{L_b' i_1(t)}{w_1} \approx \frac{3}{2} \frac{L_b' i_1(t)}{w_1}. \quad (39)$$

Переходя в (35), (37) и (39) к комплексной форме записи, получаем возможность выразить напряжения на элементах L_a , L_δ и L_b' через магнитные потоки, как показано на схеме замещения рис. 2, б. Полученные здесь соотношения показывают, что, если ток $i_1(t)$ известен, то найти потоки и индукции в окне не представляет труда, и в любой момент времени потоки в окне (а также их амплитуды и действующие значения) соотносятся между собой как

$$\Phi_a : \Phi_\delta : \Phi_b = \frac{3L_a}{2} : L_\delta : \frac{3L_b'}{2} =$$

$$= \frac{aD_a}{2} : \delta D_{12} : \frac{bD_b}{2}, \quad (40)$$

или (грубо) как $(a/2) : \delta : (b/2)$. После подстановки правых частей формул (35), (37) и (39) в (8) приходим к следующему выражению для потока в окне:

$$\Phi_{\text{окно}}(t) = \mu_0 \pi \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{b-a}{2} \left(\delta + \frac{2(a+b)}{3} \right) \right] \frac{w_1 i_1(t)}{h}; \quad (41)$$

при его получении были учтены геометрические соотношения (30). С учетом приближенных представлений в правых частях (37) и (39) имеем также

$$\Phi_{\text{окно}}(t) \approx \left(L_\delta + \frac{3}{2} (L_a + L_b') \right) \frac{i_1(t)}{w_1}. \quad (42)$$

Соотношения (37), (39) и (42) подтверждают замечание (20).

Потокоцепления с первичной и вторичной обмотками

Магнитные потоки $\Phi_1(t)$ (в стержне) и $\Phi_a(t)$ (в толще обмотки НН) образуют потокоцепление $\Psi_1(t)$ обмотки НН шириной a (см. рис. 1). Чтобы получить выражение для $\Psi_1(t)$, выделим

в ней элементарный слой радиуса r толщиной dr . В этом слое протекает элементарный магнитный поток, который на основании (23) можно представить в виде

$$d\Phi_a = \mu_0 H_a(r) 2\pi r dr = \\ = \mu_0 \frac{r - (D_a - a)/2}{a} 2\pi r \frac{w_1 i_1(t)}{h} dr.$$

Очевидно, что этот поток сцепляется лишь с частью витков внутренней обмотки, находящихся за пределами элементарного слоя, откуда

$$d\Psi_a = \frac{w_1}{a} \left(\frac{D_a + a}{2} - r \right) d\Phi_a.$$

Полное потокосцепление с внутренней обмоткой равно

$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \int_{(D_a - a)/2}^{(D_a + a)/2} d\Psi_a = \\ = w_1 \Phi_1(t) - \frac{\mu_0 2\pi w_1}{a} \frac{w_1 i_1(t)}{ah} \times \\ \times \int_{(D_a - a)/2}^{(D_a + a)/2} r \left(r - \frac{D_a - a}{2} \right) \left(\frac{D_a + a}{2} - r \right) dr = \\ = w_1 \Phi_1(t) - \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{6} i_1(t),$$

что с учетом (26) можно также представить в виде

$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{L_a i_1(t)}{2}, \quad (43)$$

а с учетом (37) — в виде

$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{w_1 \Phi_a(t)}{3}. \quad (44)$$

Аналогичным образом можно получить выражение (см. табл. 1) для $\Psi_2(t)$ (или $\Psi'_2(t) = n\Psi_2(t)$).

Знаки приближения в формулах табл. 1 обусловлены упрощениями, принятыми в выражениях (37) и (39).

Замечание 3. Достоверность выражений табл. 1 подтверждается тем, что они удовлетворяют соотношению для магнитной энергии, которое с учетом различия в направлениях $\Phi_1 \equiv \Phi_{\text{ст}}$ и $\Phi_2 \equiv \Phi_{\text{бок}}$ имеет вид

$$W^M = \frac{\Psi_1 i_1}{2} - \frac{\Psi_2 i_2}{2} = \frac{\Psi_1 i_1}{2} - \frac{\Psi'_2 i_1}{2} = \\ = W_a^M + W_\delta^M + W_b^M. \quad (45)$$

Непосредственно из (45) вытекает также равенство

$$\Psi_1 - \Psi'_2 = (L_a + L_\delta + L'_b) i_1, \quad (46)$$

Таблица 1

Основные соотношения для потоков и потокосцеплений

Зона окна	Вклад во внутреннюю индуктивность	$\Phi(t)$	$\Psi(t)$	$\Psi(t)$ (через потоки)
Обмотка НН	$L_a \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{3}$	$\Phi_a(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L_a i_1(t)}{w_1}$	$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{L_a i_1(t)}{2}$	$w_1 \Phi_1(t) - \frac{w_1 \Phi_a(t)}{3}$
Между обмотками	$L_\delta = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \delta D_{12}$	$\Phi_\delta(t) = \frac{L_\delta i_1(t)}{w_1}$	—	—
Обмотка ВН	$L'_b \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{b D_b}{3}$	$\Phi_b(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L'_b i_1(t)}{w_1}$	$\Psi'_2(t) = w_1 \Phi_2(t) + \frac{L'_b i_1(t)}{2}$	$w_1 \Phi_2(t) + \frac{w_1 \Phi_b(t)}{3}$
Окно	$L_{\text{КЗ}} = L_a + L_\delta + L'_b$, см. также (31)		$\Phi_{\text{окно}}(t) \approx \left(L_\delta + \frac{3}{2} (L_a + L'_b) \right) \frac{i_1(t)}{w_1}$	



явно реализованная на схеме замещения рис. 2, б. К сожалению, выделить на этой схеме напряжения, пропорциональные потокам в стали, т. е. потокам $\dot{\Phi}_1$ или $\dot{\Phi}_2$, не удастся!

Решение уравнений трансформатора для установившегося режима

Непосредственно из схемы рис. 2, б находим по заданному \dot{U}_1 следующие электрические величины:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{I}_2' &= \frac{\dot{U}_1}{Z_{K3} + Z_H'}; & \dot{U}_H' &= \frac{Z_H' \dot{U}_1}{Z_{K3} + Z_H'}; \\ \dot{U}_{01} &= \frac{(jx_{K3} + R_2' + Z_H') \dot{U}_1}{Z_{K3} + Z_H'}; \\ \dot{U}_{02} &= \frac{(R_2' + Z_H') \dot{U}_1}{Z_{K3} + Z_H'}, \end{aligned} \quad (47)$$

что позволяет далее определить потокоцепления обмоток по формулам

$$\dot{\Psi}_1 = \frac{\dot{U}_{01}}{j\omega}, \quad \dot{\Psi}_2' = \frac{\dot{U}_{02}}{j\omega}. \quad (48)$$

Подставив найденное решение для токов в правые части выражений для потоков в окне (см. табл. 1), получаем для них следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_a &= \frac{\dot{\Phi}_a}{\dot{\Phi}_{XX}} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{j\omega L_a}{Z_{K3} + Z_H'}; \\ \dot{\Phi}_b &= \frac{\dot{\Phi}_b}{\dot{\Phi}_{XX}} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{j\omega L_b'}{Z_{K3} + Z_H'}; \\ \dot{\Phi}_\delta &= \frac{\dot{\Phi}_\delta}{\dot{\Phi}_{XX}} = \frac{j\omega L_\delta}{Z_{K3} + Z_H'}, \end{aligned} \quad (49)$$

где $\dot{\Phi}_{XX}$ — поток XX, равный

$$\dot{\Phi}_{XX} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1}. \quad (50)$$

Для суммарного потока в окне имеем

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{\text{окно}} &= \frac{\dot{\Phi}_{\text{окно}}}{\dot{\Phi}_{XX}} \approx \frac{j\omega \left(L_\delta + \frac{3}{2}(L_a + L_b') \right)}{Z_{K3} + Z_H'} = \\ &= k_{\text{окно}} \frac{j\omega L_{K3}}{Z_{K3} + Z_H'}, \end{aligned} \quad (51)$$

где коэффициент

$$k_{\text{окно}} = \frac{L_\delta + \frac{3}{2}(L_a + L_b')}{L_{K3}}$$

показывает, во сколько раз поток $\dot{\Phi}_{\text{окно}}$ в трансформаторе с широкими обмотками превышает поток $\dot{\Phi}_{\text{окно}}^{\text{тонк}}$ в окне эквивалентного трансформатора с тонкими обмотками при одинаковых значениях L_{K3} . Нетрудно, пользуясь выражениями из правой колонки табл. 1, получить относительные значения потоков (или индукций) в стержне и боковом ярме:

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 &= \frac{\dot{B}_{m1}}{\dot{B}_m^{\text{XX}}} = \dot{\Phi}_1 = \frac{\dot{\Phi}_1}{\dot{\Phi}_{XX}} \equiv \frac{\dot{\Phi}_{\text{ст}}}{\dot{\Phi}_{XX}} = \\ &= \frac{1}{\dot{\Phi}_{XX}} \left(\frac{\dot{\Psi}_1}{w_1} + \frac{\dot{\Phi}_a}{3} \right) \approx 1 + \frac{-R_1 + j\omega L_a / 2}{Z_{K3} + Z_H'}, \quad (52) \\ \dot{B}_2 &= \frac{\dot{B}_{m2}}{\dot{B}_m^{\text{XX}}} = \dot{\Phi}_2 = \frac{\dot{\Phi}_2}{\dot{\Phi}_{XX}} \equiv \frac{\dot{\Phi}_{\text{бок}}}{\dot{\Phi}_{XX}} = \\ &= \frac{1}{\dot{\Phi}_{XX}} \left(\frac{\dot{\Psi}_2'}{w_1} - \frac{\dot{\Phi}_b}{3} \right) \approx \frac{R_2' + Z_H' - j\omega L_b' / 2}{Z_{K3} + Z_H'}. \quad (53) \end{aligned}$$

В выражениях (49), (51), (52) и (53) аргументы измеряются относительно направления вектора $\dot{\Phi}_{XX}$, отстающего от вектора \dot{U}_1 на 90° .

Пример 1. В табл. 2 представлены эти величины для номинальных режимов и режима КЗ обмотки ВН повышающего трансформатора (см. рис. 1) со следующими каталожными данными [3]: $S_{\text{ном}} = 3,333 \text{ МВА}$, $U_{\text{НН}} = 6,35 \text{ кВ}$; $U_{\text{ВН}} = 66,4 \text{ кВ}$; $P_{K3} = 20 \text{ кВт}$; $\mu_{K3} = 10,5 \%$. Поскольку рассматривается трансформатор с $\mu_{\text{стали}} = \infty$, то данными XX ($\underline{I}_0 = 0,9 \%$, $z_0 = U_{1\text{ном}} / I_0 = 1344 \text{ Ом}$ и $P_{XX} = 4,67 \text{ кВт}$) пренебрегаем. Чисто стальное сечение стержня $s_{\text{Fe}} = 0,135 \text{ м}^2$. Амплитуда индукции в магнитопроводе при XX $B_m^{\text{XX}} = \sqrt{2} U_{\text{НН}} / (\omega w_1 s_{\text{Fe}}) = 1,65 \text{ Тл}$. По каталожным данным находим $I_{1\text{ном}} = S_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}} = 525 \text{ А}$; $z_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} / I_{1\text{ном}} = 12,095 \text{ Ом}$; $z_{K3} = 1,27 \text{ Ом}$, $r_{K3} = 0,0726 \text{ Ом}$, $x_{K3} \approx z_{K3} = 1,27 \text{ Ом}$, $\text{tg} \varphi_{K3} = 17,5$ ($\varphi_{K3} = 1,5137 \text{ рад} = 86,73^\circ$). Ток КЗ $I_1^{K3} = I_{1\text{ном}} / 0,105 = 5 \text{ кА}$. Практически $\mu_{K3} = z_{K3} = z_{K3} / z_{1\text{ном}} \approx x_{K3} / z_{1\text{ном}} = x_{K3} = 0,105$.

Габариты: $D_{\text{ст}} = 436,8 \text{ мм}$; $h = 873,6 \text{ мм}$; $D_{12} = 630,7 \text{ мм}$; $w_1 = 128$; $w_2 = 1341$. Геометрические

Таблица 2

Сравнение потоков при номинальных нагрузках и в режиме КЗ обмотки ВН

Поток, отнесенный к $\dot{\Phi}_{XX}$	Активная нагрузка $Z'_{H\text{ ном}}^R = 11,9 \text{ Ом}$	Индуктивная нагрузка $Z'_{H\text{ ном}}^L = j10,8 \text{ Ом}$	Емкостная нагрузка $Z'_{H\text{ ном}}^C = -j13,3 \text{ Ом}$	Режим КЗ, $Z'_H = 0$
$\dot{\Phi}_1 = \dot{B}_1$	$0,997 \exp j0,42^\circ$	$1,007 \exp j0,173^\circ$	$0,992 \exp j(-0,170^\circ)$	$1,067 \exp j1,74^\circ$
$\dot{\Phi}_2 = \dot{B}_2$	$0,991 \exp j(-6,85^\circ)$	$0,880 \exp j0,148^\circ$	$1,120 \exp j(-0,190^\circ)$	$0,145 \exp j(-165^\circ)$
$\dot{\Phi}_a$	$0,021 \exp j84^\circ$	$0,021 \exp j0,343^\circ$	$0,021 \exp j179,65^\circ$	$0,206 \exp j3,27^\circ$
$\dot{\Phi}_\delta$	$0,060 \exp j84^\circ$	$0,060 \exp j0,343^\circ$	$0,060 \exp j179,65^\circ$	$0,575 \exp j3,27^\circ$
$\dot{\Phi}_b$	$0,044 \exp j84^\circ$	$0,044 \exp j0,343^\circ$	$0,044 \exp j179,65^\circ$	$0,427 \exp j3,27^\circ$
$\dot{\Phi}_{\text{окно}}$	$0,126 \exp j84^\circ$	$0,127 \exp j0,343^\circ$	$0,127 \exp j179,65^\circ$	$1,208 \exp j3,27^\circ$
θ_Ψ , рад, по формуле (66)	$\theta_\Psi = 0,1049$ ($\theta_\Psi \approx \alpha_{K3} = 0,105$)	$\theta_\Psi = 3,5 \cdot 10^{-4}$ ($\theta_\Psi \rightarrow 0$)	$\theta_\Psi = 2,8 \cdot 10^{-4}$ ($\theta_\Psi \rightarrow 0$)	$\theta_\Psi = 1,542$ ($\theta_\Psi \rightarrow \pi/2$)
θ_b , рад	$\theta_b = 0,015$ ($\theta_b \approx 0$)	$\theta_b \rightarrow 0$	$\theta_b \rightarrow 0$	$\theta_b = 1,3731$ ($\theta_b \rightarrow \pi/2$)
θ_a , рад	$\theta_a \approx 0,0072$ ($\theta_a \approx 0$)	$\theta_a \rightarrow 0$	$\theta_a \rightarrow 0$	$\theta_a = 0,0018$ ($\theta_a \rightarrow 0$)
θ , рад	$\theta = 0,1266$ ($\theta \approx \alpha_{K3} = 0,105$)	$\theta \rightarrow 0$	$\theta \rightarrow 0$	$\theta = \pi - 0,2222$ ($\theta \rightarrow \pi$)

данные обмоток: $\delta_1 = a_{01} = 30 \text{ мм}$; $a = a_1 = 41,9 \text{ мм}$; $\delta = a_{12} = 50 \text{ мм}$; $b = a_2 = 62,9 \text{ мм}$; $\delta_2 = a_{22} = 50 \text{ мм}$; $D_a = 538,8 \text{ мм}$; $D_b = 743,6 \text{ мм}$.

По формулам табл. 1 находим $L_a = 0,557 \text{ мГн}$ ($\omega L_a = 0,175 \text{ Ом}$); $L_\delta = 2,33 \text{ мГн}$ ($\omega L_\delta = 0,732 \text{ Ом}$); $L'_b = 1,154 \text{ мГн}$ ($\omega L'_b = 0,362 \text{ Ом}$); $L_{K3} = 4,04 \text{ мГн}$.

Сопротивления нагрузки, указанные в колонках 2, 3 и 4 табл. 2, обеспечивают номинальное сопротивление на входных зажимах трансформатора исходя из соотношения

$$z_{1\text{ ном}} = \sqrt{(r_{K3} + R'_H)^2 + (x_{K3} + X'_H)^2} = 12,095 \text{ Ом.} \quad (54)$$

Номинальные чисто активная, чисто индуктивная и чисто емкостная нагрузки равны

$$Z'_{H\text{ ном}}^R \equiv R'_{H\text{ ном}} = \sqrt{z_{1\text{ ном}}^2 - x_{K3}^2 - r_{K3}^2} = 11,955 \text{ Ом;} \quad (55)$$

$$Z'_{H\text{ ном}}^L \equiv jX'_{H\text{ ном}}^L = j\left(\sqrt{z_{1\text{ ном}}^2 - r_{K3}^2} - x_{K3}\right) = j10,825 \text{ Ом;} \quad (56)$$

$$Z'_{H\text{ ном}}^C \equiv -jX'_{H\text{ ном}}^C = -j\left(\sqrt{z_{1\text{ ном}}^2 - r_{K3}^2} + x_{K3}\right) = -j13,365 \text{ Ом.} \quad (57)$$

В табл. 2 рамками обведены потоки в стали, имеющие наибольшие отклонения по модулю



от потока ХХ вследствие влияния как характера нагрузки, так и толщин обмоток.

Для объяснения уменьшения потока Φ_2^L при номинальной индуктивной нагрузке следует учесть, что практически эта нагрузка определяется из соотношения

$$Z'_{\text{н ном}} = jX'_{\text{н ном}} \approx j(z_{1\text{ ном}} - x_{\text{КЗ}}), \quad (58)$$

что позволяет для этого случая переписать (53) (пренебрегая R'_2) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\Phi}_2^L}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} &= \frac{\dot{\Phi}_2^L}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx \frac{j(z_{1\text{ ном}} - x_{\text{КЗ}}) - j\omega L'_b / 2}{jz_{1\text{ ном}}} = \\ &= 1 - \underline{u}_{\text{КЗ}} - \frac{\omega L'_b}{2z_{1\text{ ном}}}. \end{aligned} \quad (59)$$

Как видно, для тонких обмоток $\dot{\Phi}_2^L \approx 1 - \underline{u}_{\text{КЗ}} = 0,895$, тогда как в нашем случае

$$\dot{\Phi}_2^L \approx 1 - 0,105 - \frac{0,362}{2 \cdot 12,095} = 0,88, \quad (60)$$

что совпадает с результатом в табл. 2 для номинальной индуктивной нагрузки. Чтобы объяснить увеличение потока Φ_2^C при номинальной емкостной нагрузке, отметим, что эта нагрузка практически определяется соотношением

$$Z'_{\text{н ном}} = -jX'_{\text{н ном}} \approx -j(z_{1\text{ ном}} + x_{\text{КЗ}}); \quad (61)$$

это приводит (53) к виду

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\Phi}_2^C}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} &= \frac{\dot{\Phi}_2^C}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx \frac{-j(z_{1\text{ ном}} + x_{\text{КЗ}}) - j\omega L'_b / 2}{-jz_{1\text{ ном}}} = \\ &= 1 + \underline{u}_{\text{КЗ}} + \frac{\omega L'_b}{2z_{1\text{ ном}}}. \end{aligned} \quad (62)$$

При этом для тонких обмоток $\dot{\Phi}_2^C \approx 1 + \underline{u}_{\text{КЗ}} = 1,105$, тогда как в нашем случае

$$\dot{\Phi}_2^C \approx 1 + 0,105 + \frac{0,362}{2 \cdot 12,095} = 1,12, \quad (63)$$

что совпадает с результатом табл. 2 для номинальной емкостной нагрузки.

Нетрудно проверить, что потоки в окне удовлетворяют соотношению (40) при любых нагрузках, а также в режиме КЗ. Коэффициент $k_{\text{окно}}$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} k_{\text{окно}} &= \frac{\omega L_{\delta} + 1,5(\omega L_a + \omega L'_b)}{\omega L_{\text{КЗ}}} = \\ &= \frac{0,732 + 1,5(0,175 + 0,362)}{1,27} = 1,21. \end{aligned}$$

Именно во столько раз все значения $\Phi_{\text{окно}}$ в табл. 2 больше соответствующих значений для трансформатора с тонкими обмотками, приведенных в [1, табл.1].

Замечание 4. Соотношения (52), (53) — ключевые при определении сверх- и антипотоков в трансформаторе в режиме установившегося КЗ, когда аномалии более выражены. Помечая потоки в этом режиме индексом «КЗ_{внеш}» и полагая в (49), (52), (53) $Z'_n = 0$, $Z_{\text{КЗ}} \approx j\omega L_{\text{КЗ}}$, получаем соотношения

$$\frac{\dot{\Phi}_a^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = \frac{\dot{\Phi}_a^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx \frac{3}{2} \frac{L_a}{L_{\text{КЗ}}};$$

$$\frac{\dot{\Phi}_b^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = \frac{\dot{\Phi}_b^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx \frac{3}{2} \frac{L'_b}{L_{\text{КЗ}}};$$

$$\frac{\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = \frac{\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx 1 + \frac{L_a}{2L_{\text{КЗ}}};$$

$$\frac{\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = \frac{\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx -\frac{L'_b}{2L_{\text{КЗ}}},$$

откуда следуют

$$\frac{\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx 1 + \frac{\dot{\Phi}_a^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{3}; \quad \frac{\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} \approx -\frac{\dot{\Phi}_b^{\text{КЗ}_{\text{внеш}}}}{3},$$

подтверждаемые данными табл. 2. Таким образом, последние соотношения вместе с табл. 2 явно демонстрируют появление в режиме КЗ внешней обмотки сверхпотока в стержне и антипотока в боковом ядре.

Треугольники магнитных потоков

Векторная диаграмма позволяет наглядно показать влияние толщин обмоток на распределение магнитных потоков в стали и окне трансформатора. На рис. 3 представлена диаграмма для активно-индуктивной нагрузки. Процедура ее построения по заданным значениям вторичного напряжения $\dot{U}'_n = n\dot{U}_n$, сопротивления нагрузки $Z'_n = n^2 Z_n$, а следовательно, и угла нагрузки ϕ_2 описана в табл. 3. Для удобства вертикально вверх направлен вектор \dot{U}'_{02} (тогда

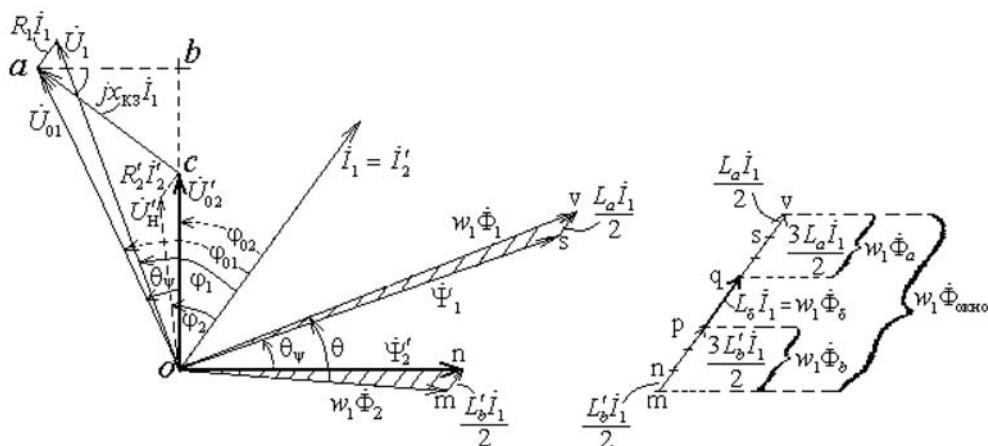


Рис. 3. Векторная диаграмма шести потоков $\Phi_1, \Phi_a, \Phi_\delta, \Phi_b, \Phi_2, \Phi_{\text{окно}}$ при активно-индуктивной нагрузке идеализированного трансформатора

Таблица 3

Построение векторной диаграммы идеализированного трансформатора с обмотками конечной ширины

Номер формулы	Уравнения в комплексной форме	Пояснения к построению векторной диаграммы
1	$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{U}'_H / Z'_H;$ $\dot{U}'_{02} = \dot{U}'_H + R'_2 \dot{I}_2$	\dot{U}'_{02} — вертикально вверх; ток $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ под углом φ_2 к \dot{U}'_H
2	$\dot{\Psi}'_2 = \dot{U}'_{02} / j\omega$	$\dot{\Psi}'_2 \perp \dot{U}'_{02}$
3	$\dot{U}_{01} = \dot{U}'_{02} + jx_{K3} \dot{I}_1$	$jx_{K3} \dot{I}_1 \perp \dot{I}_1$, θ_Ψ — угол между \dot{U}'_{02} и \dot{U}_{01}
4	$\dot{\Psi}_1 = \dot{U}_{01} / j\omega$	$\dot{\Psi}_1 \perp \dot{U}_{01}$; угол между $\dot{\Psi}'_2$ и $\dot{\Psi}_1$ равен углу θ_Ψ
5	$w_1 \dot{\Phi}_1 = \dot{\Psi}_1 + \frac{L_a \dot{I}_1}{2}$	К концу вектора $\dot{\Psi}_1$ пристраивается вектор $\overline{sv} = L_a \dot{I}_1 / 2$ и проводится вектор $\overline{ov} = w_1 \dot{\Phi}_1$
6	$w_1 \dot{\Phi}_2 = \dot{\Psi}'_2 - \frac{L'_b \dot{I}_2}{2}$	К концу вектора $\dot{\Psi}'_2$ пристраивается вектор $\overline{mn} = L'_b \dot{I}_2 / 2$ и проводится вектор $\overline{om} = w_1 \dot{\Phi}_2$
7	$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_{01}$	Вектор $R_1 \dot{I}_1$ параллелен \dot{I}_1

вектор $\dot{\Psi}'_2$ направлен горизонтально вправо). Вместо потоков $\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_a$ и т. д. на диаграмме представлены пропорциональные им величины $w_1\dot{\Phi}_1, w_1\dot{\Phi}_2, w_1\dot{\Phi}_a$ и т. д.

Чтобы не загромождать основную диаграмму, рядом с ней построены векторы $w_1\dot{\Phi}_a$ и $w_1\dot{\Phi}_b$, а также $w_1\dot{\Phi}_\delta$. Согласно (1) вектор \overline{mv} представляет собой вектор $w_1\dot{\Phi}_{\text{окно}}$. Таким образом, треугольник omv есть треугольник магнитных потоков ($\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_{\text{окно}}$), помноженных на w_1 . Векторные диаграммы для чисто активной и активно-емкостной нагрузок изображены на рис. 4, причем в последнем случае, чтобы не усложнять рисунок, векторы $R_1\dot{I}_1$ и \dot{U}_1 не показаны (их легко достроить).

Чтобы найти зависимость угла θ_ψ между потокосцеплениями от сопротивления нагрузки Z_H , обозначим на диаграмме (см. рис. 3) как φ_{01}

угол, отсчитываемый от вектора тока \dot{I}_1 к вектору \dot{U}_{01} , а угол, отсчитываемый от вектора \dot{I}'_2 к вектору \dot{U}'_{02} , — как φ_{02} . Это дает возможность написать:

$$\theta_\psi = \varphi_{01} - \varphi_{02};$$

$$\operatorname{tg} \theta_\psi = \operatorname{tg}(\varphi_{01} - \varphi_{02}) = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{01} - \operatorname{tg} \varphi_{02}}{1 + \operatorname{tg} \varphi_{01} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{02}}, \quad (64)$$

где, как следует из диаграммы (а также из схемы рис. 2, б),

$$\operatorname{tg} \varphi_{01} = \frac{x_{K3} + X'_H}{R'_2 + R'_H}, \quad \operatorname{tg} \varphi_{02} = \frac{X'_H}{R'_2 + R'_H}. \quad (65)$$

В результате зависимость угла θ_ψ от нагрузки может быть представлена в виде

$$\operatorname{tg} \theta_\psi = \frac{x_{K3}(R'_2 + R'_H)}{(R'_2 + R'_H)^2 + X'_H(x_{K3} + X'_H)}. \quad (66)$$

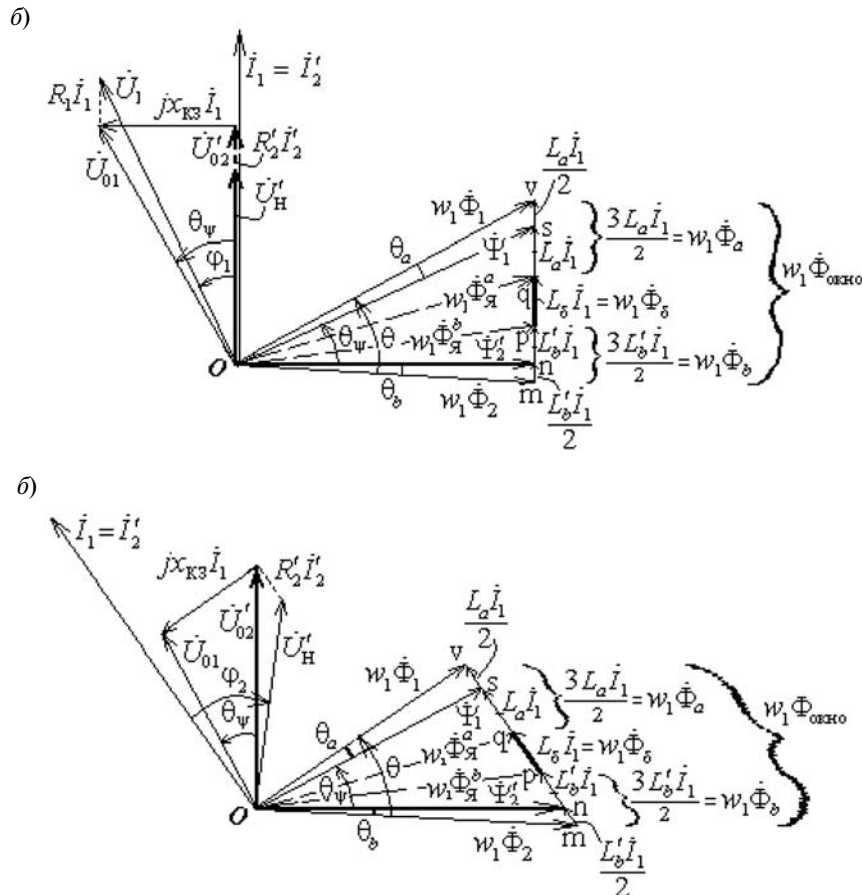


Рис. 4. Векторная диаграмма шести потоков $\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_a, \dot{\Phi}_\delta, \dot{\Phi}_b, \dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_{\text{окно}}$ при активной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках идеализированного трансформатора

Угол θ_Ψ можно также вычислить, определяя его как аргумент отношения:

$$\theta_\Psi = \arg \left(\frac{\dot{U}_{01}}{\dot{U}'_{02}} \right) = \arg \frac{(R'_2 + jx_{K3} + Z'_H) \dot{I}_1}{(R'_2 + Z'_H) \dot{I}_1} =$$

$$= \arg \left(1 + \frac{jx_{K3}}{R'_2 + Z'_H} \right).$$

Очевидно, что из этой формулы нетрудно получить выражение (66).

Замечание 5. Примеры расчета угла θ_Ψ представлены в табл. 2. При номинальной *чисто активной* нагрузке ($X'_H = 0$) согласно (55) имеем

$$Z'_{H \text{ ном}} \equiv R'_{H \text{ ном}} \approx z_{1 \text{ ном}},$$

и тогда, упрощая (66), можем написать

$$\operatorname{tg} \theta_\Psi \Big|_{Z_H=R_{\text{ном}}} \approx \frac{x_{K3} R'_{H \text{ ном}}}{z_{1 \text{ ном}}^2} = \frac{x_{K3}}{z_{1 \text{ ном}}} = x_{K3} \approx u_{K3},$$

$$\theta_{\Psi(Z_H=R_{\text{ном}})}^{\text{ном}} \approx u_{K3} = 0,105 \text{ рад}, \quad (67)$$

что и отражено в табл. 2.

Примечание 2. В нормальных режимах чисто активной нагрузки из-за малой величины угла $\theta_{\Psi(Z_H=R_H)}^{\text{ном}}$ поток в окне практически перпендикулярен обоим потокам — в стержне и боковом ярме (рис. 4, а). То есть, когда поток в стали достигает максимума, поток в окне почти нулевой, и наоборот. Это обстоятельство плохо вяжется с идеей рассеяния потока, ассоциируемой с простым ответвлением частей потоков стержня и бокового ярма в окно трансформатора.

Для *номинальной чисто реактивной* нагрузки ($R'_H = 0$), полагая грубо $X'_{H \text{ ном}} \approx z_{1 \text{ ном}}$, а также $R'_2 = r_{K3} / 2$, по формуле (66) получаем

$$\operatorname{tg} \theta_\Psi \Big|_{Z_H=\pm jX_{\text{ном}}} \approx \frac{x_{K3} R'_2}{z_{1 \text{ ном}}^2} \approx \frac{1}{2} r_{K3} u_{K3} =$$

$$= 0,003 \cdot 0,105 = 3 \cdot 10^{-4} \rightarrow 0,$$

$$\theta_{\Psi(Z_H=X_{\text{ном}})}^{\text{ном}} \rightarrow 0, \quad (68)$$

что также отражено в табл. 2.

Из векторных диаграмм (рис. 3 и 4) следует:

1) при *чисто активной* и *активно-индуктивной* нагрузках поток в стержне больше потока в боковом ярме ($\Phi_1 > \Phi_2$), а при *активно-емкостной* — $\Phi_1 < \Phi_2$;

2) при любом типе нагрузки фазовый угол θ между потоками в стержне и боковом ярме боль-

ше, чем аналогичный угол θ_Ψ между потоко-сцеплениями с обмотками НН и ВН, то есть

$$\theta > \theta_\Psi, \quad (69)$$

причем углы θ, θ_Ψ положительны;

3) передача активной мощности (P_{02}) во вторичную обмотку определяется углом θ_Ψ , что вытекает из возможности двояко выразить стороны пристроенного к диаграмме (рис. 3) прямоугольного треугольника abc , в котором, очевидно, угол $\angle bac = \varphi_{02}$:

$$ab = x_{K3} I_1 \cos \varphi_{02} = x_{K3} I'_2 \cos \varphi_{02}; \quad ab = U_{01} \sin \theta_\Psi,$$

откуда следует

$$I'_2 \cos \varphi_{02} = \frac{U_{01} \sin \theta_\Psi}{x_{K3}};$$

$$P_{02} = U'_{02} I'_2 \cos \varphi_{02} = \frac{U_{01} U'_{02}}{x_{K3}} \sin \theta_\Psi, \quad (70)$$

или с учетом (48), а также соотношения $\Psi'_2 = n\Psi_2$

$$P_{02} = \omega \frac{\Psi_1 \Psi'_2}{L_{K3}} \sin \theta_\Psi = n\omega \frac{\Psi_1 \Psi_2}{L_{K3}} \sin \theta_\Psi. \quad (71)$$

Аналогичным образом, принимая во внимание двоякое представление отрезка cb , а именно

$$cb = x_{K3} I_1 \sin \varphi_{02} = x_{K3} I'_2 \sin \varphi_{02};$$

$$cb = U_{01} \cos \theta_\Psi - U'_{02}, \quad (72)$$

можем написать

$$I'_2 \sin \varphi_{02} = \frac{U_{01} \cos \theta_\Psi - U'_{02}}{x_{K3}};$$

$$Q_H = Q_{02} = U'_{02} I'_2 \sin \varphi_{02} =$$

$$= \frac{U_{01} U'_{02}}{x_{K3}} \cos \theta_\Psi - \frac{U_{02}^2}{x_{K3}}. \quad (73)$$

Комплексная мощность, передаваемая во вторичную обмотку, принимает вид

$$\dot{S}_{02} = P_{02} + jQ_{02} = j \left(\frac{U_{01} U'_{02}}{x_{K3}} e^{-j\theta_\Psi} - \frac{U_{02}^2}{x_{K3}} \right); \quad (74)$$

4) из первого выражения (70) следует, что для номинальных режимов (в них $x_{K3} I'_{2 \text{ ном}} / U_{01} \approx u_{K3}$ и $\cos \varphi_{02} \approx \cos \varphi_2$) имеет место связь

$$\sin \theta_\Psi \Big|_{Z_H=Z_{H \text{ ном}}} \approx u_{K3} \cos \varphi_2,$$

или ввиду весьма малого значения угла θ_Ψ при $Z_H = Z_{H \text{ ном}}$ (см. табл. 2)

$$\left[\operatorname{tg} \theta_{\Psi} \right]_{Z_H = Z_{H \text{ ном}}} \approx u_{K3} \cos \varphi_2, \quad (75)$$

что согласуется с формулами (66), (67).

Замечание 6. Зависимость тангенса угла θ от нагрузки имеет более сложный вид по сравнению с формулой (66). Здесь ограничимся выводом для случая *чисто активной* нагрузки, т. е. при $Z_H = R_H$. Тогда $\Psi'_2 = (R'_H + R'_2) \dot{I}'_2 / j\omega$, и из диаграммы (рис. 4, а) следует

$$\operatorname{tg} |\theta_b|_{Z_H = R_H} = \frac{mn}{on} = \frac{L'_b I_1 / 2}{\Psi'_2} = \frac{\omega L'_b / 2}{R'_H + R'_2}; \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} (\theta_{\Psi} + \theta_a)_{Z_H = R_H} &= \frac{ns + sv}{on} = \\ &= \frac{L_{K3} I_1 + L_a I_1 / 2}{\Psi'_2} = \frac{x_{K3} + \omega L_a / 2}{R'_H + R'_2}; \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_{Z_H = R_H} &= \operatorname{tg} (|\theta_b| + (\theta_{\Psi} + \theta_a)) = \\ &= \frac{\operatorname{tg} |\theta_b| + \operatorname{tg} (\theta_{\Psi} + \theta_a)}{1 - \operatorname{tg} |\theta_b| \operatorname{tg} (\theta_{\Psi} + \theta_a)}. \end{aligned} \quad (78)$$

После подстановки правых частей (76) и (77) в (78) и несложных преобразований находим

$$\operatorname{tg} \theta_{Z_H = R_H} = \frac{\left(x_{K3} + \frac{\omega(L_a + L'_b)}{2} \right) (R'_H + R'_2)}{(R'_H + R'_2)^2 - \frac{\omega L'_b}{2} \left(x_{K3} + \frac{\omega L_a}{2} \right)}. \quad (79)$$

Угол θ_a при чисто активной нагрузке можно определить из соотношения

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_a|_{Z_H = R_H} &= \operatorname{tg} ((\theta_{\Psi} + \theta_a) - \theta_{\Psi}) = \\ &= \frac{\operatorname{tg} (\theta_{\Psi} + \theta_a) - \operatorname{tg} \theta_{\Psi}}{1 + \operatorname{tg} \theta_{\Psi} \cdot \operatorname{tg} (\theta_{\Psi} + \theta_a)}. \end{aligned} \quad (80)$$

Положив в выражении (66) $X'_H = 0$ и подставив его в (77) и в (80), получаем

$$\operatorname{tg} \theta_a|_{Z_H = R_H} = \frac{(\omega L_a / 2)(R'_2 + R'_H)}{(R'_2 + R'_H)^2 + x_{K3}(x_{K3} + \omega L_a / 2)}. \quad (81)$$

Рассчитанные по формулам (76), (79) и (81) углы приведены во второй колонке табл. 2 для чисто активной нагрузки. Легко проверить, что $\theta = \theta_b + \theta_{\Psi} + \theta_a$.

Положив в (76), (79) и (81) $R'_H = 0$, получаем формулы для расчета углов между потоками и в режиме КЗ (см. последнюю колонку в табл. 2).

Построив векторные диаграммы для чисто индуктивной нагрузки, легко убедиться, что θ_{Ψ} , θ_{Ψ} , θ_b , θ_a , $\theta \rightarrow 0$, причем по модулю $w_1 \Phi_2 < \Psi'_2 < \Psi_1 < w_1 \Phi_1$, что отражено в табл. 2.

Аналогичный вывод относительно углов получается из векторной диаграммы для чисто емкостной нагрузки, однако в этом случае $w_1 \Phi_2 > \Psi'_2 > \Psi_1 > w_1 \Phi_1$.

Треугольники магнитных потоков в режиме КЗ

В режиме КЗ ($R'_H = 0$, $X'_H = 0$), выражение (66) принимает вид

$$\operatorname{tg} \theta_{\Psi}^{\text{КЗ внеш}} = \frac{x_{K3}}{R'_2}.$$

Соответственно угол между потоко-сцеплениями в режиме КЗ равен

$$\left[\theta_{\Psi}^{\text{КЗ внеш}} = \arctg \frac{x_{K3}}{R'_2} \right]; \quad \left[\theta_{\Psi}^{\text{КЗ внеш}} \rightarrow \frac{\pi}{2} \right], \quad (82)$$

где индекс «КЗ внеш» указывает, что короткозамкнута внешняя обмотка. Стрелка указывает на близость значения соответствующей величины для мощных трансформаторов к значению справа от нее. Далее из (76), (81), (79) получаем

$$\operatorname{tg} |\theta_b^{\text{КЗ внеш}}| = \frac{\omega L'_b / 2}{R'_2} = \frac{\omega L'_b}{r_{K3}}; \quad |\theta_b^{\text{КЗ внеш}}| \rightarrow \frac{\pi}{2}; \quad (83)$$

$$\operatorname{tg} \theta_a^{\text{КЗ внеш}} = \frac{(\omega L_a / 2) R'_2}{R'^2_2 + x_{K3}(x_{K3} + \omega L_a / 2)};$$

$$\theta_a^{\text{КЗ внеш}} \rightarrow 0; \quad (84)$$

$$\operatorname{tg} \theta^{\text{КЗ внеш}} = \frac{R'_2 \left(x_{K3} + \frac{\omega(L_a + L'_b)}{2} \right)}{R'^2_2 - \frac{\omega L'_b}{2} \left(x_{K3} + \frac{\omega L_a}{2} \right)}. \quad (85)$$

Согласно (82) угол $\theta_{\Psi}^{\text{КЗ внеш}}$ между потоко-сцеплениями $\Psi^{\text{КЗ}}_1$ и $\Psi^{\text{КЗ}}_2$ в мощных трансформаторах весьма близок к 90° *независимо от толщины обмоток*. А вот угол $\theta^{\text{КЗ внеш}} \rightarrow 90^\circ$ лишь в случае, если внешняя обмотка является весьма тонкой, т. е. когда ее ширина $b \rightarrow 0$ и соответственно $L'_b \rightarrow 0$, поскольку в этом случае (85) принимает вид выражения (28) из части 1 нашей работы [1]: $\operatorname{tg} \theta^{\text{КЗ внеш}} = x_{K3} / R'_2$.

(86)

(87)

1

$$= 1,542 \text{ рад} = 88,4^\circ.$$

 \mathbf{L}

0,362

C

обмотки ВН

1

$$\frac{\Phi_{\text{CT}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}}; \quad k_{60\text{K}} = \frac{\Phi_{60\text{K}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}};$$



не равных нулю R_1, R_2 (а) и в случае нулевых R_1, R_2 (б)

$$\dot{k}_{\text{окно}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{окно}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{ст}} - \dot{\Phi}_{\text{б}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} = \dot{k}_{\text{ст}} - \dot{k}_{\text{бок}}. \quad (88)$$

Здесь $\dot{k}_{\text{окно}}$ — КМС окна; он сравнивает поток в окне с потоком XX в стали. Чтобы получить формулу для КМС стержня при КЗ внешней обмотки, положим в (52) $Z'_H = 0$:

$$\begin{aligned} k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} &= \frac{\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ внеш}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} \approx 1 + \frac{-R_1 + j\omega L_a / 2}{r_{\text{КЗ}} + jx_{\text{КЗ}}} = \\ &= k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} e^{j\alpha_{\text{ст}}}, \end{aligned} \quad (89)$$

где

$$\begin{aligned} k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} &= \frac{\Phi_1^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_{\text{XX}}} = \\ &= \frac{\sqrt{R_2'^2 + (x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2)^2}}{z_{\text{КЗ}}} \approx 1 + \frac{L_a}{2L_{\text{КЗ}}}; \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \text{tg } \alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} &= \frac{R_1 x_{\text{КЗ}} + r_{\text{КЗ}} \omega L_a / 2}{x_{\text{КЗ}} (x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2) + R_2' r_{\text{КЗ}}} \approx \\ &\approx \frac{r_{\text{КЗ}} (x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2)}{2x_{\text{КЗ}} (x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2)}. \end{aligned} \quad (91)$$

Правая часть в (90) упрощена с учетом $R_2' \ll x_{\text{КЗ}}$ и $z_{\text{КЗ}} \approx x_{\text{КЗ}}$, а в (91) — с учетом $R_2' r_{\text{КЗ}} \ll x_{\text{КЗ}}^2$ и обычно принимаемого соотношения

$$R_2' \approx R_1 \approx r_{\text{КЗ}} / 2. \quad (92)$$

После подстановки в (90) правых частей (26) и (31) с учетом (30) получаем

$$\begin{aligned} k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} &= \\ &= 1 + \frac{a(D_{12} - \delta - a)}{6 \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]} \approx \\ &\approx 1 + \frac{a}{2a + 6\delta + 2b}; \end{aligned} \quad (93)$$

$$\alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} \approx \arctg \left(\frac{1}{2 \text{tg } \varphi_{\text{КЗ}}} \frac{x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2}{x_{\text{КЗ}} + \omega L_a / 2} \right). \quad (94)$$

Угол $\alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}$ весьма мал (практически $\alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} \approx \angle_{\text{сов}}$ (рис. 5, а)). На рис. 5, б $\alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} = 0$.

Чтобы получить формулу для КМС бокового ярма при КЗ внешней обмотки, положим в (53) $Z'_H = 0$:

$$\begin{aligned} k_{\text{бок}}^{\text{КЗ внеш}} &= \frac{\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ внеш}}}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} \approx \frac{R_2' - j\omega L_b' / 2}{Z_{\text{КЗ}}} = \\ &= \frac{(-x_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 + R_2' r_{\text{КЗ}}) + j(-r_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 - R_2' x_{\text{КЗ}})}{r_{\text{КЗ}}^2 + x_{\text{КЗ}}^2} = \\ &= k_{\text{бок}}^{\text{КЗ внеш}} e^{j\beta_{\text{бок}}}, \end{aligned} \quad (95)$$

откуда с учетом (28), (30) и (31) следует

$$\begin{aligned} k_{\text{бок}}^{\text{КЗ внеш}} &\approx \frac{L_b'}{2L_{\text{КЗ}}} = \\ &= \frac{b(D_{12} + \delta + b)}{6 \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]} \approx \\ &\approx \frac{b}{2a + 6\delta + 2b}. \end{aligned} \quad (96)$$

$$\begin{aligned} \text{tg } \beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} &= \frac{-r_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 - x_{\text{КЗ}} R_2'}{(-x_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 + R_2' r_{\text{КЗ}})} \approx \\ &\approx \frac{-(r_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 + x_{\text{КЗ}} r_{\text{КЗ}} / 2)}{(-x_{\text{КЗ}} \omega L_b' / 2 + R_2' r_{\text{КЗ}})}. \end{aligned} \quad (97)$$

Угол $\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} \approx \angle_{\text{som}}$ на рис. 5, а — тупой, а на рис. 5, б — $\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} = \pi$, поскольку диаграммы построены для трансформатора с широкими обмотками. В этом случае знаменатель (97) отрицателен, и потому

$$\begin{aligned} \beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} &= -\pi + \arctg \frac{r_{\text{КЗ}} (x_{\text{КЗ}} + \omega L_b')}{x_{\text{КЗ}} \omega L_b'} = \\ &= -\pi + \arctg \left(\frac{1}{\text{tg } \varphi_{\text{КЗ}}} \frac{x_{\text{КЗ}} + \omega L_b'}{\omega L_b'} \right). \end{aligned} \quad (98)$$

Однако, если короткозамкнутая обмотка бесконечно тонкая ($b \rightarrow 0$, $\omega L_b' \rightarrow 0$), то знаменатель (97) положителен, и тогда

$$\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} \Big|_{b \rightarrow 0} = \arctg \frac{x_{\text{КЗ}}}{R_2'},$$

что согласуется с утверждением в части 1 нашей работы [1], где было показано, что

$$\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} \Big|_{b \rightarrow 0} \rightarrow \pi / 2. \quad (99)$$

Очевидно, должно выполняться соотношение

$$\theta^{\text{КЗ внеш}} = \left| \beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} \right| + \alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}. \quad (100)$$

КМС окна при КЗ можно найти, положив в (51) $Z'_H = 0$:

$$\dot{k}_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{окно}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = \frac{j\omega \left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b) \right)}{Z_{\text{КЗ}}} = k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{КЗ}}\right)}, \quad (101)$$

где

$$k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = k_{\text{окно}} \approx \frac{L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b)}{L_{\text{КЗ}}} = 1 + \frac{L_a}{2L_{\text{КЗ}}} + \frac{L'_b}{2L_{\text{КЗ}}}. \quad (102)$$

Здесь $k_{\text{окно}}$ – коэффициент, введенный в (51). Используя (26), (28) и (31), получаем

$$k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = k_{\text{окно}} = 1 + \frac{a(D_{12} - \delta - a) + b(D_{12} + \delta + b)}{6 \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]} \approx 1 + \frac{a+b}{2a+6\delta+2b}. \quad (103)$$

Пример 3. Для трансформатора из Примера 1 по первой формуле (93) находим $k_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} = 10693$, что совпадает с результатом табл. 2, а по второй получаем

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} \approx 1 + \frac{a}{2a+6\delta+2b} = 1 + \frac{41,9}{2 \cdot 41,9 + 6 \cdot 50 + 2 \cdot 62,9} = 1,082. \quad (104)$$

По первой формуле (96) находим $k_{\text{Б}}^{\text{КЗ}} = 0,1436$, что совпадает с результатом табл. 2, а по второй будет

$$k_{\text{Б}}^{\text{КЗ}} \approx \frac{b}{2a+6\delta+2b} = \frac{62,9}{2 \cdot 41,9 + 6 \cdot 50 + 2 \cdot 62,9} = 0,1234. \quad (105)$$

По формуле (94) находим

$$\alpha_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} \approx \arctg \left(\frac{1}{2 \cdot 17,5} \frac{(1,27 + 0,175)}{(1,27 + 0,362/2)} \right) = 0,028 \text{ рад} = 1,63^\circ. \quad (106)$$

По формуле (99) находим

$$\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} = -\pi + \arctg \left(\frac{1}{17,5} \frac{(1,27 + 0,362)}{0,362} \right) = (-\pi + 0,2521) \text{ рад} = -165,5^\circ. \quad (107)$$

Таким образом, согласно приведенным расчетам:

$$\dot{k}_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} = \frac{\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = 1,0693 e^{j1,63^\circ}, \quad (108)$$

$$\dot{k}_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} = \frac{\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = 0,1436 e^{-j165,5^\circ}, \quad (109)$$

что практически совпадает с результатами табл. 2. Подтверждается также соотношение (100)

$$\theta^{\text{КЗ}} = |\beta_{\text{бок}}^{\text{КЗ}}| + \alpha_{\text{ст}} = (\pi - 0,2521) + 0,028 = \pi - 0,22, \quad (110)$$

согласующееся с данными табл. 2. По формуле (102) имеем

$$k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} \approx 1 + \frac{L_a}{2L_{\text{КЗ}}} + \frac{L'_b}{2L_{\text{КЗ}}} = 1 + \frac{0,557}{2 \cdot 4,04} + \frac{1,154}{2 \cdot 4,04} = 1,21, \quad (111)$$

а по формуле (103) получается

$$k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = k_{\text{окно}} \approx 1 + \frac{a+b}{2a+6\delta+2b} = 1 + \frac{41,9+62,9}{2 \cdot 41,9 + 6 \cdot 50 + 2 \cdot 62,9} = 1,205. \quad (112)$$

Согласно (101), учитывая, что $\pi/2 - \varphi_{\text{КЗ}} = 90^\circ - 86,73^\circ = 3,27^\circ$, получаем

$$\dot{k}_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{окно}}}{\dot{\Phi}_{\text{ХХ}}} = k_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{КЗ}}\right)} = 1,205 e^{j3,27^\circ}, \quad (113)$$

что согласуется с результатами табл. 2.

Примечание 3. В традиционной теории принимается $k_{\text{ст}}^{\text{КЗ}} = k_{\text{бок}}^{\text{КЗ}} = 0,5$, что совершенно неверно. Реальная картина потоков в короткозамкнутом трансформаторе, полученных здесь с помощью выражений для $\dot{k}_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}$, $\dot{k}_{\text{бок}}^{\text{КЗ}}$, явно противоречит представлениям, излагаемым в учебниках. Поэтому определяемые этими выражениями потоки в стали при КЗ в [1–7] названы аномальными по отношению к традиционным представлениям! Особенности этих потоков при КЗ подтверждены как численными расчетами полей в [5], так и экспериментальными исследованиями на реальных установках кафедры ТОЭ [6, 7].

Универсальные зависимости магнитных потоков от нагрузки

Под универсальными подразумеваются зависимости действующих значений относительно-ных величин потоков в функции относительно-го значения тока нагрузки $k_{\text{нр}} = I_2 / I_{2\text{ном}}$:

$$\underline{I}_2 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} = \frac{U_1 / |Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}|}{U_1 / z_{1\text{ном}}} = \frac{1}{|Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}|} = \frac{1}{\sqrt{(r_{\text{КЗ}} + R'_{\text{н}})^2 + (x_{\text{КЗ}} + X'_{\text{н}})^2}}, \quad (114)$$

где используются относительные сопротивления

$$\underline{Z}'_{\text{н}} = Z'_{\text{н}} / z_{1\text{ном}}; \quad \underline{Z}'_{\text{КЗ}} = Z'_{\text{КЗ}} / z_{1\text{ном}}; \\ \underline{X}'_{\text{н}} = X'_{\text{н}} / z_{1\text{ном}}; \quad \underline{R}'_{\text{н}} = R'_{\text{н}} / z_{1\text{ном}}. \quad (115)$$

Нам понадобятся также относительные величины

$$\underline{\omega L}_a = \frac{\omega L_a}{z_{1\text{ном}}} \approx \frac{L_a}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}}; \quad \underline{\omega L}_{\delta} = \frac{\omega L_{\delta}}{z_{1\text{ном}}} \approx \frac{L_{\delta}}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}}; \\ \underline{\omega L}'_b = \frac{\omega L'_b}{z_{1\text{ном}}} \approx \frac{L'_b}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}}. \quad (116)$$

Это позволяет исходя из (49) и (50) представить действующие значения потоков в окне формулами

$$\underline{\Phi}_a = \frac{3}{2} \underline{\omega L}_a I_2 = \frac{3}{2} \frac{L_a}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}} I_2; \\ \underline{\Phi}_{\delta} = \underline{\omega L}_{\delta} I_2 = \frac{L_{\delta}}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}} I_2; \quad (117) \\ \underline{\Phi}_b = \frac{3}{2} \underline{\omega L}'_b I_2 = \frac{3}{2} \frac{L'_b}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}} I_2; \\ \underline{\Phi}_{\text{окно}} = \frac{\frac{3}{2} L_a + L_{\delta} + \frac{3}{2} L'_b}{L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}} I_2, \quad (118)$$

наглядно иллюстрирующих их линейную зависимость от тока нагрузки и независимость от типа нагрузки R , L или C .

Примечание 4. В случае перехода к бесконечно тонким обмоткам ($L_a = L'_b = 0$) при сохранении неизменным $u_{\text{КЗ}}$ согласно [1] имеем $L_{\delta}^{\text{тонк}} \equiv L_{\delta 0} \equiv L_{\text{КЗ}}$ и из (117), (118) получаем

$$\underline{\Phi}_{\delta}^{\text{тонк}} \equiv \underline{\Phi}_{\delta 0} \equiv \underline{\Phi}_{\text{окно}} = u_{\text{КЗ}} I_2, \quad (119)$$

где обозначения $L_{\delta 0}$ и $\underline{\Phi}_{\delta 0}$ заимствованы из [1]. Очевидно, что в режиме КЗ правая часть (119) равна еди-

нице, что и подтверждается кривой $\underline{\Phi}_{\delta}^{\text{тонк}}(I_2) \equiv \underline{\Phi}_{\delta 0}(I_2)$ в [1].

С учетом (119) можем (118) представить в виде выражений

$$\underline{\Phi}_{\text{окно}} = \left(\frac{L_a + L_{\delta} + L'_b}{L_{\text{КЗ}}} + \frac{L_a + L'_b}{2L_{\text{КЗ}}} \right) u_{\text{КЗ}} I_2 = \\ = \left(1 + \frac{L_a + L'_b}{2L_{\text{КЗ}}} \right) u_{\text{КЗ}} I_2 = \\ = \underline{\Phi}_{\text{окно}}^{\text{тонк}} + \frac{L_a + L'_b}{2L_{\text{КЗ}}} u_{\text{КЗ}} I_2, \quad (120)$$

последнее из которых объясняет, как и почему прямая $\underline{\Phi}_{\text{окно}}(I_2)$ проходит выше аналогичной прямой трансформатора с тонкими обмотками при одинаковом $u_{\text{КЗ}}$. Из (120) следует: в режиме КЗ

$$\underline{\Phi}_{\text{окно}}^{\text{КЗ}} = 1 + \frac{L_a + L'_b}{2L_{\text{КЗ}}}, \quad (121)$$

что также совпадает с правой частью (102).

В отличие от потоков в окне, потоки в стали связаны с током иррациональными зависимостями. Исходя из (52) и (53) для действующих значений этих потоков имеем

$$\underline{\Phi}_1 = \frac{\sqrt{(R'_2 + R'_{\text{н}})^2 + (X_{\text{КЗ}} + \underline{\omega L}_a / 2 + X'_{\text{н}})^2}}{|Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}|} = \\ = \sqrt{(R'_2 + R'_{\text{н}})^2 + (X_{\text{КЗ}} + \underline{\omega L}_a / 2 + X'_{\text{н}})^2} I_2; \\ \underline{\Phi}_2 = \frac{\sqrt{(R'_2 + R'_{\text{н}})^2 + (-\underline{\omega L}'_b / 2 + X'_{\text{н}})^2}}{|Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}|} = \\ = \sqrt{(R'_2 + R'_{\text{н}})^2 + (-\underline{\omega L}'_b / 2 + X'_{\text{н}})^2} I_2.$$

Иррациональность этих выражений определяется тем, что согласно (114) значение I_2 зависит от входящих в них величин нагрузки $R'_{\text{н}}$ и $X'_{\text{н}}$.

Пример 4. Найдем кривые потоков в окне и в стали трансформатора из Примера 1, характеризующегося напряжением КЗ $u_{\text{КЗ}} = 10,5\%$ и $\text{tg } \varphi_{\text{КЗ}} = 17,5$. Из этих данных следует:

$$\underline{z}_{\text{КЗ}} = u_{\text{КЗ}} = 0,105; \quad \varphi_{\text{КЗ}} = 86,73^\circ;$$

$$\underline{r}_{\text{КЗ}} = \underline{z}_{\text{КЗ}} \cos \varphi_{\text{КЗ}} = 0,006;$$

$$\underline{X}_{\text{КЗ}} = \underline{z}_{\text{КЗ}} \sin \varphi_{\text{КЗ}} = 0,1048;$$

$$\underline{R}_1 = \underline{r}_{\text{КЗ}} / 2 = 0,003; \quad \underline{R}'_2 = \underline{r}_{\text{КЗ}} / 2 = 0,003.$$

По геометрии из данных этого примера имеем

$$\omega L_a = 0,014; \quad \omega L_\delta = 0,06; \quad \omega L'_b = 0,03.$$

Рис. 6 иллюстрирует изменение потоков в силовом трансформаторе, рассчитанных по формулам (50), (52), (53) для случаев активной ($\cos \varphi_H = 1$), активно-индуктивной ($\cos \varphi_H = 0,8$) и чисто индуктивной ($\cos \varphi_H = 0$) нагрузок. Программа *tolst_obm.m*, с помощью которой они построены, позволяет получать кривые при любом типе нагрузки заданием ее угла φ_2 в градусах. Диапазон изменения коэффициента нагрузки $k_{Hr} = I_2 / I_{2nom}$ лежит от $k_{Hr}^{XX} = 0$ (т. е. от XX) до значения, соответствующего режиму КЗ:

$$k_{Hr}^{K3} = I_2^{K3} / I_{2nom} = 1 / u_{K3} = 1 / 0,105 = 9,524. \quad (121)$$

Все потоки отнесены к потоку XX, поэтому потоки в стали начинаются с единицы, а в окне — с нуля. В точке КЗ значение $\Phi_{окно} / \Phi_{XX} = 1,208$ согласуется с табл. 2 для режима КЗ. Изменения угла θ между потоками Φ_1 и Φ_2 в программе определены по формуле

$$\theta = \arg(\Phi_1 / \Phi_{XX}) - \arg(\Phi_2 / \Phi_{XX}). \quad (122)$$

Естественно, что вычисления по (122) и по выражению (79) совпадают. Утолщенными линиями выделены кривые для случая чисто активной нагрузки. Зависимость модуля отношения $\Phi_{окно} / \Phi_{XX}$ для всех типов нагрузок одинакова, чего нельзя, очевидно, сказать об аргументе этого отношения $\arg(\Phi_{окно})$, как показано на рис. 7.

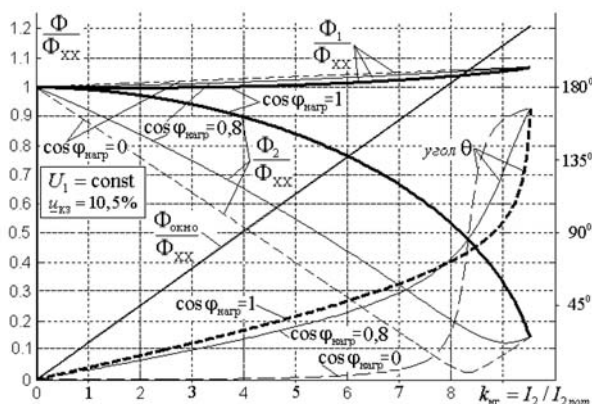


Рис. 6. Изменение магнитных потоков в стали Φ_2 , Φ_1 и фазового угла θ между ними в зависимости от тока нагрузки идеализированного трансформатора (программа *tolst_obm.m*)

На рис. 7 не представлены кривые $\arg(\Phi_1)$, поскольку они не выходят за пределы 3° . Поэтому кривые $\arg(\Phi_2)$ на рис. 7 в соответствии с (122) практически зеркальны по отношению к кривым $\theta(I_2)$, изображенным на рис. 6.

Примечание 5. При чисто индуктивной нагрузке ($Z_H^L = j\omega L_H$, $\cos \varphi_2 = 0$) кривая $\arg \Phi_2^L(I_2)$ на рис. 7 и кривая $\theta(I_2)$ на рис. 6 похожи на типовую кривую «опрокидывания фазы» от почти нулевого значения до почти -180° . Это проявляется тем более явно, чем больше значение $\text{tg} \varphi_{K3}$, при этом в зоне опрокидывания кривая $\Phi_2^L(I_2)$ имеет минимум (см. рис. 6). Поэтому для оценки значения $k_{Hr} \equiv I_2$, при котором происходит опрокидывание фазы потока $\Phi_2^L(I_2)$, достаточно найти условия возникновения минимума функции $\Phi_2^L(I_2)$ с помощью формулы (53). Нетрудно сообразить, что практически он наступает, когда

$$Z_H^L \equiv j\omega L_H = j\omega L'_b / 2; \quad (123)$$

при этом минимальное значение потока в боковом ядре равно

$$\begin{aligned} (\Phi_2^L)_{\min} &= \frac{R'_2}{|Z_{K3} + j\omega L'_b / 2|} \approx \frac{R'_2}{x_{K3} + \omega L'_b / 2} = \\ &= \frac{R'_2}{x_{K3} + \omega L'_b / 2}, \end{aligned} \quad (124)$$

и наступает согласно (114) при токе

$$\begin{aligned} I_2|_{Z'_H = \omega L'_b / 2} &= \frac{1}{\sqrt{r_{K3}^2 + (x_{K3} + \omega L'_b / 2)^2}} \approx \\ &\approx \frac{1}{x_{K3} + \omega L'_b / 2}. \end{aligned} \quad (125)$$

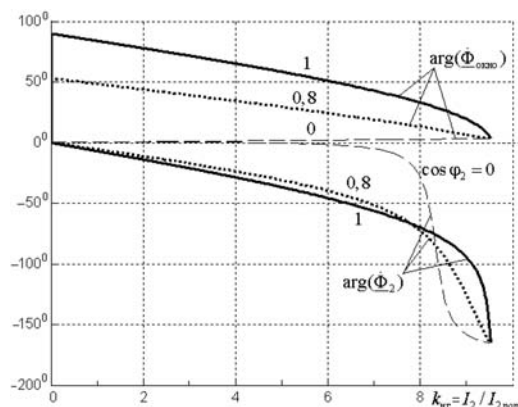


Рис. 7. Изменение аргументов магнитных потоков в боковом ядре и в окне в зависимости от тока нагрузки идеализированного трансформатора (программа *tolst_obm.m*)

Выражение (124) можно также представить в виде

$$\left(\Phi_2^L\right)_{\min} \approx R'_2 I_2|_{Z'_n=\omega L'_b/2}. \quad (126)$$

В рассматриваемом примере в точке минимума кривой $\Phi_2(I_2)$ имеем

$$I_2|_{Z'_n=\omega L'_b/2} \approx \frac{1}{x_{K3} + \omega L'_b/2} = \frac{1}{0,105 + 0,03/2} = 8,3;$$

$$\left(\Phi_2^L\right)_{\min} \approx 0,003 \cdot 8,3 = 0,025,$$

что практически совпадает с соответствующей точкой минимума кривой $\Phi_2^L(I_2)$ на рис. 6. Как и следовало ожидать, в этой точке $\arg \Phi_2^L(I_2) \approx -90^\circ$ и угол между потоками $\theta \approx 90^\circ$. Существование минимума кривой $\Phi_2^L(I_2)$ подтверждено экспериментально в [7].

Примечание 6. Зависимости потоков и их аргументов на рис. 6 и 7 практически не отличаются от аналогичных, рассчитанных в [3] с учетом нелинейности характеристик стали при аппроксимации ее кривой намагничивания параболой степени $n = 15$. В [3] показано, что при этом стержень при КЗ насыщался так, что его магнитная проницаемость становилась более чем вдвое меньше, чем при ХХ ($\mu_{ХХ} = 2673\mu_0$), причем магнитная проницаемость бокового яра оставалась такой же, как при ХХ. Однако при этом магнитная проницаемость стержня получалась весьма высокой — $\mu_{ст} = \mu_{ХХ} / 2 = 1336\mu_0$, чем и объясняется совпадение указанных кривых с кривыми [3]. В целом это служит подтверждением достоверности весьма сложных расчетов установившихся режимов, выполненных в [3]. Далее такая же задача ставится для оценки достоверности расчетов в [3] динамических процессов в трансформаторе.

Включение идеализированного трансформатора при ХХ

Как и в случае трансформатора с тонкими обмотками [1], электрическая схема замещения идеализированного трансформатора с толстыми обмотками (рис. 8) не содержит поперечных ветвей. Поскольку при этом параметры продольных ветвей (R_1 , R'_0 , L_{K3}) в обоих случаях одни и те же, то и потоки в стали $\Phi_1(t) = \Phi_2(t)$ в переходных процессах при ХХ будут изменяться одинаково, как описано в [1]. Здесь не может быть расхождений и с учебниками, поскольку трансформатор на ХХ представляет собой просто катушку с железным сердечником. Наиболее неблагоприятным является случай, когда в момент включения входное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ проходит через нуль ($\psi_u = 0$) и поток остаточного намагничи-

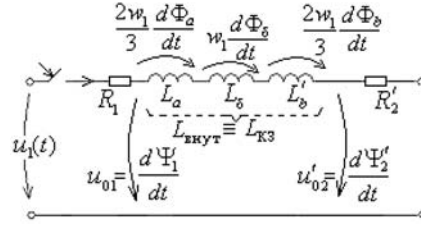


Рис. 8. Схема замещения идеализированного трансформатора при его включении на ХХ

вания $\Phi_{ост}$ положителен, тогда согласно выражению (73) из [1] поток в сердечнике равен

$$\Phi_1^{XX}(t) = -\Phi_m^{XX} \cos \omega t + (\Phi_m^{XX} + \Phi_{ост}), \quad (127)$$

где согласно (50)

$$\Phi_m^{XX} = \frac{U_{1m}}{\omega w_1}. \quad (128)$$

Из (127) следует, что наибольший поток включения (всплеск потока в стали) имеет место в момент $\omega t \approx \pi$ и равен

$$\Phi_{наиб}^{XX} \approx 2\Phi_m^{XX} + \Phi_{ост}. \quad (129)$$

В частности при $\Phi_{ост} = \Phi_m^{XX}$ всплеск потока в сердечнике достигает значения $\Phi_{наиб}^{XX} = 3\Phi_m^{XX}$. Реально это приводит к чрезвычайно сильному насыщению сердечника, что естественно влияет на ток включения, который в идеализированном трансформаторе равен нулю (рис. 8.). Первый всплеск тока находят, используя «искусственный прием», описанный в [1], а также в учебниках, по формуле Шварца:

$$I_{вкл}^{Шварц} \equiv i_{1наиб}^{XX} = \frac{U_{1m}}{\omega L_S} \left(2 - \frac{B_S - B_{ост}^{XX}}{B_m^{XX}} \right), \quad (130)$$

где $B_S = 2Tл$ — индукция насыщения, а L_S — «свободная индуктивность» НН-обмотки без стали, равная

$$L_S = \frac{\mu_0 w_1^2 S_{эфф}}{h};$$

$$S_{эфф} = \frac{\pi(D_a - a)^2}{4} \left[1 + \frac{4a}{3(D_a - a)} \times \left(1 + \frac{a}{2(D_a - a)} \right) \right]. \quad (131)$$

Пример 5. Для трансформатора из Примера 1 имеем:

$$D_a - a = 0,5388 - 0,0419 = 0,4969 \text{ м};$$

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\pi \cdot 0,4969^2}{4} \times \left[1 + \frac{4 \cdot 0,0419}{3 \cdot 0,4969} \left(1 + \frac{0,0419}{2 \cdot 0,4969} \right) \right] = 0,2166 \text{ м}^2;$$

$$L_S = \frac{\mu_0 \cdot 128^2 \cdot 0,2166}{0,8736} = 0,00510 \text{ Гн}.$$

Найденное значение индуктивности L_S в 1,1 раз меньше ее значения, полученного в [1] для трансформатора с тонкими обмотками (при эквивалентных значениях индуктивности КЗ и среднего диаметра между обмотками D_{12}). Из

(130) следует, что всплеск тока включения при учете конечной толщины обмоток получается в 1,1 раза больше вычисленного в [1]. Чтобы при переходе к тонким обмоткам ток включения оставался неизменным, необходимо, оставляя неизменным расстояние δ° между тонкими обмотками, уменьшать их диаметры D_a^0 и D_b^0 , используя в [1] для вычисления D_a^0 формулу

$$D_a^0 = \sqrt{\frac{4S_{\text{эфф}}}{\pi}}. \quad (132)$$

Ток при внезапном КЗ внешней обмотки трансформатора

На рис. 9 представлены схемы замещения для исследования двух наиболее важных случаев внезапного КЗ. Очевидно, во-первых, что

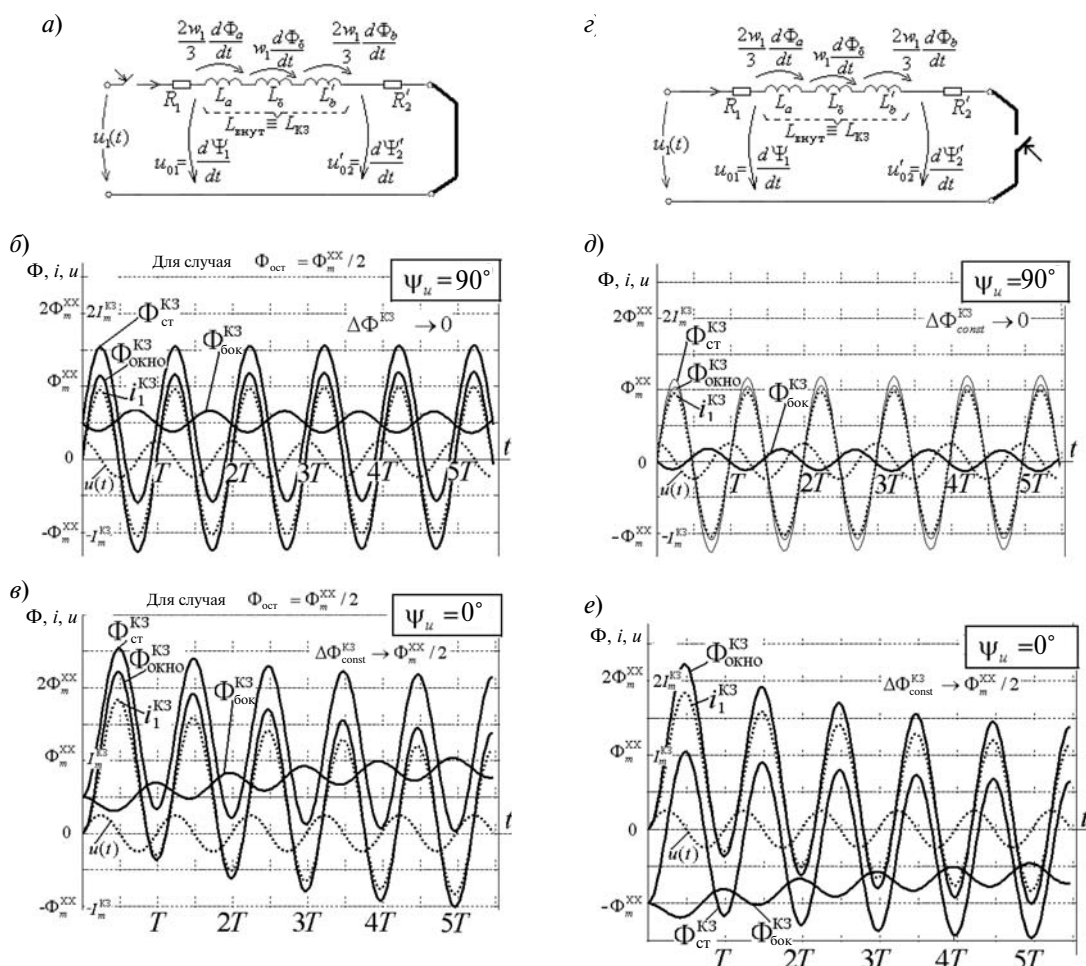


Рис. 9. Сравнение процессов при включении предварительно закороченного трансформатора (а, б, в) с процессами в случае его внезапного КЗ из режима холостого хода (з, д, е) (программа DINAM_2 \ kz_paper2.m)



в обеих схемах ток переходного процесса изменяется с одинаковой постоянной времени

$$\tau_{K3} = \frac{L_{K3}}{r_{K3}} = \frac{x_{K3}}{r_{K3}\omega} = \frac{x_{K3}T}{r_{K3}2\pi} = \frac{\text{tg}\varphi_{K3}}{2\pi} T. \quad (133)$$

Пример 6. Для трансформатора с данными из Примера 1 имеем

$$\tau_{K3} = \frac{x_{K3}}{r_{K3}\omega} = \frac{0,1048}{0,006 \cdot 314} = 0,0556 \text{ с},$$

что в 2,78 раз больше периода $T = 0,02$ с. Поскольку переходный процесс заканчивается в течение $(2-3)\tau$, то представленные далее кривые токов и потоков для этого примера ограничены интервалом $(5-7)T$.

Во вторых, при заданных r_{K3} , L_{K3} и начальной фазе ψ_u приложенного напряжения $u_1 = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ выражение для тока переходного процесса будет таким же, как в трансформаторе с тонкими обмотками, и нам достаточно переписать его из [1]:

$$i_1^{K3}(t) = I_{lm}^{K3} \times \left(\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{K3}) + e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) \right), \quad (134)$$

где I_{lm}^{K3} — амплитуда тока установившегося режима КЗ:

$$I_{lm}^{K3} = \frac{U_{lm}}{z_{K3}} = \frac{U_{lm}}{\omega L_{K3}} \sin \varphi_{K3}; \quad \varphi_{K3} = \arctg \frac{x_{K3}}{r_{K3}}. \quad (135)$$

Из (135) следует, что кривые тока на рис. 9, б и д идентичны, т. к. получены при одинаковом

$\psi_u = 90^\circ$. Точно так же идентичны кривые тока на рис. 9, в е, полученные при одинаковом $\psi_u = 0$. В мощных трансформаторах $\varphi_{K3} \approx 90^\circ$, и тогда

$$i_1^{K3}(t) \approx I_{lm}^{K3} \left(-\cos(\omega t + \psi_u) + e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \cos \psi_u \right). \quad (136)$$

Эти выражения приводятся в учебниках, где также представлены основные характеристики для тока КЗ в мощных трансформаторах (табл. 4).

Отношение

$$K_{уд} = \frac{i_1^{K3} \Big|_{\substack{\psi_u=0 \\ t=T/2}}}{I_{lm}^{K3}} = \frac{i_{1уд}^{K3}}{I_{lm}^{K3}} = e^{-\frac{T}{2\tau_{K3}}} + 1 \quad (137)$$

называют *ударным коэффициентом*. В мощных трансформаторах

$$\frac{T}{2\tau_{K3}} = \frac{\pi}{\text{tg} \varphi_{K3}} \approx \frac{\pi}{30 \div 90} \quad (138)$$

и ударный коэффициент достигает значения

$$K_{уд} = e^{-\frac{\pi}{30 \div 90}} + 1 = 1,9 \div 1,965, \quad (139)$$

т. е. ударный ток равен почти двойному значению амплитуды установившегося тока КЗ:

$$i_{1уд}^{K3} \approx 2I_{lm}^{K3} = 2 \frac{U_{lm}}{z_{K3}} \quad (140)$$

Пример 7. Для трансформатора из Примера 1 значение тока КЗ со стороны обмотки НН

Таблица 4

Изменение тока при внезапном КЗ

Начальная фаза напряжения	Изменение тока короткого замыкания	Примечание
$\psi_u = \pi/2$	$i_1^{K3}(t) \approx I_{lm}^{K3} \sin \omega t$	Сразу устанавливается синусоидальный ток КЗ
$\psi_u = 0$	$i_1^{K3}(t) \approx I_{lm}^{K3} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} - \cos \omega t \right)$	При $t \approx \pi/\omega = T/2$ возникает $i_{1уд}^{K3} \approx I_{lm}^{K3} \left(e^{-\frac{T}{2\tau_{K3}}} + 1 \right)$

равно $I_m^{K3} = U_{1m} / z_{K3} = 6,35\sqrt{2} / 1,27 = 7,071$ кА, $\tau_{K3} = 0,0556$ с. По формуле (137) получаем

$$K_{уд} = e^{-\frac{0,02}{2 \cdot 0,0556}} + 1 = 1,835,$$

что подтверждено также на графиках тока (рис. 9, в, е), построенных по формуле (134) для случая $\psi_u = 0$.

Как видно, учет толщины обмоток в идеализированном трансформаторе не влияет на его токи. С помощью (134) и схемы замещения (рис. 8) построены кривые изменения всех потоков при внезапном КЗ (рис. 9). Их сравнение с аналогичными кривыми для эквивалентного трансформатора с тонкими обмотками (см. рис. 11 в [1]) показывает, что всплески всех потоков на рис. 9 оказываются больше.

Примечание 7. Эти всплески оказываются весьма значительными. Поэтому в реальных трансформаторах необходимо учитывать сильное насыщение участков стали при КЗ, которое приводит к увеличению всплесков токов [1, 2, 8].

Магнитные потоки в окне при внезапном КЗ вторичной обмотки

Соотношения табл. 1 показывают, что все потоки в окне в любой момент времени пропорциональны току в любых условиях работы идеализированного трансформатора, в том числе и при внезапном КЗ. Для полного потока в окне при внезапном КЗ внешней обмотки с учетом (42) и (102) можем написать

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{окно}}^{K3}(t) &= \left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L_b') \right) \frac{i_1^{K3}(t)}{w_1} = \\ &= \frac{\left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L_b') \right)}{L_{K3}} \frac{L_{K3} i_1^{K3}(t)}{w_1} = k_{\text{окно}} \frac{L_{K3} i_1^{K3}(t)}{w_1}, \end{aligned}$$

или на основании (134) и (135)

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{окно}}^{K3}(t) &= \frac{k_{\text{окно}} L_{K3}}{w_{K3}} \left(\frac{U_{1m}}{\omega L} \sin \varphi_{K3} \right) \times \\ &\times \left(\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{K3}) + e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) \right). \end{aligned}$$

С учетом обозначения (128) получаем выражение

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{окно}}^{K3}(t) &= k_{\text{окно}} \Phi_m^{XX} \times \\ &\times \left(\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{K3}) + e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) \right) \times \\ &\times \sin \varphi_{K3}, \end{aligned} \quad (141)$$

которое для мощных трансформаторов (т. е. при условии $\varphi_{K3} \approx 90^\circ$) можно представить в виде, приведенном в табл. 5, где также даны выражения для всех потоков в окне.

Коэффициенты $k_{\text{окно}}^a$, $k_{\text{окно}}^b$, $k_{\text{окно}}^c$ определяют долю соответствующих потоков относительно полного потока в окне в любом режиме работы трансформатора. Они получены на основе соотношений табл. 1. Заметим, что с учетом (90) и (96)

$$\begin{aligned} k_{\text{ст}}^{K3 \text{ внеш}} &\approx 1 + \frac{k_{\text{окно}}^a k_{\text{окно}}}{3}; \\ k_{\text{окно}} - \frac{k_{\text{окно}}^a k_{\text{окно}}}{3} &\approx 1 + k_{\text{б}}^{K3 \text{ внеш}}. \end{aligned} \quad (142)$$

В третьей колонке табл. 5 приведены упрощенные выражения коэффициентов, полученные при весьма грубом допущении $D_a = D_{12} = D_b$.

Выводы

1. Как и ток $i_1^{K3}(t)$, установившееся значение потока в окне не может содержать постоянной составляющей.

2. Если КЗ произошло при $\psi_u = 90^\circ$, то поток в окне практически сразу принимает установившееся синусоидальное значение

$$\Phi_{\text{окно}}^{K3}(t) \Big|_{\psi_u=90^\circ} \approx k_{\text{окно}} \Phi_m^{XX} \sin \omega t. \quad (143)$$

3. Если КЗ произошло при $\psi_u = 0$, то поток в окне будет изменяться со всплесками согласно выражению

$$\Phi_{\text{окно}}^{K3}(t) \Big|_{\psi_u=0^\circ} \approx k_{\text{окно}} \Phi_m^{XX} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} - \cos \omega t \right), \quad (144)$$

и в окне трансформатора приблизительно через $t \approx \pi / \omega = T / 2$ возникнет ударный поток

$$\Phi_{\text{окно (уд)}}^{K3} \approx k_{\text{окно}} \Phi_m^{XX} \left(e^{-\frac{T}{2\tau_{K3}}} + 1 \right), \quad (145)$$

откуда следует, что ударный коэффициент для потока в окне при учете толщины обмоток оказывается существенно больше ударного коэффициента для тока:



Таблица 5

Потоки в окне при внезапном КЗ

Формула для потока	Выражение коэффициента через индуктивности	Выражение коэффициента через геометрию
$\Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(t) \approx k_{\text{окно}} \Phi_m^{\text{XX}} \left(-\cos(\omega t + \psi_u) + e^{-\frac{t}{\tau_{\text{K3}}}} \cos \psi_u \right)$	$k_{\text{окно}} = \frac{L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b)}{L_{\text{K3}}}$	$1 + \frac{a+b}{2a+6\delta+2b}$
$\Phi_a(t) = k_{\text{окно}}^a \Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(t)$	$k_{\text{окно}}^a = \frac{3}{2} \frac{L_a}{\left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b) \right)}$	$\frac{a}{a+2\delta+b}$
$\Phi_{\delta}(t) = k_{\text{окно}}^{\delta} \Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(t)$	$k_{\text{окно}}^{\delta} = \frac{L_{\delta}}{\left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b) \right)}$	$\frac{2\delta}{a+2\delta+b}$
$\Phi_b(t) = k_{\text{окно}}^b \Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(t)$	$k_{\text{окно}}^b = \frac{3}{2} \frac{L'_b}{\left(L_{\delta} + \frac{3}{2}(L_a + L'_b) \right)}$	$\frac{b}{a+2\delta+b}$

$$K_{\text{уд}}^{\Phi_{\text{окно}}} = \frac{\Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(\text{уд})}{\Phi_m^{\text{XX}}} = k_{\text{окно}} \left(e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{K3}}}} + 1 \right) = k_{\text{окно}} K_{\text{уд}}, \quad (146)$$

тогда как для тонких обмоток этот коэффициент совпадает с $K_{\text{уд}}$ для тока [1].

Пример 8. Для трансформатора из Примера 1 были найдены $k_{\text{окно}} = 1,205$; $K_{\text{уд}} = 1,835$. Следовательно, $K_{\text{уд}}^{\Phi_{\text{окно}}} = 1,205 \cdot 1,835 = 2,2$, что также иллюстрируется графиками $\Phi_{\text{окно}}^{\text{K3}}(t)$ на рис. 9, в, е, построенными по формуле (141) для случая $\psi_u = 0$. Эти графики не зависят от остаточного намагничивания стали. Для тонких обмоток $K_{\text{уд}}^{\Phi_{\text{окно}}} = 1,835$.

В мощных трансформаторах $\tau_{\text{K3}} \gg T$, поэтому для них

$$K_{\text{уд}}^{\Phi_{\text{окно}}} \approx 2k_{\text{окно}}. \quad (147)$$

Внедрение в сталь постоянного магнитного потока при внезапном КЗ

В схемах замещения (рис. 9) до коммутации ток равнялся нулю. Поэтому начальное значение

потокосцепления $\Psi_1^{\text{K3}}(t)$ при $t=0$ определяется начальным значением потока в магнитопроводе $\Phi_{\text{начал}}$. Изменение $\Psi_1^{\text{K3}}(t)$ вследствие внезапного КЗ можно найти в результате решения дифференциального уравнения:

$$\begin{cases} R_1 i_1^{\text{K3}} + \frac{d\Psi_1^{\text{K3}}(t)}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_u); \\ \Psi_1^{\text{K3}}(0) = w_1 \Phi_{\text{начал}}. \end{cases} \quad (148)$$

Поскольку выражение для тока уже известно, то можно найти $\Psi_1^{\text{K3}}(t)$ по формуле

$$\begin{aligned} \Psi_1^{\text{K3}}(t) &= \\ &= \int_0^t U_{1m} \sin(\omega t + \psi_u) dt - R_1 \int_0^t i_1^{\text{K3}}(t) dt + w_1 \Phi_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (149)$$

Подставив во второй интеграл этого выражения правую часть (134) и выполнив интегрирование, получаем

$$\begin{aligned} \Psi_1^{\text{K3}}(t) &= w_1 \Phi_m^{\text{XX}} [-\cos(\omega t + \psi_u) + \\ &+ \left(\frac{R_1}{x_{\text{K3}}} \cos(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{K3}}) + \frac{R_1}{r_{\text{K3}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{K3}}}} \sin(\varphi_{\text{K3}} - \psi_u) \right) \times \end{aligned}$$

$$\left[\times \sin \varphi_{K3} \right] + w_1 \Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} + w_1 \Phi_{\text{начал}}, \quad (150)$$

где $\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3}$ — постоянный магнитный поток, равный

$$\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} = \Phi_m^{XX} \left[\cos \psi_u - \left(\frac{R_1}{x_{K3}} \cos(\varphi_{K3} - \psi_u) + \frac{R_1}{r_{K3}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) \right) \sin \varphi_{K3} \right], \quad (151)$$

что при условии $\varphi_{K3} = 90^\circ$ можно представить в виде

$$\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} \approx \Phi_m^{XX} \left[\left(1 - \frac{R_1}{r_{K3}} \right) \cos \psi_u - \frac{R_1}{x_{K3}} \sin \psi_u \right]. \quad (152)$$

Поскольку обычно $R_1 / x_{\delta 0} \approx 1 / (2 \operatorname{tg} \varphi_{K3}) \rightarrow 0$ и $R_2' \approx 0,5 r_{K3}$, то практически

$$\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} \approx \Phi_m^{XX} \frac{R_2'}{r_{K3}} \cos \psi_u \approx \frac{\Phi_m^{XX}}{2} \cos \psi_u. \quad (153)$$

Аналогичным образом можно получить выражение для потокоцепления $\Psi_2^{K3}(t) \equiv n \Psi_2^{K3}(t)$.

Магнитный поток в стержне при внезапном КЗ вторичной обмотки

Для потока в стержне $\Phi_{\text{ст}}(t) \equiv \Phi_1(t)$ на основании (44), а также соотношений табл. 5 можем написать

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) &= \frac{1}{w_1} \Psi_1(t) + \frac{1}{3} \Phi_a(t) = \\ &= \frac{1}{w_1} \Psi_1(t) + \frac{k_{\text{окно}}^a}{3} \Phi_{\text{окно}}(t). \end{aligned} \quad (154)$$

После подстановки сюда правых частей выражений для (150), (141) и несложных алгебраических преобразований получаем

$$\begin{aligned} \Phi_1^{K3}(t) &= \Phi_m^{XX} \left\{ -\cos(\omega t + \psi_u) + \right. \\ &+ \left[\frac{R_1}{x_{K3}} \cos(\omega t + \psi_u - \varphi_{K3}) + \right. \\ &+ \left. \frac{R_1}{r_{K3}} e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) + \frac{k_{\text{окно}}^a k_{\text{окно}}}{3} \times \right. \end{aligned}$$

$$\left. \times \left(\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{K3}) + e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \sin(\varphi_{K3} - \psi_u) \right) \sin \varphi_{K3} \right\} + \Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} + \Phi_{\text{начал}} \quad (155)$$

Для мощных трансформаторов первым слагаемым в квадратных скобках можно пренебречь, а также принять $\varphi_{K3} \approx 90^\circ$. Тогда с учетом связи (142) получаем

$$\begin{aligned} \Phi_1^{K3}(t) &\approx \Phi_m^{XX} \times \\ &\times \left[-k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}} \cos(\omega t + \psi_u) + \right. \\ &+ \left. (k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}} - 0,5) e^{-\frac{t}{\tau_{K3}}} \cos \psi_u \right] + \\ &+ \Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} + \Phi_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (156)$$

Из (156) следует:

1. Колебания кривой потока стержня $\Phi_1^{K3}(t)$ в переходном процессе описываются косинусоидой $-k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}} \Phi_m^{XX} \cos(\omega t + \psi_u)$. Как и при установившемся КЗ, амплитуда этих колебаний в $k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}}$ раз превышает амплитуду потока XX. Таким образом, и $\Phi_1^{K3}(t)$ имеет смысл сверхпотока.

2. Установившийся сверхпоток $\Phi_1^{K3}(t)$ содержит, помимо косинусоиды, еще и постоянный поток КЗ, равный

$$\Phi_{\text{const}}^{K3} = \Delta \Phi_{\text{const}}^{K3} + \Phi_{\text{начал}}. \quad (157)$$

Это выражение показывает, что внезапное КЗ сопровождается внедрением в сердечник постоянного во времени потока $\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3}$ (152) с индукцией

$$\Delta B_{\text{const}}^{K3} = \frac{\Delta \Phi_{\text{const}}^{K3}}{S_{\text{ст}}} \approx \frac{B_m^{XX}}{2} \cos \psi_u. \quad (158)$$

3. Выражение (156) показывает, что наибольшее значение индукции сверхпотока в стержне наступает при $\psi_u = 0$ в момент времени $t \approx T/2$ (когда $\omega t \approx \pi$) после КЗ:

$$\begin{aligned} B_{\text{ст наиб}}^{K3} &= B_{\text{ст}}^{K3}(t) \Big|_{\substack{\psi_u=0 \\ t=T/2}} \approx \\ &\approx B_m^{XX} \left(k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}} + (k_{\text{ст}}^{K3 \text{внеш}} - 0,5) e^{-\frac{T}{2\tau_{K3}}} \right) + \\ &+ \frac{B_m^{XX}}{2} + B_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (159)$$

Пример 9. Для трансформатора из Примера 1 было найдено следующее: $k_{\text{ст}}^{\text{KЗ}} = 1,069$; $\tau_{\text{KЗ}} = 0,0556$ с, $e^{-T/2\tau_{\text{KЗ}}} = 0,835 = 0,835$. Подстановка этих значений в (159) дает

$$B_{\text{ст наиб}}^{\text{KЗ}} \approx B_m^{\text{XX}} (1,069 + (1,069 - 0,5) \cdot 0,835) + 0,5B_m^{\text{XX}} + B_{\text{начал}} = 2,04B_m^{\text{XX}} + B_{\text{начал}}, \quad (160)$$

что подтверждает кривая $\Phi_{\text{ст}}^{\text{KЗ}}(t)$ на рис. 9, в. В эквивалентном трансформаторе с тонкими обмотками $k_{\text{ст}}^{\text{KЗ}} = 1$ и $B_{\text{ст наиб}}^{\text{KЗ}} \approx 2B_m^{\text{XX}} + B_{\text{начал}}$, что незначительно отличается от (160). Напомним, что в учебниках ошибочно принимается $B_{\text{ст наиб}}^{\text{KЗ}} \approx 0,5B_m^{\text{XX}} + B_{\text{начал}}$.

Для мощных трансформаторов множитель с экспонентой в (159) почти равен единице, и для сверхиндукции в стержне можно написать

$$B_{\text{ст наиб}}^{\text{KЗ}} \approx 2k_{\text{ст}}^{\text{KЗ}} B_m^{\text{XX}} + B_{\text{начал}}. \quad (161)$$

Магнитный поток в боковом яре при внезапном КЗ внешней обмотки

Магнитный поток в боковом яре при КЗ находим из соотношения

$$\Phi_2^{\text{KЗ}}(t) = \Phi_1^{\text{KЗ}}(t) - \Phi_{\text{окно}}^{\text{KЗ}}(t), \quad (162)$$

после подстановки в которое правых частей (141) и (155), а также несложной перегруппировки слагаемых получаем с учетом второго соотношения (142)

$$\begin{aligned} \Phi_2^{\text{KЗ}}(t) = \Phi_m^{\text{XX}} \times \\ \times \left\{ -\cos(\omega t + \psi_u) + \left[\frac{R_1}{x_{\text{KЗ}}} \cos(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{KЗ}}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{R_1}{r_{\text{KЗ}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{KЗ}}}} \sin(\varphi_{\text{KЗ}} - \psi_u) - (1 - k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}}) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{KЗ}}) + e^{-\frac{t}{\tau_{\text{KЗ}}}} \sin(\varphi_{\text{KЗ}} - \psi_u) \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \sin \varphi_{\text{KЗ}} \right\} + \Delta \Phi_{\text{const}}^{\text{KЗ}} + \Phi_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (163)$$

Упрощая (163) подобно (155), для мощных трансформаторов получаем

$$\begin{aligned} \Phi_2^{\text{KЗ}}(t) \approx \Phi_m^{\text{XX}} \times \\ \times [k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} \cos(\omega t + \psi_u) - \\ - (k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} + 0,5) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{KЗ}}}} \cos \psi_u] + \\ + \Delta \Phi_{\text{const}}^{\text{KЗ}} + \Phi_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (164)$$

Из сравнения (164) и (156) вытекает следующее:

1. Колебания потока $\Phi_2^{\text{KЗ}}(t)$ находятся практически в противофазе с колебаниями $\Phi_1^{\text{KЗ}}(t)$ и описываются косинусоидой $k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} \Phi_m^{\text{XX}} \times \cos(\omega t + \psi_u)$. В этом смысле $\Phi_2^{\text{KЗ}}(t)$ сохраняет смысл антипотока.

2. Как и у сверхпотока $\Phi_1^{\text{KЗ}}(t)$, установившаяся составляющая антипотока $\Phi_2^{\text{KЗ}}(t)$ содержит, помимо косинусоиды, еще и постоянный поток КЗ $\Phi_{\text{const}}^{\text{KЗ}}$ в виде (157).

3. При внезапном КЗ в боковое яро внедряется такой же постоянный поток $\Delta \Phi_{\text{const}}^{\text{KЗ}}$, как и в сердечник, с индукцией в виде (158).

4. Из (164) следует, что при $\psi_u = 0$ в момент времени $t \approx T/2$, т. е. когда сверхпоток достигает наибольшего значения в результате внезапного КЗ, индукция антипотока в боковом яре равна

$$\begin{aligned} B_{\text{бок}}^{\text{KЗ}}(t) \Big|_{\psi_u=0} \approx \\ \approx B_m^{\text{XX}} \left(-k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} - (k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} + 0,5) e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{KЗ}}}} \right) + \\ + \frac{B_m^{\text{XX}}}{2} + B_{\text{начал}}. \end{aligned} \quad (165)$$

Напомним, что в эквивалентном трансформаторе с тонкими обмотками антипоток находится не в противофазе, а лишь смещен практически на 90° и имеет настолько малую амплитуду колебаний, что ею можно пренебречь, полагая изменение антипотока практически по экспоненте [1].

Пример 10. Для трансформатора из Примера 1 был найден коэффициент $k_{\text{бок}}^{\text{KЗ}} = 0,1436$. Его подстановка в (165) дает

$$\begin{aligned} B_{\text{бок}}^{\text{KЗ}}(t) \Big|_{\psi_u=0} \approx \\ \approx B_m^{\text{XX}} (-0,1436 - (0,1436 + 0,5) \cdot 0,835) + \end{aligned}$$

$$+ 0,5B_m^{XX} + B_{\text{начал}} = -0,19B_m^{XX} + B_{\text{начал}}, \quad (166)$$

что подтверждает кривая $\Phi_{\text{бок}}^{K3}(t)$ на рис. 9, в, которая при этом имеет существенно большую амплитуду колебаний, чем аналогичная кривая в трансформаторе с тонкими обмотками [1].

Для мощных трансформаторов множитель с экспонентой в (165) почти равен единице, и для антииндукции можно написать

$$B_{\text{бок}}^{K3}(t) \Big|_{\psi_u=0} \approx -2k_{\text{бок}}^{K3} B_m^{XX} + B_{\text{начал}}. \quad (167)$$

Кривые на рис. 9 подтверждают известный факт: наиболее опасной с точки зрения электромагнитных перегрузок является ситуация ($\psi_u = 0$), иллюстрируемая на рис. 9, в; суть ее в том, что при более значительных величинах остаточного потока $\Phi_{\text{ост}}$ эти перегрузки еще более увеличатся. Влияние остаточного намагничивания демонстрируется на рис. 10 для магнитных индукций в стержне ($B_{\text{ст}}^{K3}(t) = \Phi_{\text{ст}}^{K3}(t) / s_{\text{ст}}$) и в боковом яреме ($B_{\text{бок}}^{K3}(t) = \Phi_{\text{бок}}^{K3}(t) / s_{\text{бок}}$ (где $s_{\text{бок}} = s_{\text{ст}}$). Их сравнение с аналогичными кривыми для эквивалентного трансформатора с тонкими обмотками (см. рис. 12 в [1]) показывает, что всплески потоков на рис. 10 оказываются большими. Графики тока и потока в окне не представлены, так как для всех случаев (см. рис. 10) они одинаковы и совпадают с соответствующими кривыми на рис. 9, в.

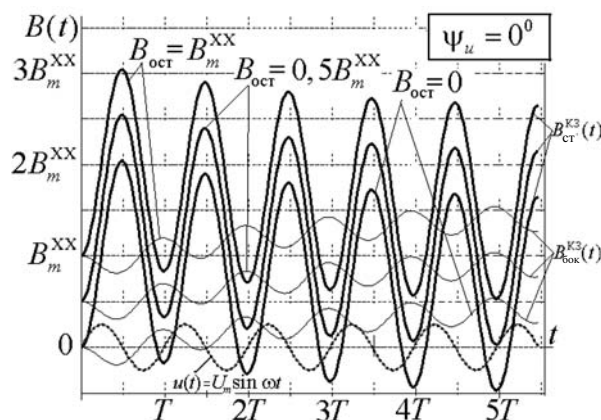


Рис. 10. Изменение индукции в стержне $B_{\text{ст}}^{K3}(t)$ и боковом яреме $B_{\text{бок}}^{K3}(t)$ при включении идеализированного трансформатора с короткозамкнутой внешней обмоткой при наличии в стали остаточной индукции $B_{\text{ост}}$

Замечание 7. Графики $B_{\text{ст}}^{K3}(t)$ и $B_{\text{бок}}^{K3}(t)$ в случае $B_{\text{ост}} = 0$ совпадают с аналогичными кривыми, приведенными в статье [3, рис. 9, б], где они получены численно интегрированием уравнений нелинейной 2Т-образной схемы замещения при аппроксимации кривой намагничивания стали параболой степени $n = 7$. Совпадение объясняется тем, что при указанной аппроксимации минимальное значение магнитной проницаемости в стержне в ходе всего переходного процесса оказалось равным $\mu_{\text{Fe}} = 55,9\mu_0$, и трансформатор оставался практически идеализированным. Сказанное можно расценивать как дополнительное подтверждение достоверности нелинейной 2Т-образной схемы замещения [3].

Вектор Пойнтинга в идеализированном трансформаторе

Корректное объяснение принципа действия трансформатора требует грамотного описания процесса доставки энергии из первичной, например НН, обмотки во вторичную (ВН-обмотку) через пространство окна. В связи с этим наряду с распределением магнитного поля $H(r)$ в окне необходимо знать и распределение в нем электрического поля $E(r)$ (рис. 11), которое легко определяется из закона электромагнитной индукции:

$$\oint E(r)dl = 2\pi r E(r) = \frac{d\Phi(r)}{dt}; \quad \dot{E}(r) = \frac{j\omega\dot{\Phi}(r)}{2\pi r}, \quad (168)$$

где $\Phi(r)$ — поток, охватываемый круговым контуром радиуса r с центром на оси стержня (см. рис. 1). Обозначим зависимость от r потока, заключенного во внутренней обмотке и отсчитываемого от ее внутренней поверхности, через Φ_a^r . Зависимость от r потока в межобмоточном пространстве, отсчитываемого от внешней поверхности внутренней обмотки, обозначим через Φ_δ^r . Наконец, зависимость от r потока внутри внешней обмотки, отсчитываемого от ее внутренней поверхности, обозначим через Φ_b^r . Иначе говоря:

$$\Phi_a^r = \int_{\frac{(D_a-a)}{2}}^r \mu_0 \dot{H}_a(r) 2\pi r dr;$$

$$\Phi_\delta^r = \int_{\frac{(D_a+a)}{2}}^r \mu_0 \dot{H}_\delta(r) 2\pi r dr;$$

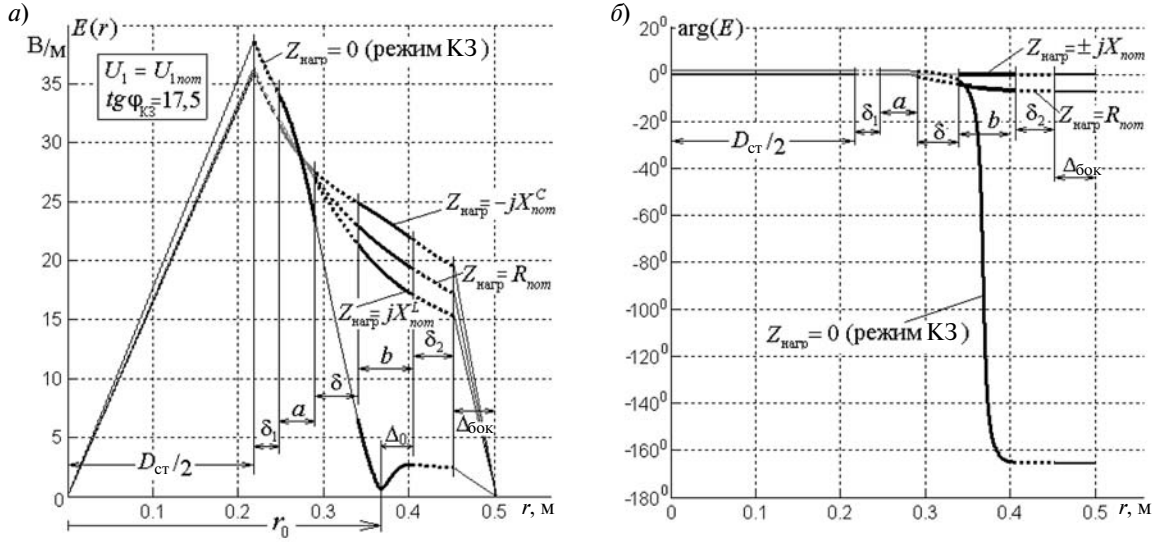


Рис. 11. Модуль (а) и фаза (б) напряженности электрического поля в идеализированном трансформаторе при активной, индуктивной и емкостной номинальных нагрузках в сравнении с кривой режима КЗ

$$\dot{\Phi}_b^r = \int_{\frac{(D_b-b)}{2}}^r \mu_0 \dot{H}_b(r) 2\pi r dr. \quad (169)$$

Учтя распределение $H(r)$ (см. рис. 1), а также соотношения (23) и (25), получаем

$$\dot{\Phi}_a^r = \frac{2\pi\mu_0}{ha} w_1 \dot{I}_1 \left(\frac{r^3}{3} - \frac{(D_a-a)r^2}{4} + \frac{(D_a-a)^3}{48} \right),$$

где $\frac{D_a-a}{2} < r < \frac{D_a+a}{2}$; (170)

$$\dot{\Phi}_\delta^r = \frac{\pi\mu_0}{h} w_1 \dot{I}_1 \left(r^2 - \frac{(D_a+a)^2}{4} \right),$$

где $\frac{D_a+a}{2} < r < \frac{D_b-b}{2}$; (171)

$$\dot{\Phi}_b^r = \frac{2\pi\mu_0}{hb} w_1 \dot{I}_1 \left(-\frac{r^3}{3} + \frac{(D_b+b)r^2}{4} - \frac{(D_b-b)^2(D_b+5b)}{48} \right),$$

где $\frac{D_b-b}{2} < r < \frac{D_b+b}{2}$. (172)

Условные положительные направления этих потоков показаны на рис. 1. С помощью этих соотношений из (168) можно найти зависимости $\dot{E}_a(r)$ в зоне внутренней обмотки, $\dot{E}_\delta(r)$ в зоне

между обмотками и $\dot{E}_b(r)$ в зоне внешней обмотки:

$$\dot{E}_a(r) = \frac{j\omega(\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_a^r)}{2\pi r},$$

где $\frac{D_a-a}{2} < r < \frac{D_a+a}{2}$; (173)

$$\dot{E}_\delta(r) = \frac{j\omega(\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_a - \dot{\Phi}_\delta^r)}{2\pi r},$$

где $\frac{D_a+a}{2} < r < \frac{D_b-b}{2}$; (174)

$$\begin{aligned} \dot{E}_b(r) &= \frac{j\omega(\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_a - \dot{\Phi}_\delta - \dot{\Phi}_b^r)}{2\pi r} = \\ &= \frac{j\omega(\dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_b - \dot{\Phi}_b^r)}{2\pi r}, \end{aligned}$$

где $\frac{D_b-b}{2} < r < \frac{D_b+b}{2}$. (175)

Найденные по этим формулам распределения $E(r)$ для различного типа номинальной нагрузки (см. табл. 2) и в режиме КЗ представлены на рис. 11. Здесь же представлены зависимости модулей фаз напряженностей: $\dot{E}_{ст}(r)$ — внутри стержня, $\dot{E}_{\delta 1}(r)$, $\dot{E}_{\delta 2}(r)$ — в зазорах δ_1 и δ_2 ; $\dot{E}_{бок}(r)$ — в боковом ярме. Формулы для комплексных первых трех из этих величин имеют вид

$$\dot{E}_{ст}(r) = \frac{j\omega \cdot 2\dot{\Phi}_1}{\pi D_{ст}^2} r, \quad \text{где } 0 < r < \frac{D_{ст}}{2}; \quad (176)$$

$$\dot{E}_{\delta 1}(r) = \frac{j\omega\dot{\Phi}_1}{2\pi r}, \text{ где } \frac{D_{\text{ст}}}{2} < r < \frac{D_{\text{ст}}}{2} + \delta_1; \quad (177)$$

$$\dot{E}_{\delta 2}(r) = \frac{j\omega\dot{\Phi}_2}{2\pi r}, \text{ где } \frac{D_b + b}{2} < r < \frac{D_b + b}{2} + \delta_2. \quad (178)$$

Выражение для $\dot{E}_{\text{бок}}(r)$ можно получить лишь для идеализированного бокового яма цилиндрической формы с внутренним диаметром $D_{\text{бок}1} = D_b + b + 2\delta_2$ и внешним диаметром $D_{\text{бок}2}$, получаемым из условия равенства сечений стержня и бокового яма. Откуда следует:

$$D_{\text{бок}2} = \sqrt{D_{\text{ст}}^2 + D_{\text{бок}1}^2}. \quad (179)$$

Ширина бокового яма на рис. 11 обозначена через $\Delta_{\text{бок}} = (D_{\text{бок}2} - D_{\text{бок}1})/2 = 0,05$ м. Поток $\dot{\Phi}_2^r$, заключенный внутри бокового яма от его внутренней поверхности до кругового контура радиуса r , равен

$$\dot{\Phi}_2^r = \frac{\dot{\Phi}_2}{\pi(D_{\text{бок}2}^2 - D_{\text{бок}1}^2)/4} \pi \left(r^2 - \frac{D_{\text{бок}1}^2}{4} \right). \quad (180)$$

Исходя из (168) получаем расчетное соотношение для напряженности в теле бокового яма:

$$\dot{E}_{\text{бок}}(r) = \frac{j\omega(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_2^r)}{2\pi r},$$

где $\frac{D_{\text{бок}1}}{2} < r < \frac{D_{\text{бок}2}}{2}. \quad (181)$

На рис. 11 точками выделены участки кривых для воздушных промежутков, ширина которых

соответственно равна δ_1 , δ и δ_2 . Рис. 11,б показывает, что в режиме КЗ вектор напряженности $\dot{E}(r)$ при некотором радиусе r_0 внутри короткозамкнутой обмотки практически изменяет свое направление на противоположное (и тем резче, чем больше значение $\text{tg}\varphi_{\text{КЗ}}$), принимая при этом почти нулевое значение. Поскольку фаза напряженности магнитного поля $\dot{H}(r)$ во всех точках окна одинакова (совпадает с фазой тока), то одновременно с $\dot{E}(r)$ будет изменять направление и вектор Пойнтинга $\dot{\Pi}(r) = \dot{E} \times \dot{H}^*$, что иллюстрируется на рис. 12. и 13 кривыми для режима короткого замыкания. Иначе говоря, векторы Пойнтинга на внутренней и внешней сторонах короткозамкнутой обмотки практически взаимно противоположны, и внутри обмотки имеется цилиндрическая поверхность радиуса r_0 , на которой вектор Пойнтинга практически равен нулю (а его мнимая составляющая точно равна нулю).

Замечание 8. Поскольку принято $\mu_{\text{стали}} = \infty$ и напряженность магнитного поля в стали равна нулю, то вектор Пойнтинга в стали и боковом яме, а также прилегающих к ним воздушных промежутках, ширина которых δ_1 и δ_2 , тоже равен нулю. Поэтому на рис. 12–13 представлены только зоны окна трансформатора. Между тем картину распределения потоков электромагнитного поля можно приближенно дополнить и участками в стали, задавшись, например, $\mu_{\text{стали}} = \mu = 100\mu_0$, приняв напряженность магнитного поля в стержне $\dot{H}_{\text{ст}} \approx \dot{\Phi}_1 / (\mu \cdot \pi D_{\text{ст}}^2 / 4)$ и воспользовавшись формулой (176). Получен-

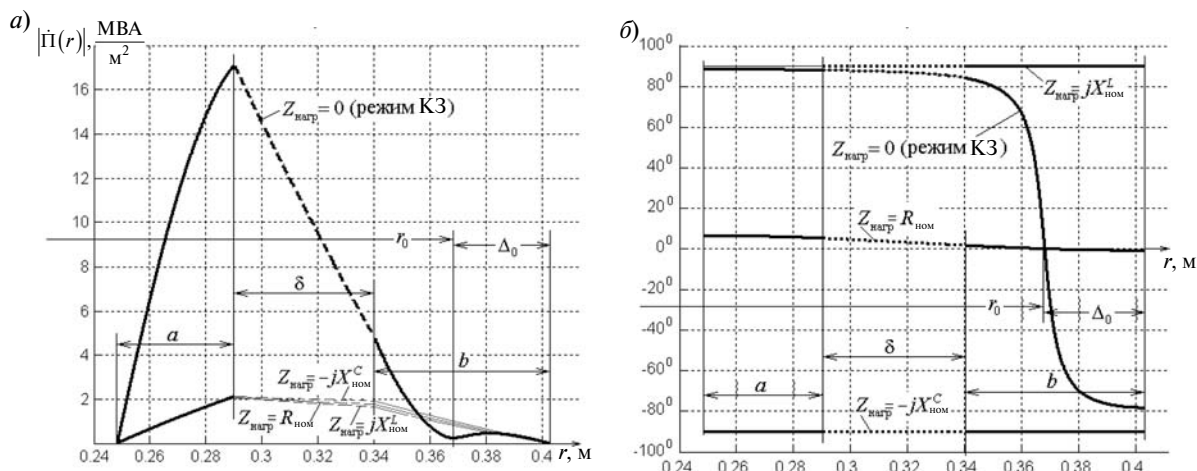


Рис. 12. Модуль (а) и фаза (б) вектора Пойнтинга в окне идеализированного трансформатора

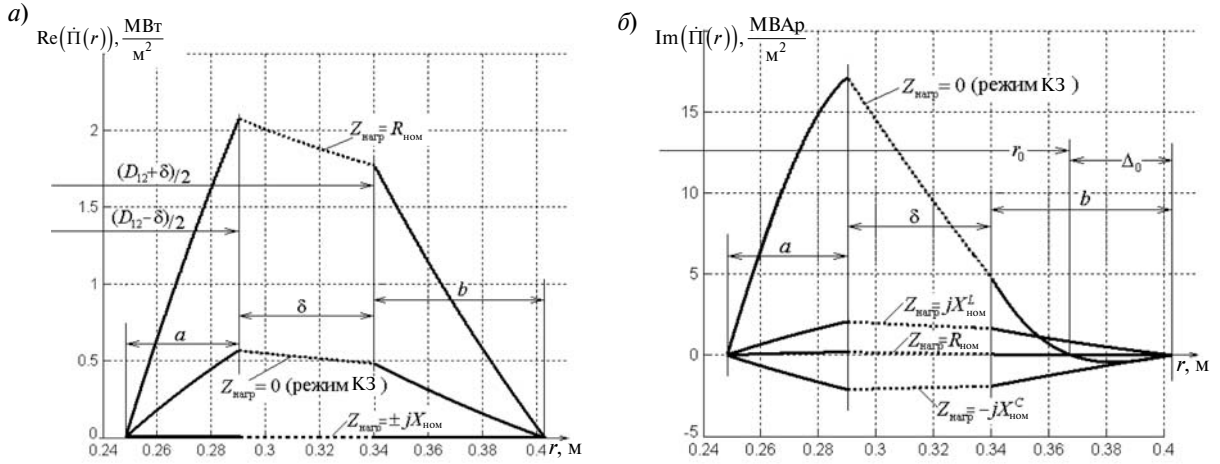


Рис. 13. Реальная (а) и мнимая (б) составляющие вектора Пойнтинга в окне идеализированного трансформатора

ный таким способом вектор Пойнтинга в стержне изменяется по линейному закону и направлен от внутренней обмотки в стержень. Если бы мы задались комплексной величиной $\dot{m}_{\text{стали}}$, то получили бы этот вектор с учетом активных потерь в стали стержня. Аналогично можно получить приближенное распределение вектора Пойнтинга, направленного в сторону бокового яра от внешней обмотки.

Примечание 8. В межобмоточном пространстве шириной δ вся активная мощность, исходящая из НН-обмотки, переносится без потерь в ВН-обмотку. Поэтому кривые для активной составляющей вектора Пойнтинга на рис. 13, а удовлетворяют условию

$$2\pi r h \operatorname{Re}(\dot{\Pi}(r)) = (R'_2 + R'_H) I_2^2 = (R'_2 + R'_H) I_1^2, \quad (182)$$

где $\frac{D_{21}-\delta}{2} < r < \frac{D_{21}+\delta}{2}$.

Из этого следует, что если $\dot{\Pi}_1$ — вектор Пойнтинга на внешней поверхности НН-обмотки, а $\dot{\Pi}_2$ — на внутренней поверхности ВН-обмотки, то

$$2\pi \frac{D_{21}-\delta}{2} h \operatorname{Re}(\dot{\Pi}_1) = 2\pi \frac{D_{21}+\delta}{2} h \operatorname{Re}(\dot{\Pi}_2), \quad (183)$$

или

$$\frac{\operatorname{Re}(\dot{\Pi}_1)}{\operatorname{Re}(\dot{\Pi}_2)} = \frac{(D_{21}+\delta)/2}{(D_{21}-\delta)/2}. \quad (184)$$

В частности, в режиме КЗ согласно рис. 13 имеем следующие удовлетворяющие условию (184) величины:

$$\operatorname{Re}(\dot{\Pi}_1^{K3}) = 0,568 \text{ МВт/м}^2;$$

$$\operatorname{Re}(\dot{\Pi}_2^{K3}) = 0,485 \text{ МВт/м}^2;$$

$$\frac{D_{21}-\delta}{2} = 29 \text{ м}; \quad \frac{D_{21}+\delta}{2} = 34 \text{ м}.$$

Естественно,

$$2\pi \frac{D_{21}-\delta}{2} h \operatorname{Re}(\dot{\Pi}_1^{K3}) = R'_2 (I_1^{K3})^2 = \frac{0,0726}{2} S^2 = 0,91 \text{ МВт},$$

что подтверждает (182) в режиме КЗ. В отличие от активной, перенос реактивной мощности в межобмоточном пространстве шириной δ протекает с потерями, расходуемыми на проведение магнитного потока Φ_δ в этом пространстве, что приводит к условию

$$\begin{aligned} \omega L_\delta I_1^2 &= \\ &= 2\pi \frac{D_{21}-\delta}{2} h \operatorname{Im}(\dot{\Pi}_1) - 2\pi \frac{D_{21}+\delta}{2} h \operatorname{Im}(\dot{\Pi}_2) = \\ &= 2\pi h \left(\frac{D_{21}-\delta}{2} \operatorname{Im}(\dot{\Pi}_1) - \frac{D_{21}+\delta}{2} \operatorname{Im}(\dot{\Pi}_2) \right). \end{aligned} \quad (185)$$

В частности, в режиме КЗ согласно рис. 13, б имеем

$$\operatorname{Im}(\dot{\Pi}_1^{K3}) = 17,09 \text{ МВАр/м}^2;$$

$$\operatorname{Im}(\dot{\Pi}_2^{K3}) = 4,76 \text{ МВАр/м}^2,$$

и правая часть (185) в этом режиме равна

$$2\pi \cdot 0,8736 (0,29 \cdot 17,09 - 0,34 \cdot 4,76) = 18,3 \text{ МВАр},$$

что совпадает с левой частью (185), поскольку согласно данным, приведенным в Примере 1,

$$\omega L_{\delta}(I_1^{K3})^2 = 0,732 \cdot 5^2 = 18,3 \text{ МВАр.}$$

Замечание 9. Принимая во внимание связи с векторным потенциалом

$$E(r) = -\frac{dA(r)}{dt}; \quad \dot{E}(r) = -j\omega \dot{A}(r),$$

$$\dot{A}(r)|_{r=0} = 0, \quad (186)$$

нетрудно соотношения (173)–(181) и кривые на рис. 11 переоформить в терминах векторного потенциала. Очевидно, что $\dot{A}(r_0) = 0$.

Для оценки радиуса r_0 найдем его приближенное значение, пренебрегая активными сопротивлениями обмоток, т. е. полагая $R_1 = R_2 = 0$. Тогда график $E^{K3}(r)$ на рис. 11 достигнет в точке $r = r_0$ нулевого значения, и для определения r_0 достаточно сумму в скобках числителя (175), переписанного для режима КЗ, приравнять нулю, то есть

$$\dot{\Phi}_2^{K3\text{внеш}} + \dot{\Phi}_b^{K3\text{внеш}} - \dot{\Phi}_b^{r_0\text{K3внеш}} = 0. \quad (187)$$

Из соотношений, приведенных в Замечании 4, следует, что

$$\dot{\Phi}_2^{K3\text{внеш}} + \dot{\Phi}_b^{K3\text{внеш}} = \frac{L'_b}{L_{K3}} \dot{\Phi}_{XX} = \frac{L'_b}{L_{K3}} \frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1}, \quad (188)$$

что позволяет с учетом (28) переписать (187) в виде

$$\dot{\Phi}_b^{r_0\text{K3внеш}} =$$

$$= \frac{L'_b}{L_{K3}} \frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1} = \frac{\mu_0 \pi w_1^2 b D_b}{h} \frac{\dot{U}_1}{3 j\omega L_{K3} w_1}. \quad (189)$$

Подставив сюда левую часть (172) и принимая ток КЗ

$$I_{K3}^{K3} = \dot{U}_1 / j\omega L, \quad (190)$$

получаем следующее уравнение относительно величины r_0 :

$$\left(-\frac{r_0^3}{3} + \frac{(D_b + b)r_0^2}{4} - \frac{(D_b - b)^2(D_b + 5b)}{48} \right) =$$

$$= \frac{\mu_0 \pi w_1^2 b D_b}{h} \frac{\dot{U}_1}{3 j\omega L_{K3} w_1}. \quad (191)$$

Это выражение — кубическое уравнение, из которого аналитическое решение для r_0 получить сложно. В связи с этим заменим (172) приближенной квадратичной зависимостью, которую получим из последнего выражения (169), приняв в его подинтегральном выражении $2\pi r \approx 2\pi(D_b/2)$ (что возможно, поскольку $b \ll D_b/2$):

$$\dot{\Phi}_b^r \approx \mu_0 \frac{2\pi D_b}{2} \int_{\frac{(D_b-b)}{2}}^r \dot{H}_b^r dr. \quad (192)$$

Тогда с учетом (25) для режима КЗ получаем

$$\dot{\Phi}_b^{r\text{K3внеш}} \approx$$

$$\approx \mu_0 \pi D_b \int_{\frac{(D_b-b)}{2}}^r \frac{w_1 \dot{I}_1^{K3}}{h} \frac{[(D_b + b)/2 - r]}{b} dr =$$

$$= \mu_0 \pi D_b \frac{w_1}{2hb} \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_{K3}} \left[b^2 - \left(\frac{D_b + b}{2} - r \right)^2 \right].$$

Это после подстановки в левую часть (189) и простых сокращений приводит к квадратичному уравнению относительно $r = r_0$:

$$\frac{1}{2b} \left[b^2 - \left(\frac{D_b + b}{2} - r \right)^2 \right] = \frac{b}{3}, \quad (193)$$

решая которое, находим искомый радиус нулевого (более точно: почти нулевого) значения вектора Пойнтинга:

$$r_0 = \frac{D_b + b}{2} - \frac{b}{\sqrt{3}} = R_b^{\text{наруж}} - 0,577b, \quad (194)$$

где $R_b^{\text{наруж}} = (D_b + b)/2$ — наружный радиус внешней обмотки. Соотношение (194) тем вернее, чем ширина b меньше $D_b/2$. Как видно, поверхность с почти нулевыми напряженностью электрического поля и вектором Пойнтинга стоит на расстоянии

$$\Delta_0 = 0,58b \quad (195)$$

от наружного края короткозамкнутой внешней обмотки. Для рассматриваемого примера

$$r_0 = \frac{0,7436 + 0,0629}{2} - \frac{0,0629}{\sqrt{3}} = 0,367 \text{ м;}$$

$$\Delta_0 = 0,58 \cdot 0,0629 = 0,0364 \text{ м,} \quad (196)$$

что согласуется с графиками для режима КЗ на рис. 11–13. Таким образом, антипоток, состав-



для третью часть внутреннего потока короткозамкнутой обмотки (см. замечание 4), занимает 58 %, т. е. почти 60 % ее толщины b :

$$\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ внеш}} \approx -\frac{\dot{\Phi}_b^{\text{КЗ внеш}}}{3} \approx -\dot{\Phi}_{\Delta_0}^{\text{КЗ внеш}}. \quad (197)$$

Всю остальную часть окна трансформатора, исключая зазоры δ_1 и δ_2 , занимает сверхпоток КЗ. Аналогичное правило имеет место и при КЗ внутренней обмотки. Эти положения подтверждаются картинками магнитных полей короткозамкнутого трансформатора в [1, 3, 5], полученными с помощью метода конечных элементов на основе программы ELCUT1 при участии кандидата технических наук Ю.В.Варламова и аспиранта (ныне кандидата технических наук) Дуань Лиюна.

Значение модуля вектора Пойнтинга при $r = r_0$ в режиме КЗ ($\Pi^{\text{КЗ}}(r_0)$) вычислим исходя из соображения, что поскольку при $r = r_0$ реактивная составляющая вектора Пойнтинга равна нулю, то $\dot{\Pi}^{\text{КЗ}}(r_0) = \text{Re}(\dot{\Pi}^{\text{КЗ}}(r_0))$, а $\text{Re}(\dot{\Pi}^{\text{КЗ}}(r_0))$ определяет потери активной мощности в части ВН-обмотки, находящейся за пределами радиуса r_0 , т. е. в сопротивлении, равном $(R_2' / b)((D_b + b) / 2 - r_0)$. В результате можем написать

$$\Pi^{\text{КЗ}}(r_0) = \frac{R_2'(I_1^{\text{КЗ}})^2}{2\pi r_0 h} \frac{(D_b + b) / 2 - r_0}{b}. \quad (198)$$

В рассматриваемом примере

$$\Pi^{\text{КЗ}}(r_0) = \frac{(0,0726 / 2) \cdot 5^2}{2\pi \cdot 0,367 \cdot 0,8736} \frac{0,403 - 0,367}{0,0629} =$$

$$= 0,258 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}, \quad (199)$$

что совпадает со значениями $\Pi^{\text{КЗ}}(r_0)$ и $\text{Re}(\dot{\Pi}^{\text{КЗ}}(r_0))$ на рис. 12 и 13.

Примечание 9. Изложенная теория не только исправляет ошибки работ [9, 10], обнаруженные в [11], но также показывает несостоятельность самой [11] с ее представлениями о линиях потока мощности, якобы «имеющих в канале рассеяния вид спиралей с несколькими оборотами», для чего при определении вектора Пойнтинга вместо тангенциальной напряженности $E(r)$ используется «радиальная напряженность $E_{\text{рад}}$ » между обмотками. Ошибка [11] в том, что при отсутствии заземления одной из двух обмоток этой $E_{\text{рад}}$ попросту не будет!

Заключение

Выведены аналитические соотношения по учету влияния конечной толщины обмоток, позволяющие правильно объяснять принцип действия и работы идеализированного трансформатора в любых установившихся и переходных режимах. Показано, что обычно принимаемые упрощения, связанные с переходом к бесконечно тонким обмоткам, ведут к грубым ошибкам в оценках магнитных потоков при внезапных КЗ одной из обмоток. Сделан вывод, что существующие методы расчета реальных трансформаторов дают весьма заниженные значения ударных токов и сил, действующих на обмотки при внезапных КЗ. В целом полученные результаты вместе с соотношениями из первой части нашей работы являются базовыми для построения новой, более корректной теории трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шакиров, М.А.** Теория трансформаторов. Часть 1: Идеализированный трансформатор с тонкими обмотками [Текст] / М.А. Шакиров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2012. № 3(154). Т. 2.
2. **Александров, Г.Н.** Трансформаторы и реакторы. Новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.
3. **Шакиров, М.А.** 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество. — 2010. № 5.
4. **Шакиров, М.А.** Теоретические основы электротехники. Тензоры в ТОЭ. Электродинамика. Теория относительности [Текст] / М.А. Шакиров. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.
5. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов, Лион Дуань // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2010. № 1 (95).
6. **Шакиров, М.А.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Дуань Лион. — Электричество. — 2010. № 3.
7. **Шакиров, М.А.** Достоверность 2Т-образной схемы замещения силового трансформатора [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Ван Сынань // На-

учно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4 (110).

8. **Шакиров, М.А.** Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2005. № 11.

9. **Брон, О.Б.** Электромагнитное поле как вид материи [Текст] / О.Б. Брон.— М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.

10. **Туровский, Я.** Техническая электродинамика [Текст] / Я. Туровский.— М.: Энергия, 1974.

11. **Лейтес, Л.В.** Вектор Пойнтинга в реакторе и трансформаторе [Текст] / Л.В. Лейтес // Электричество.— 1978. № 7.

УДК 621.175.4

*И.А. Богов, А.П. Безухов, В.А. Суханов,
И.Д. Волковицкий, Н.Ю. Донцов*

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОТУРБИННЫХ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

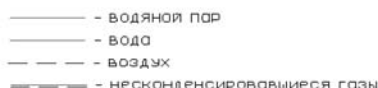
Снижение водопотребления тепловыми электростанциями — чрезвычайно актуальная проблема, требующая решения ряда задач, главная из которых — это разработка комплекса мероприятий, направленных на использование в составе паротурбинных установок (ПТУ) так называемых «сухих» систем охлаждения, в частности воздухоохлаждаемых конденсаторов (ВК). В связи с этим особую важность приобретает решение таких вопросов, как моделирование, исследование и расчет рабочих процессов в паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсационных установках (ВКУ). Наиболее оптимален с технико-экономической точки зрения такой метод экспериментального исследования этих рабочих процессов, как физическое моделирование. Для реализации этого метода моделирования указанных рабочих процессов в лаборатории кафедры турбиностроения и средств автоматики Санкт-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ — ВТУЗ) был построен уникальный стенд — «Воздухоохлаждаемая конденсационная установка». Его совмещенная (принципиальная и измерительная) схема представлены на рис. 1*.

* **Богов, И.А.** Моделирование рабочих процессов воздухоохлаждаемых конденсаторов парогазовых установок [Текст] / И.А. Богов, В.В. Назаров, В.А. Суханов // Тезисы докладов LIX научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы выбора схем, параметров и материалов современных газотурбинных и парогазовых установок». — Санкт-Петербург, 5–7 сентября 2012 г. — ОАО «ВТИ». — СПб., 2012. — С. 115–116.

В состав стенда входят три взаимосвязанные системы: пароводяная, газодульная и воздушная.

Пароводяная система представляет собой разомкнутый контур первичного теплоносителя. В этом контуре питательная вода насосом Н подается через фильтр Ф из водопровода центрального холодного водоснабжения ХВС на электропарогенератор ЭПГ, в котором она преобразуется в пар. Насос Н управляется посредством магнитного пускателя сигналами, поступающими от датчиков уровня воды, находящихся в соответствующем уровне баке электропарогенератора (ЭПГ). По сигналу датчика нижнего уровня происходит включение насоса, в результате чего основной бак ЭПГ пополняется водой до верхнего уровня, компенсируя тем самым расход воды на испарение и технологическую продувку. Частота включения насоса определяется площадью проходного сечения трубопровода питательной воды, регулируемой с помощью электромагнитного крана КЭМ1, и скоростью испарения этой воды, характеризующейся изменением ее уровня в основном баке ЭПГ.

Пар, образовавшийся в электропарогенераторе, проходит по основному трубопроводу, на котором последовательно располагается следующая запорная арматура: шаровый кран ШК7, необходимый для экстренного отключения подачи пара; регулирующий (тарельчатый) вентиль РТВ1; регулирующий (игольчатый) вентиль РИВ, посредством которого осуществляется плавное дросселирование пара. Открытие и за-



БК — воздухоохлаждаемый конденсатор; КВ — коллектор верхний; КН1, 2 — коллектор нижний; ТМ1, 2 — теплообменный модуль; Н — насос питательной воды; ШК1, ... 14 — шаровый кран; КО — клапан обратный; Ф — фильтр; КЭМ1, 2 — кран электромагнитный; ЭПГ — электропарогенератор; ЭПП — электропароперегреватель; КП — клапан предохранительный; ДРТ — датчик-реле температуры; РТВ1, ... 3 — регулирующий (тарельчатый) вентиль; РИВ — регулирующий (игольчатый) вентиль; СК — сопло калиброванное; МБ — мерный бак; К1, 2 — колено; МН1, ... 4 — манометр; МВ — мановакуумметр; ВМ — вакуумметр; ДМ1, 2 — дифференциальный манометр; ММ1, 2 — микроманометр; Т1, ... 8 — термометр; ТВ — тепловизор; ТПП1, 2 — трубка Пито — Прандтля; ВЗ — воздушный зонд; ЭВ — эжектор водоструйный; В — вентилятор; Р — решетка жалюзийная; ХВС — холодное водоснабжение

транзитом через нижние коллекторы ВК в ко-
на К1 и К2, представляющие собой простейшие
гидрозатворы, а затем — в мерный бак МБ.

Стенд позволяет осуществлять исследование влияния содержания воздуха в паре на тепло-массообмен в ВК. С этой целью в конструкции подводящего к ВК паропровода предусмотрена подача воздуха через калиброванное сопло СК.

на котором имеет место критический перепад давлений. Подача воздуха через калиброванное сопло СК может быть отключена посредством шарового крана ШК8.

Система газоудаления представляет собой совокупность водоструйного эжектора ЭВ различных трубопроводов с запорной арматурой, она предназначена для удаления из ВК несконденсировавшихся газов. Основным элементом этой системы является водоструйный эжектор ЭВ, работающий по разомкнутой схеме без насоса. Подача рабочей воды к эжектору осуществляется по трубопроводу центрального холодного водоснабжения ХВС. Эжектор ЭВ используется как в качестве пускового, так и в качестве основного воздухоудаляющего устройства ВК.

Тракт рабочей воды оснащен двумя шаровыми кранами ШК13 и ШК14, позволяющими осуществлять отключение подачи этой воды на эжектор. Дублирование запорной арматуры (ШК13 и ШК14) связано с необходимостью обеспечения удобства управления подачей рабочей воды при относительно большой протяженности водяного тракта.

Посредством шаровых кранов ШК10, ШК11 и ШК12, которыми оснащен тракт отвода из ВК несконденсировавшихся газов, осуществляется разделение проточной части стенда, находящейся под разрежением, на отдельные, относительно короткие участки, удобные для проверки их герметичности.

Воздух в воздухоохлаждаемой конденсационной установке является вторичным теплоносителем. Его забор осуществляется вне помещения (с улицы). Нагнетание этого воздуха к теплообменным модулям ТМ1 и ТМ2 осуществляется с помощью вентилятора В. Воздушный тракт до вентилятора располагается в помещении лаборатории и представляет собой стальной трубопровод (воздуховод). Установка воздуховода обусловлена необходимостью поддержания постоянного значения температуры вторичного теплоносителя на входе в теплообменные модули ВК.

Для регулирования температуры воздуха, омывающего снаружи поверхности теплообмена ВК, в конструкции воздуховода предусмотрен дополнительный забор воздуха из помещения лаборатории. Этот дополнительный поток воздуха при условии отличия его температуры от температуры воздуха, поступающего в воз-

духовод с улицы, позволяет при образовании воздушной смеси добиваться требуемого значения ее температуры. Регулирование величины расхода этого дополнительно забираемого из помещения лаборатории воздуха осуществляется посредством специальной жалюзийной решетки Р.

С целью устранения неравномерности потока воздуха, поступающего от вентилятора к теплообменным модулям ВК, обусловленной, в частности, влиянием втулки колеса вентилятора, между теплообменными модулями и вентилятором установлены диффузор и сетка.

Для построения рабочих характеристик ВК и водоструйного эжектора, в том числе совмещенных характеристик, а также для выполнения различных экспериментальных исследований предусматривается измерение следующих физических величин (см. рис. 1):

для первичного теплоносителя — статического давления и температуры пара или паровоздушной смеси (ПВС) на входе в ВК (МВ и Т3); перепада давлений пара или ПВС на входе и выходе из теплообменных модулей (ДМ1 и ДМ2); температуры и статического давления пара на входе и выходе из ЭПП (соответственно Т1, Т2, МН3 и МВ); силы и напряжения электрического тока (амперметр и вольтметр на щитах управления ЭПГ и ЭПП на рис. 1 не указаны); барометрического давления и температуры воздуха в помещении лаборатории (барометр и соответствующий электрический термометр сопротивления на рис. 1 не указаны); температуры и объемного расхода конденсата водяного пара (Т4, Т5, МБ);

для поверхности теплообмена — температуры наружных поверхностей стенок трубок теплообменных модулей (ТВ);

для вторичного теплоносителя — динамического давления и температуры воздуха на входе в вентилятор и выходе из теплообменных модулей (ММ1 с ТПП1, Т7, ММ2 с ТПП2 и Т8);

для рабочей воды и несконденсировавшихся газов — статического давления (МН4, ВМ); температуры (Т6).

При этом следует отметить, что контрольно-измерительная аппаратура МН1, МН2, МН3, ДРТ, Т1 и Т2 (см. рис. 1) предназначена для контроля термодинамических параметров пара и является штатной для ЭПГ и ЭПП.

Основные технические характеристики измерительных преобразователей и приборов, используемых в оснащении стенда, приведены в таблице.

Следует отметить, что приборы для измерения давления укомплектованы соответствующей запорной арматурой: манометр МН3 — трехходовым шаровым краном; мановакуумметр МВ, манометр МН2 и вакуумметр ВМ — демпфирующими устройствами и трехходовыми шаровы-

ми кранами; дифференциальные манометры ДМ1, ДМ2 — вентильными блоками.

Для автоматизации и централизации сбора информации с измерительных электрических приборов большинство из них подключены к безбумажным самопишущим регистраторам с *TFT*-дисплеем, имеющим по 18 измерительных каналов. Указанные безбумажные самопишущие регистраторы имеют внутренний и внешний накопители информации. Частота опроса само-

Основные технические характеристики измерительных преобразователей и приборов, используемых в оснащении стенда

Обозначение на схеме	Тип измерительного прибора (преобразователя)	Диапазон измерения, класс точности (допустимая погрешность)	Примечание
1. Преобразование температуры			
T1, T2	Электрический термометр сопротивления медный (ТСМ 50)	–50...+200 °С, класс точности В по ГОСТ Р 8.625–2006	Подключение по трехпроводной схеме
T3, ...T6	Электрический термометр сопротивления платиновый (ТСП 100)	–50...+400 °С, класс точности А по DIN EN60 751	Подключение по трехпроводной схеме
T7	Электрический термометр сопротивления платиновый (ТСП 100)	–50...+400 °С, класс точности А по DIN EN60 751	Подключение по двухпроводной схеме
T8	Электронный контактный термометр	–100...+1800 °С, (±0,15 % +(единица младшего разряда))	Укомплектован воздушным зондом
ТВ	Тепловизор измерительный радиационный	–50...+400 °С, (±2 °С или ±2 %)	Укомплектован тремя сменными объективами. Имеет возможность съемки радиометрического видео
—	Электрический термометр сопротивления платиновый (ТСП 100)	–50...+400 °С, класс точности А по DIN EN60 751	Подключение по трехпроводной схеме
2. Приборы для измерения давления			
МН1	Манометр пружинный	0–1,6 МПа, класс точности 1	Штатный измерительный прибор для ЭПГ
МН2	Манометр электроконтактный	0–10 $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, класс точности 1,5	Штатный измерительный прибор для ЭПГ
МН3	Манометр пружинный	0–10 $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, класс точности 1,5	Штатный измерительный прибор для ЭПП

Окончание табл.

Обозначение на схеме	Тип измерительного прибора (преобразователя)	Диапазон измерения, класс точности (допустимая погрешность)	Примечание
МН4	Манометр пружинный	$0-6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, класс точности 0,4	—
ВМ	Вакууметр пружинный	$0-1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, класс точности 0,4	—
МВ	Мановакууметр электронный	-1 до +10 бар, (<0,1 % верхнего предела измерения)	Работает по пьезорезистивному принципу. Имеет табло для визуализации показаний
ДМ1...2	Дифференциальный манометр электронный	-60 до +60 мбар, (<0,1 % верхнего предела измерения)	Работает по пьезорезистивному принципу. Имеет табло для визуализации показаний
ММ1...2	Микроманометр электронный	-400...+400 мм вод. ст., ($\pm(0,1+0,05P)$)	Совместно с ТПП1, 2 представляет собой комбинированный приемник давления
—	Барометр электрический	30—110 кПа, (± 10 Па)	Образцовый переносной

пишущим регистратором первичных измерительных приборов может достигать 8 Гц. Использование указанной системы сбора информации позволяет исключить необходимость привлечения для этой цели большого числа статистов.

Электрическое и информационное подключение электрических измерительных приборов к безбумажным самопишущим регистраторам осуществляется посредством провода УТР-4-К5Е.

Для указанной на рис. 1 принципиальной схемы стенда, позволяющего осуществлять экспериментальные исследования рабочих процессов в паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсационных установках, была разработана соответствующая компьютерная трехмерная модель, представленная на рис. 2, которая затем была практически реализована в виде уникального стенда [1].

Элементы стенда в соответствии с конструкцией двухъярусного стеллажа 1 размещены на двух высотных отметках — 0 и 2,5 м. На высотной отметке 2,5 метра располагаются электропарогенератор 2, электропароперегреватель 6, воз-

духоохлаждаемый конденсатор 3 и вентилятор 12 с диффузором 14. На нулевой высотной отметке располагаются водоструйный эжектор 9, мерный бак 10 и воздуховод 11.

Паропроизводительность ЭПГ может достигать $170 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$, а температура пара на выходе из него — 160 °С. Электропароперегреватель позволяет осуществлять перегрев водяного пара, поступающего от ЭПГ, до температуры 200 °С.

Конструкция ВК реализована по так называемой одноступенчатой схеме конденсации, которая предполагает: подачу паровоздушной смеси в трубки пучка только из верхнего коллектора; удаление конденсата и несконденсировавшихся газов из нижнего коллектора; нисходящее движение паровоздушной смеси и конденсата.

Обечайка верхнего коллектора 1, представленного на рис. 3, конструктивно оформляется в виде трубы круглого поперечного сечения стандартного сортамента Ду-200 (Ø 219 мм), изготовленной из стали-20 по бесшовной технологии (ГОСТ 8732—78). Эта обечайка с одного торца снабжена фланцем 2 с отверстиями под крепеж для соединения с паропроводом. На дру-



гом торце обечайки 1 приварена заглушка 5. Наряду с этим в обечайке верхнего коллектора предусмотрены два продольных окна прямоугольной формы, предназначенные для распределения пара по теплообменным модулям. Эти окна располагаются в нижней части обечайки симметрично относительно ее вертикальной диаметральной плоскости. В поперечном сечении обечайки угол между осявыми линиями указанных прямоугольных окон составляет 60° . К этим окнам приварены коробки 3, к которым, в свою очередь, приварены фланцы 4, снабженные сквозными отверстиями под крепеж и соответствующими глухими отверстиями под центровочные штифты.

Поверхность теплообмена ВК, скомпонованная из биметаллических трубок с наружным поперечно-винтовым ленточным *L*-образным оребрением, конструктивно оформлена двумя модулями 7 (см. рис. 2). Теплообменный модуль ВК представлен на рис. 4.

Трубный пучок 1 теплообменного модуля состоит из 22 трубок, основные геометрические характеристики которых следующие:

Внутренний диаметр трубки, несущей

оребрение	20,8 мм
Диаметр по основанию ребра	26,8 мм
Средняя толщина ребра	0,47 мм
Высота ребра	14,0 мм
Шаг ребра	3,0 мм
Диаметр по вершине ребра	54,8 мм
Коэффициент оребрения.....	15
Длина поверхности теплообмена трубки	954,5 мм

Порядок расположения трубок в трубных досках — шахматный. Значения поперечного и диагонального абсолютных шагов разбивки трубок в трубных досках равны между собой и составляют 56 мм.

Конструктивное оформление трубных досок 2 позволяет их использовать как фланцы.

Боковые стенки 3 (см. рис. 4) выполнены из листовой стали толщиной 1 мм. Ширина листа равна глубине пучка трубок и составляет 120 мм, а длина листа равна длине трубок (см. табл. 2). К боковым стенкам теплообменного модуля с целью увеличения жесткости его конструкции приварен специальный каркас, выполненный из углового проката. Крепление боковых стенок к трубным доскам теплообменного модуля осуществляется посредством болтов.

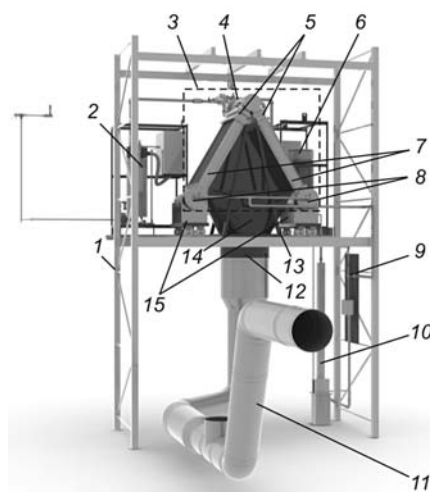


Рис. 2. Компьютерная трехмерная модель станда:

1 — двухъярусный стеллаж; 2 — электропарогенератор; 3 — воздухоохлаждаемый конденсатор; 4 — верхний коллектор ВК; 5 — переходники; 6 — электропароперегреватель; 7 — теплообменные модули ВК; 8 — нижние коллекторы ВК; 9 — водоструйный эжектор; 10 — мерный бак; 11 — воздуховод; 12 — вентилятор; 13 — опорная рама; 14 — диффузор; 15 — опорные тележки

Нижние коллекторы (см. рис. 2) предназначены для приема/отвода конденсата и несконденсировавшихся газов. Обечайка 1 нижнего коллектора ВК, представленного на рис. 5, конструктивно оформляется, как и у верхнего коллектора, в виде трубы круглого поперечного сечения стандартного сортамента $Dy-200$ (219 мм), изготовленной из стали-20 по бесшовной технологии (ГОСТ 8732–78). Эта обечайка

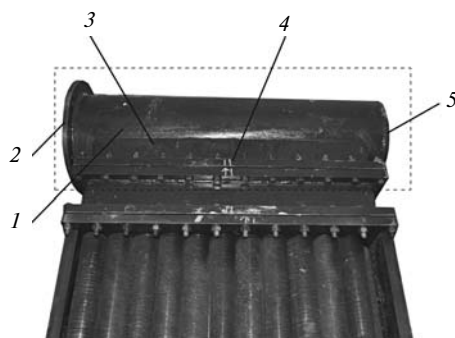


Рис. 3. Верхний коллектор ВК:

1 — обечайка; 2 — фланец трубы; 3 — коробка; 4 — фланцы коробов; 5 — заглушка

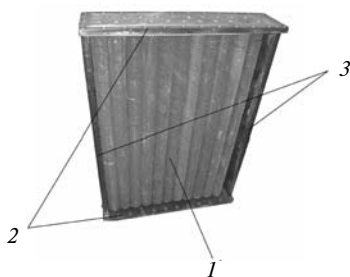


Рис. 4. Теплообменный модуль ВК:

1 — трубный пучок; 2 — трубные доски; 3 — боковые стенки

с одного торца снабжена фланцем 2, имеющим отверстия для болтового крепления к нему съемной заглушки, отсутствующей на рис. 5. С другого торца, как показано на рисунке, к этой трубе приварена заглушка 5.

Внутри нижнего коллектора располагается газовый коллектор, в который поступают несконденсировавшиеся газы. Отвод этих газов из коллектора эжектором осуществляется по специальной трубке, проходящей через отверстие в съемной заглушке.

В обечайке нижнего коллектора выполнено окно прямоугольной формы, предназначенное для приема конденсата и несконденсировавшихся газов, поступающих из теплообменного модуля. Это окно располагается в верхней части обечайки. К указанному окну приварен короб 3, к которому, в свою очередь, приварен фланец 4, снабженный сквозными отверстиями под крепеж и соответствующими глухими отверстиями под центровочные штифты. Конструкция этого короба позволяет реализовать заданный угол наклона обечайки нижнего коллектора в направлении штуцера 6, предназначенного для удаления конденсата водяного пара. Величина этого угла наклона составляет 3° .

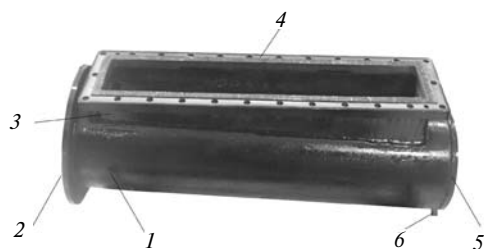


Рис. 5. Нижний коллектор ВК:

1 — обечайка; 2 — фланец трубы; 3 — короб; 4 — фланец короба; 5 — заглушка; 6 — штуцер

Компоновка теплообменных модулей в секции ВК осуществляется в виде шатра.

Для исследования влияния на рабочий процесс ВК, выполненного в виде шатра, такого важного фактора, как угол раскрытия в нем теплообменных модулей, предусмотрено использование специальных устройств — переходников 5 и опорных тележек 15 (см. рис. 2).

Переходники 5 устанавливаются между паровым коллектором 4 и теплообменными модулями 7. Всего имеется два комплекта переходников: базовый — для реализации угла наклона 60° ; дополнительный — для реализации углов наклона 45° и 75° .

Благодаря наличию разъемных соединений теплообменных модулей с переходниками и нижними коллекторами можно осуществлять замену этих модулей на другие, отличающиеся от исходных геометрическими параметрами трубного пучка.

Для уплотнения всех фланцевых соединений применяются паранитовые прокладки.

Фиксирование конструкции ВК осуществляется также посредством опорной рамы 13 (см. рис. 2).

Система газоудаления предусматривает возможность исследования влияния на ее эффективность особенностей конструктивного оформления водоструйного эжектора 9 (см. рис. 2) и пространственного расположения внутри НК газового коллектора.

Нагнетание потока воздуха к теплообменным поверхностям ВК осуществляется осевым вентилятором 12 (см. рис. 2) общего назначения типа ВО-6,3. Мощность электродвигателя этого вентилятора составляет 1,5 кВт, а частота вращения ротора — $1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Конструкция ВК предусматривает максимальное обеспечение расхода охлаждающего воздуха, поступающего от осевого вентилятора к поверхностям теплообмена конденсатора, и соответственно минимизацию непроизводительного расхода этого воздуха в виде утечек путем установки со стороны торцов шатра уплотнительных стенок, выполненных из листов органического стекла.

Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду и обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала паропроводы, верхний и нижние коллекторы ВК, трубки подвода несконденсировавшихся газов к эжектору,



а также трубки отвода конденсата из нижних коллекторов в мерный бак покрыты теплоизоляционным материалом.

Успешное проведение экспериментальных исследований рабочих процессов в паротурбин-

ных воздухоохлаждаемых конденсаторах дает основание полагать, что такой стенд и полученные на нем результаты исследований представляют практический интерес для предприятий и организаций энергомашиностроительного профиля.

УДК 621.365.5

В.Н. Иванов, Д.В. Иванов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ТОКОПОДВОДОВ, ИНДУКТОРА И НАГРЕВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

При разработке технологических процессов, использующих воздействие высокочастотных электромагнитных полей на проводящие материалы, технологическая установка редко рассматривается как единая электромагнитная система, состоящая из элементов (источник питания, токоподводы, конденсаторная батарея, индуктор, нагреваемая заготовка). Обычно, используя разработанные методики, изучают распределение высокочастотного электромагнитного поля в обрабатываемом изделии и индукторе, после этого отдельно — в токоподводах, затем — в других элементах.

При этом не рассматриваются процесс распространения энергии в электромагнитной системе от источника питания к индуктору и детали, а также движение энергии в проводящем материале: от поверхности в глубину, а из глубины к его поверхности и затем в воздушный зазор.

Не разъясняется также, как выбран исследуемый элемент и почему его можно считать отдельно от всей электромагнитной системы. Обычно используются такие интегральные понятия, как активное сопротивление проводника и индуктивное сопротивление, обязанное магнитному потоку, проходящему внутри проводника.

Однако для более глубокого понимания процессов взаимодействия электромагнитного поля и проводников при разработке методик расчета целесообразно исследовать распространение электромагнитной энергии в единой электро-

магнитной системе «источник питания — элементы технологического устройства (подводящие шины) — индуктор — нагреваемая деталь». Следует рассмотреть величины, фазы и направление векторов напряженности магнитного поля (\vec{H}), напряженности электрического поля (\vec{E}) и вектора Умова — Пойнтинга (\vec{S}).

Вектор Умова — Пойнтинга \vec{S} , равный векторному произведению векторов \vec{E} и \vec{H} ($\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$), представляет собой энергию, проходящую в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную его направлению (рис. 1). Размерность этого вектора — мощность на единицу поверхности (Вт/м²).

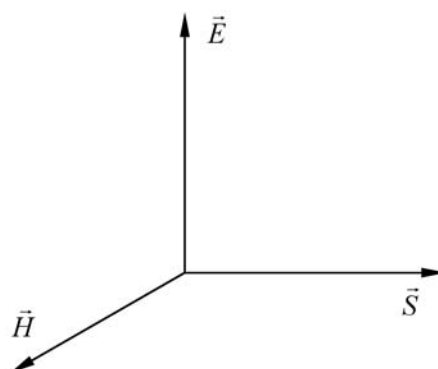


Рис. 1. Направление векторов напряженностей электрического и магнитного полей, а также вектора Умова — Пойнтинга

Для того чтобы исследовать распространение электромагнитной энергии в системе «токоподводы — индуктор — нагреваемая деталь», рассмотрим величины, фазы и направления векторов напряженностей электрического и магнитного полей на различных участках системы, т. е. на поверхностях и внутри шин, индуктора и заготовки, а также в зазорах (рис. 2).

По шинам протекает ток: по верхней шине — от источника питания (слева) к нагрузке-индуктору с металлической заготовкой (справа), по нижней шине — в обратном направлении. На рис. 2 показаны направления векторов \vec{H} и \vec{E} на поверхности шин и в зазоре между ними для произвольного момента времени [1–4].

Вектор напряженности магнитного поля на поверхностях и внутри шин, индуктора и дета-

ли, а также в зазорах между шинами и в зазоре между индуктором и деталью направлен по нормали к чертежу на рис. 2, а, в (вдоль оси z). Учитывая, что имеется только одна его составляющая — H_z , индекс z — опускается.

При этом принимаем допущение, что ширина шин, ширина индуктирующего провода индуктора и длина нагреваемой заготовки много больше зазоров между шинами, а также между индуктором и заготовкой. Принимаем к рассмотрению только среднюю часть шин, индуктора и нагреваемой заготовки, т. е. краевые эффекты не будем учитывать. Это означает, что геометрические размеры системы «шины — индуктор — нагреваемая заготовка» таковы, что напряженности магнитного поля на поверхностях элементов системы и в зазорах одинаковой величины H_{me} .

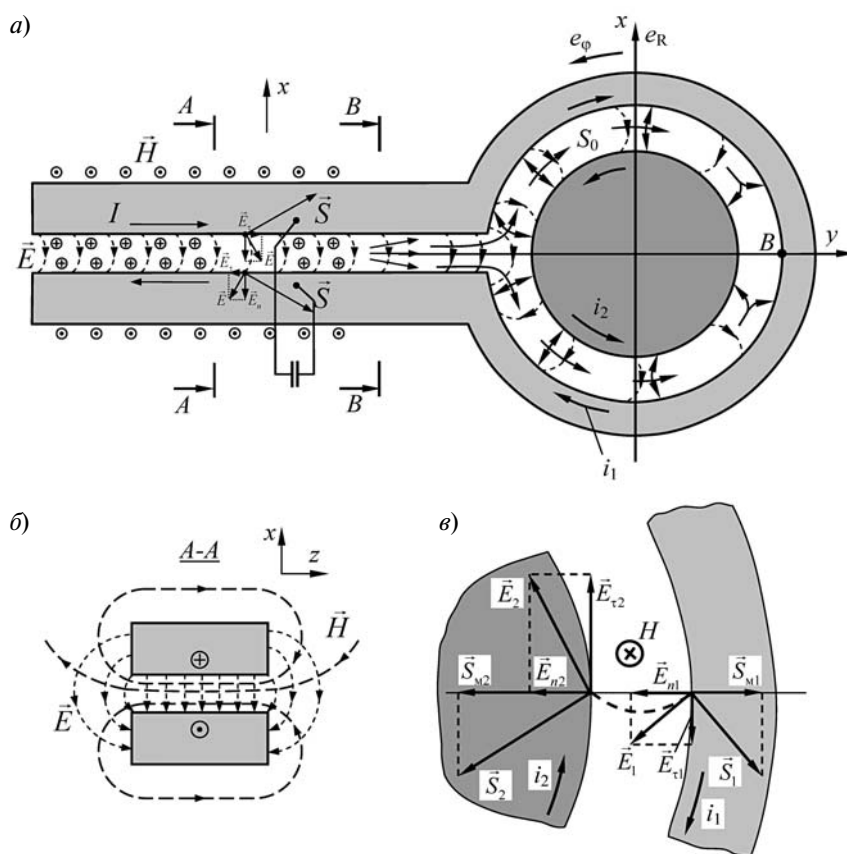


Рис. 2. Направление векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} на поверхности шин, индуктора и нагреваемой детали, а также в зазорах между шинами и между индуктором и деталью (сплошные линии — вектор Умова — Пойнтинга; короткий пунктир — линии напряженности электрического поля в зазоре; длинный пунктир — линии напряженности магнитного поля)



Принимаем также начальную фазу комплексного значения напряженности магнитного поля равной нулю ($\theta_H=0$) и $\dot{H}_{me} = H_{me}$.

При использовании реальных шин (см. рис. 2) на их поверхности со стороны зазора существует нормальная составляющая E_n и касательная составляющая $E_{\tau e} = \rho \times J_{me}$. В зазоре между шинами при принятых допущениях нормальная составляющая E_n одинакова на верхней и нижней шине и в зазоре. Составляющая E_{τ} в зазоре, направленная вдоль шин, по мере удаления от поверхности уменьшается по линейному закону от $E_{\tau e}$ на поверхности до нуля на плоскости симметрии, затем меняет знак и изменяется от нуля до $-E_{\tau e}$ на поверхности другой шины.

Такой же характер имеют распределения нормальной и касательной составляющих напряженностей электрического поля на поверхностях индуктора и нагреваемой детали и в зазоре между ними.

На рис. 2, а показаны векторы напряженностей магнитного и электрического полей, а также вектора Умова — Пойнтинга на поверхностях шин, индуктора, детали и в зазорах (между шинами; между индуктором и деталью).

Очевидно, что в зазорах и на поверхностях шин, индуктора и детали, по которым протекает высокочастотный ток, существует нормальная и касательная составляющие вектора Умова — Пойнтинга. Это значит, что энергия электромагнитного поля распространяется от источника к нагрузке и от наружных поверхностей вглубь материала шин, индуктора и детали.

При этом энергия от источника питания движется по зазору между шинами, ответвляется в материал шин, при подходе к индуктору разветвляется и идет по зазорам между индуктором и деталью до точки В на рис. 2, а, а затем ответвляется в материал индуктора и заготовки.

В материале шин, индуктора и заготовки напряженность магнитного поля \dot{H}_m направлена вдоль оси z и изменяется по закону [1–4]

$$\dot{H}_m = H_{me} e^{-(1+j)x/\Delta}, \quad (1)$$

где x — расстояние от поверхности в материале шин, индуктора или заготовки; Δ — глубина проникновения в проводящий материал шин, индуктора или стальной заготовки. Таким образом, напряженность магнитного поля в проводящем

материале падает по мере удаления от поверхности (увеличения x) с коэффициентом $e^{-x/\Delta}$; фаза напряженности магнитного поля с увеличением x уменьшается на $-x/\Delta$.

Касательная составляющая напряженности электрического поля на поверхности и внутри материала шин, индуктора и заготовки ($x=0$) соответствует уравнению

$$j\rho = \dot{E}_{me\tau} = \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} H_{me} e^{j\pi/4} e^{-(1+j)x/\Delta}. \quad (2)$$

Множитель $e^{j\pi/4}$ означает, что напряженность электрического поля и плотность тока опережают H_{me} на угол $\pi/4$.

Таким образом, по мере удаления от поверхности (с увеличением x) касательная составляющая напряженности электрического поля в проводящем материале уменьшается с коэффициентом $e^{-x/\Delta}$, а фаза напряженности электрического поля уменьшается на x/Δ .

Поскольку обе подводящие шины сделаны из одного и того же материала (медь), то касательные составляющие напряженности электрического поля на поверхностях первой и второй шин равны по величине, но имеют противоположное направление (рис. 2, а). На поверхности же индуктора и стальной нагреваемой детали касательные составляющие напряженности электрического поля также имеют противоположные направления, но $E_{me\tau}$ на поверхности стальной детали существенно выше, чем на

поверхности индуктора: $\dot{E}_{m\tau}^1 = \sqrt{2} \frac{\rho_1}{\Delta_1} H_{me} e^{j\pi/4}$;

$$\dot{E}_{m\tau}^2 = \sqrt{2} \frac{\rho_1}{\Delta_1} H_{me} e^{j\pi/4}.$$

В проводящем материале элементов системы (внутри шин, индуктора и заготовки) нормальная составляющая напряженности электрического поля равна нулю.

Рассмотрим составляющую напряженности электрического поля, нормальную к поверхности шин, в зазоре между шинами:

$$\dot{E}_{mn} = \frac{\dot{V}_m}{2h}, \text{ В/м,}$$

где \dot{V}_m , В, — амплитуда напряжения между шинами в рассматриваемом сечении (например, сечение А-А на рис. 2, а); $2h$, м, — зазор между шинами

Фаза \dot{V}_m , а значит, и \dot{E}_{mn} зависят от удельных сопротивлений материалов элементов системы и зазоров (между шинами; между индуктором и заготовкой). Они могут быть изменены, если индуктивность системы «шины — индуктор — нагреваемая заготовка», определяемую магнитным потоком, проходящим как в проводниках, так и в зазорах системы, полностью или частично компенсировать за счет подключения к шинам конденсаторной батареи.

Анализ электромагнитного поля в системе «шины — индуктор — нагреваемая заготовка» показывает, что на поверхностях шин, индуктора и детали со стороны зазора, по которым протекает высокочастотный ток, а также в зазорах системы существуют нормальная (S_n) и касательная (S_τ) составляющие вектора Умова — Пойнтинга. Внутри же шин, индуктора и детали существуют только составляющие вектора Умова — Пойнтинга, нормальные к поверхностям элементов системы. Это значит, что энергия электромагнитного поля распространяется от источника питания к нагрузке только по зазору между элементами (S_τ) и из зазора от наружных поверхностей вглубь материала элементов системы (S_n).

На шинах из идеального материала отсутствует касательная составляющая вектора \vec{E} ($\rho = 0$ и $E_\tau = 0$), поэтому существует только касательная составляющая вектора \vec{S} — от источника к нагрузке.

На рис. 2 показаны параметры электромагнитного поля в системе для произвольного момента времени на поверхностях шин, индуктора и нагреваемой заготовки и в зазорах [1–4].

Рассмотрим теперь электромагнитные процессы во времени внутри проводящего материала системы «шины — индуктор — нагреваемая заготовка», а также в зазорах (между шинами; между индуктором и заготовкой).

Электромагнитные процессы в проводящем материале системы «шины — индуктор — нагреваемая деталь»

При изменении во времени \vec{H} , \vec{E} и \vec{J} во всех точках проводящей среды системы (в материале шин, индуктора и детали) напряженности электрического поля (а значит, и плотность тока) опережают по фазе напряженности магнитного поля на угол $\pi/4$. Поэтому существу-

ют промежутки времени, когда составляющая E_τ уже изменила знак (направление), а H еще в течение времени $\omega t = \pi/4$ не изменяет знак.

Проследим изменение по величине и направлению векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} во все моменты времени внутри проводящей среды системы.

Рассмотрим сначала изменения направлений и величин составляющих H_e , E_τ и S_n на поверхности проводника в течение двух периодов. Мгновенные значения этих векторов после преобразования выражений (1) и (2) имеют вид

$$\begin{cases} H_e = H_{me} e^{-\frac{x}{\Delta}} \sin\left(\omega t + \theta_n - \frac{x}{\Delta}\right); \\ E_\tau = \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} H_{me} e^{-\frac{x}{\Delta}} \sin\left(\omega t + \theta_n - \frac{x}{\Delta} + \frac{\pi}{4}\right). \end{cases} \quad (3)$$

Мгновенное значение вектора Умова — Пойнтинга равно

$$S_n = \sqrt{2} \frac{\rho}{\Delta} H_{me}^2 e^{-\frac{2x}{\Delta}} \sin\left(\omega t + \theta_n - \frac{x}{\Delta}\right) \times \sin\left(\omega t + \theta_n - \frac{x}{\Delta} + \frac{\pi}{4}\right), \quad (4)$$

где H_{me} — амплитудное значение изменяющейся по синусоидальному закону напряженности магнитного поля на поверхности проводника; θ_n — начальная фаза напряженности магнитного поля (при расчете примем $\theta_n = 0$); H_e — мгновенное значение модуля напряженности магнитного поля на поверхности проводника; $E_{\tau e}$ — мгновенное значение модуля касательной составляющей напряженности электрического поля на поверхности проводника; $S_n = E_{\tau e} H_e$ — мгновенное значение модуля вектора Умова — Пойнтинга.

Рассчитаем изменение во времени H_e , E_τ и S_n внутри материала на поверхности ($x = 0$). При этом имеем в виду, что при положительных значениях $H_e(\tau)$, $E_\tau(\tau)$ и $S_n(\tau)$ векторы этих величин направлены так, как показано на рис. 2, а. В промежутки времени, когда H_e , E_τ и S_n отрицательны, векторы этих величин направлены в противоположную сторону. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Рис. 3 показывает, что в течении периода $\omega t = 2\pi$ существуют промежутки (от $\omega t = 0$ до $\omega t = 3\pi/4$, а также от $\omega t = \pi$ до $\omega t = 7\pi/4$), в которых мгновенные значения H_e и E_τ положитель-



ны и мгновенное значение S_n положительно. Значит, в эти промежутки времени энергия из зазора входит в материал проводников (шины, индуктор и детали).

В промежутки времени от $\omega t = 3\pi/4$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 7\pi/4$ до $\omega t = 2\pi$ величины H_e и E_τ имеют разные знаки, а S_n имеет отрицательное значение. Следовательно, энергия в этот промежуток времени выходит из проводника в зазор.

Ранее было показано, что внутри материала нормальная к поверхности составляющая напряженности электрического поля равна нулю ($E_n = 0$). Значит, и $\vec{S}_\tau = \vec{E}_n \times \vec{H} = 0$.

Были рассчитаны распределения $E_\tau(x)$, $H(x)$ и $\vec{S}_n(x) = \vec{E}_n(x) \times \vec{H}(x)$ по глубине проводящего материала для различных моментов времени, отличающихся на $\Delta t = \frac{\pi}{4\omega}$, т. е. на 1/8 периода колебаний. Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5 и 6.

Из системы уравнений (3) и (4) и кривых на рис. 4 и 5 видно, что $E_\tau(x)$ и $H(x)$ по мере увеличения координаты x меняются по гармоническому закону с амплитудами, уменьшающимися по экспоненциальному закону, [3] с коэффициентом $e^{-\frac{x}{\Delta}}$, т. е. уменьшаются в $e = 2,73$ раза на

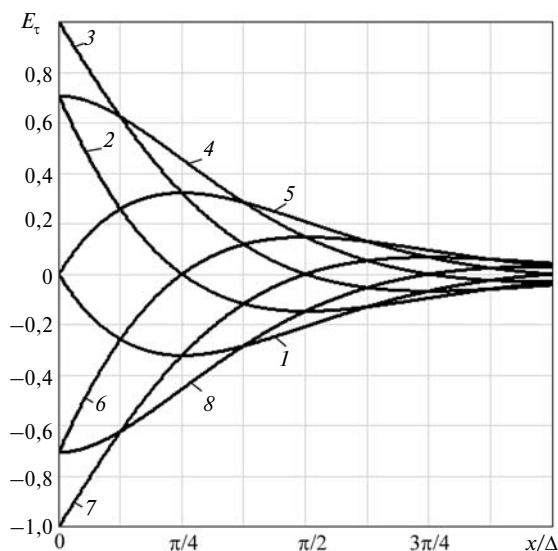


Рис. 4. Распределение мгновенных значений напряженности электрического поля по глубине материала в различные моменты времени ωt : 1 — $-\pi/4$ и $7\pi/4$; 2 — 0 и 2π ; 3 — $\pi/4$; 4 — $\pi/2$; 5 — $3\pi/4$; 6 — π ; 7 — $5\pi/4$; 8 — $3\pi/2$

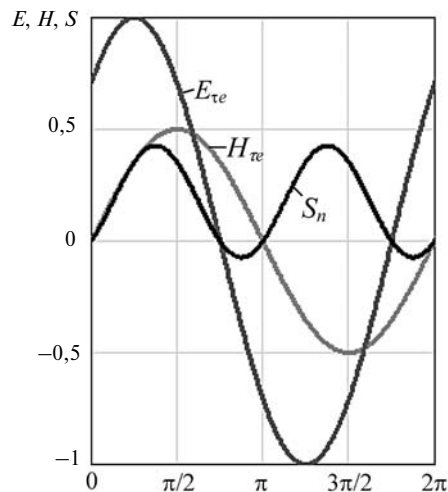


Рис. 3. Изменение мгновенных значений векторов напряженностей электрического и магнитного полей, а также вектора Умова — Пойнтинга во времени на поверхности проводящей среды

глубине $x = \Delta$. Фазы $E_\tau(x)$ и $H(x)$ по мере увеличения x уменьшаются на $-x/\Delta$ радиан, т. е. на глубине Δ уменьшаются на один радиан.

Интервал между точками изменения знака $E_\tau(x)$ и $H(x)$ равен $x/\Delta = \pi$, т. е. половине длины волны $\lambda/2 = \pi\Delta$.

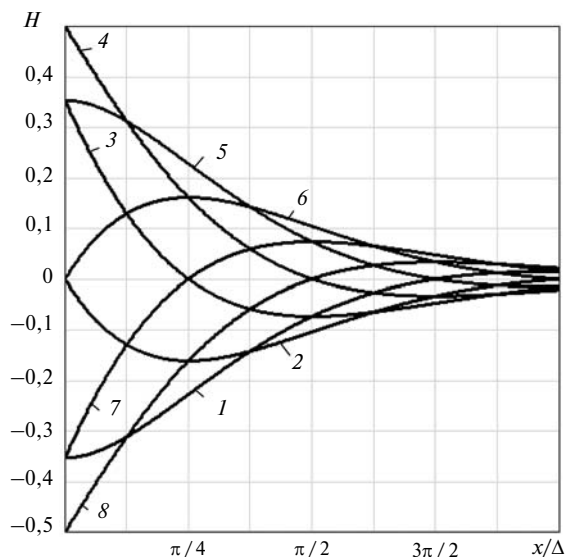


Рис. 5. Распределение мгновенных значений векторов напряженности магнитного поля по глубине материала в различные моменты времени ωt : 1 — $-\pi/4$ и $7\pi/4$; 2 — 0 и 2π ; 3 — $\pi/4$; 4 — $\pi/2$; 5 — $3\pi/4$; 6 — π ; 7 — $5\pi/4$; 8 — $3\pi/2$

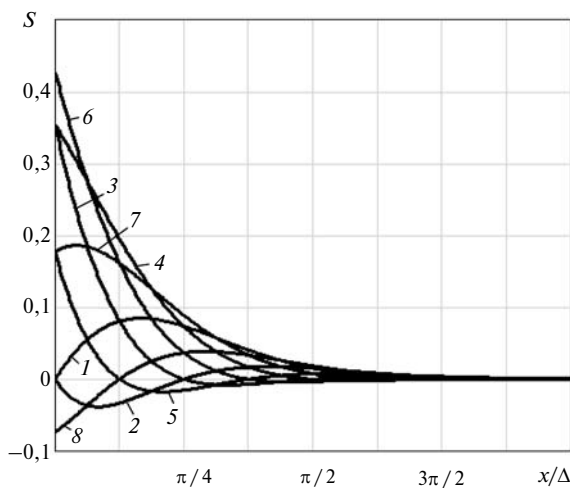


Рис. 6. Распределение мгновенных значений вектора Умова — Пойнтинга по глубине материала в различные моменты времени ωt :

1 — $-\pi/4, 3\pi/4$ и $7\pi/4$; 2 — $0, \pi$ и 2π ; 3 — $\pi/4$ и $5\pi/4$; 4 — $\pi/2$ и $3\pi/4$; 5 — $\pi/8$ и $9\pi/8$; 6 — $3\pi/8$; 7 — $5\pi/8$; 8 — $7\pi/8$

Сложнее изменяется с увеличением глубины x значение S_n вектора Умова — Пойнтинга (рис. 6). Поскольку E_t всегда в любой точке опережает H на $\pi/4$ радиан, т. е. на $1/8$ периода T , вектор Умова — Пойнтинга в слое толщиной $\lambda = 2\pi\Delta$ на двух участках глубиной $x/\Delta = 3\pi/4$ имеет положительное значение (то есть на этих участках энергия движется от поверхности в глубину материала) и на двух участках глубиной $x/\Delta = \pi/4$ имеет отрицательное значение (на этих участках энергия движется к поверхности шин). Величина S_n по мере увеличения глубины x уменьшается по экспоненциальному закону $e^{-\frac{2x}{\Delta}}$, т. е. на глубине $x = \Delta$ уменьшается в $e^2 = 2,72^2 = 7,3875$ раза.

Скорости распространения электромагнитной энергии в материале, движения положительных и отрицательных импульсов и уменьшения фазы равны*

$$v = \frac{\lambda}{T} = 2\pi\Delta f = \sqrt{\frac{2\pi f 2\rho}{\mu\mu_0}} = \sqrt{\frac{f\rho}{\mu 10^{-7}}} \text{ м/с} =$$

* Значения скоростей для стали при $T = 800^\circ\text{C}$ и меди при $T = 20^\circ\text{C}$: для стали при $f = 10$ кГц $u = 316,23$ м/с, а при $f = 440$ кГц будет $u = 2097,95$ м/с; для меди при $f = 10$ кГц — $u = 42,43$ м/с и при $f = 440$ кГц — $u = 281,425$ м/с.

$$= 3162,27766 \sqrt{\frac{f\rho}{\mu}} \text{ м/с.}$$

Средняя плотность потока мощности $S_{n\text{ср}}$ в любой точке x равна удельной мощности $P_0(x)$:

$$S_{n\text{ср}}(x) = p_0(x) = \frac{\rho}{\Delta} H_{me}^2 e^{-\frac{2x}{\Delta}} =$$

$$= p_{0(x=0)} e^{-\frac{2x}{\Delta}}, \text{ Вт/м}^2,$$

где $p_0 = H \frac{\rho}{\Delta_{me}}$ — удельная мощность на поверхности проводящей среды.

Электромагнитные процессы в зазорах между шинами, а также между индуктором и деталью

Как ранее отмечалось, поскольку обе подводящие шины сделаны из одного и того же материала (медь), то касательные составляющие напряженности электрического поля на поверхностях шин равны по величине, но имеют разные направления.

Касательная же составляющая напряженности электрического поля на поверхности нагреваемой заготовки при равных значениях напряженности магнитного поля на поверхности индуктора и заготовки ($H_{me1} = H_{me2}$) существенно больше, чем на поверхности индуктора [4]:

$$\frac{E_{\tau 2}}{E_{\tau 1}} = \frac{E_{me2}}{E_{me1}} = \frac{\sqrt{2}(\rho_2/\Delta_2)H_{me}}{\sqrt{2}(\rho_1/\Delta_1)H_{me}} = \sqrt{\frac{\rho_2\mu_2}{\rho_1}}.$$

У стальной заготовки в начале нагрева (холодный режим) удельное сопротивление стали $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Кроме того, принимаем $\mu_2 = 16$; удельное сопротивление меди $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Для этого периода $E_{\tau 2}/E_{\tau 1} = 12,65$. Для горячего режима ($\rho_2 = 10^{-6}$ Ом·м) получается $E_{\tau 2}/E_{\tau 1} = 0,07$. Поэтому нормальная составляющая S_{n2} вектора Умова — Пойнтинга на поверхности нагреваемой детали значительно больше S_{n1} на поверхности индуктора. Это полностью соответствует тому, что известно: энергия, входящая из зазора в деталь, существенно больше, чем входящая в медь индуктора.

Рассмотрим также изменения во времени (см. рис. 2) векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} в зазоре между шинами и на поверхности шин со стороны зазора, где кроме касательной составляющей E_t

имеется нормальная составляющая E_n . Модуль нормальной составляющей равен

$$E_n = \frac{V_{\text{ш}}}{2h} = \frac{I_{\text{ш}}(z_{\text{ш}} + z_{\text{и}})}{2h}, \text{ В/м,}$$

где $V_{\text{ш}}$, В, — напряжение (разность потенциалов) между шинами в рассматриваемом сечении; $2h$, м, — зазор между шинами; $I_{\text{ш}}$, А, — амплитуда тока шин (при достаточно широких шинах и малом зазоре $I_{\text{ш}} = aH_{\text{ме}}$, где a — ширина шин; при этом ток совпадает по фазе с $H_{\text{ме}}$); $z_{\text{ш}} = r_{\text{ш}} + j(x_{\text{мш}} + x_{\text{сш}})$ — полное электрическое сопротивление шин; $z_{\text{и}} = (r_1 + r_2) + j(x_{1\text{м}} + x_{\text{с}} + x_{2\text{м}})$ — полное электрическое сопротивление индуктора; $r_{\text{ш}}$, r_1 и r_2 — активное сопротивление шин, индуктора и заготовки; $x_{\text{мш}}$, $x_{\text{сш}}$ — индуктивное сопротивление шин, определяемое магнитными потоками внутри материала шин и в зазоре между ними; $x_{1\text{м}}$, $x_{2\text{м}}$ и $x_{\text{с}}$ — индуктивные сопротивления, определяемые магнитным потоком внутри металла индуктора, внутри нагреваемой заготовки и в зазоре между индуктором и нагреваемой заготовкой.

Очевидно, что величина E_n зависит от тока шин $I_{\text{ш}}$, зазора между шинами и эквивалентного полного электрического сопротивления шин и индуктора, а фаза E_n определяется cosφ нагрузки и схемой подключения конденсаторной батареи для компенсации индуктивного сопротивления нагрузки. Касательная составляющая E_{τ} на поверхности шин опережает по фазе H_e на $\pi/4$. Напряженность электрического поля на поверхности шины в зазоре определяется как векторная сумма: $\vec{E}_e = \vec{E}_n + \vec{E}_{\tau}$. При этом возможны следующие варианты:

Вариант 1. Рассматриваются мгновенные значения векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} в сечении $A-A$ на рис. 2. Конденсаторная батарея подключена непосредственно после сечения и полностью компенсирует индуктивность, определяемую магнитным потоком, проходящим через материал шин, индуктора, заготовки и зазор между ними.

Вариант 2. Рассматриваются мгновенные значения векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} в сечении $A-A$ на рис. 2. Конденсаторная батарея подключается непосредственно после сечения $A-A$, но компенсирует только часть индуктивного сопротивления шин и индуктора, определяемую магнитным потоком в воздушных зазорах между шинами и между ин-

дуктором и деталью (нормальная составляющая E_n на поверхности шин совпадает по фазе с E_{τ}).

Вариант 3. Рассматриваются мгновенные значения \vec{H} , \vec{E} и \vec{S} в сечении $B-B$ на рис. 2. Конденсаторная батарея подключена слева от рассматриваемого сечения $B-B$. Через сечение $B-B$ проходит полный ток, включающий активную и индуктивную составляющие тока нагрузки.

Рассмотрим направления мгновенных значений вектора \vec{H} и составляющих E_n и E_{τ} в характерные промежутки времени на поверхности проводника шин, а также рассмотрим распространение энергии в зазоре между шинами для трех вариантов подключения конденсаторной батареи.

На рис. 7 показаны мгновенные значения и направления векторов \vec{H}_e , \vec{E}_{τ} и \vec{S} в характерные промежутки времени на поверхности проводника из реального ($\rho \neq 0$) материала для трех вариантов*:

1. Конденсаторная батарея подключена непосредственно после сечения $A-A$ (см. рис. 2) (в котором рассматриваются направления векторов \vec{H} , \vec{E} и \vec{S}) и полностью компенсирует индуктивность, определяемую магнитным потоком через материал шин, индуктора, заготовки, а также через зазор. Это означает, что через сечение проходит активный ток и E_n совпадает по фазе с H_e , поскольку ток шины совпадает по фазе с напряженностью магнитного поля на поверхности шины (рис. 7, а и б).

В этом случае (рис. 7, а) для промежутка времени от 0 до $\omega t = \pi$ H_e и E_n и, значит, вектор Умова — Пойнтинга S_{τ} положительны. В момент времени $\omega t = \pi$ величины H_e и E_e одновременно меняют знак на обратный, т. е. в промежуток времени от $\omega t = \pi$ до момента времени $\omega t = 2\pi$ H_e и E_n отрицательны, значит, S_{τ} — положителен. Таким образом, при полной компенсации индуктивного сопротивления шин и индуктора в рассматриваемом сечении $A-A$ вектор $S_{\tau} > 0$ и энергия в этом сечении пульсирует, но проходит только в направлении от источника пита-

* Необходимо иметь в виду, что на поверхности проводников из идеального материала отсутствует касательная составляющая векторов E ($E_{\tau} = \rho J = 0$). Отсутствует также нормальная составляющая вектора Умова — Пойнтинга ($\vec{S}_n = \vec{E}_{\tau} \vec{H} = 0$), т. е. энергия в идеальный проводник не входит, но движется по воздушному зазору.

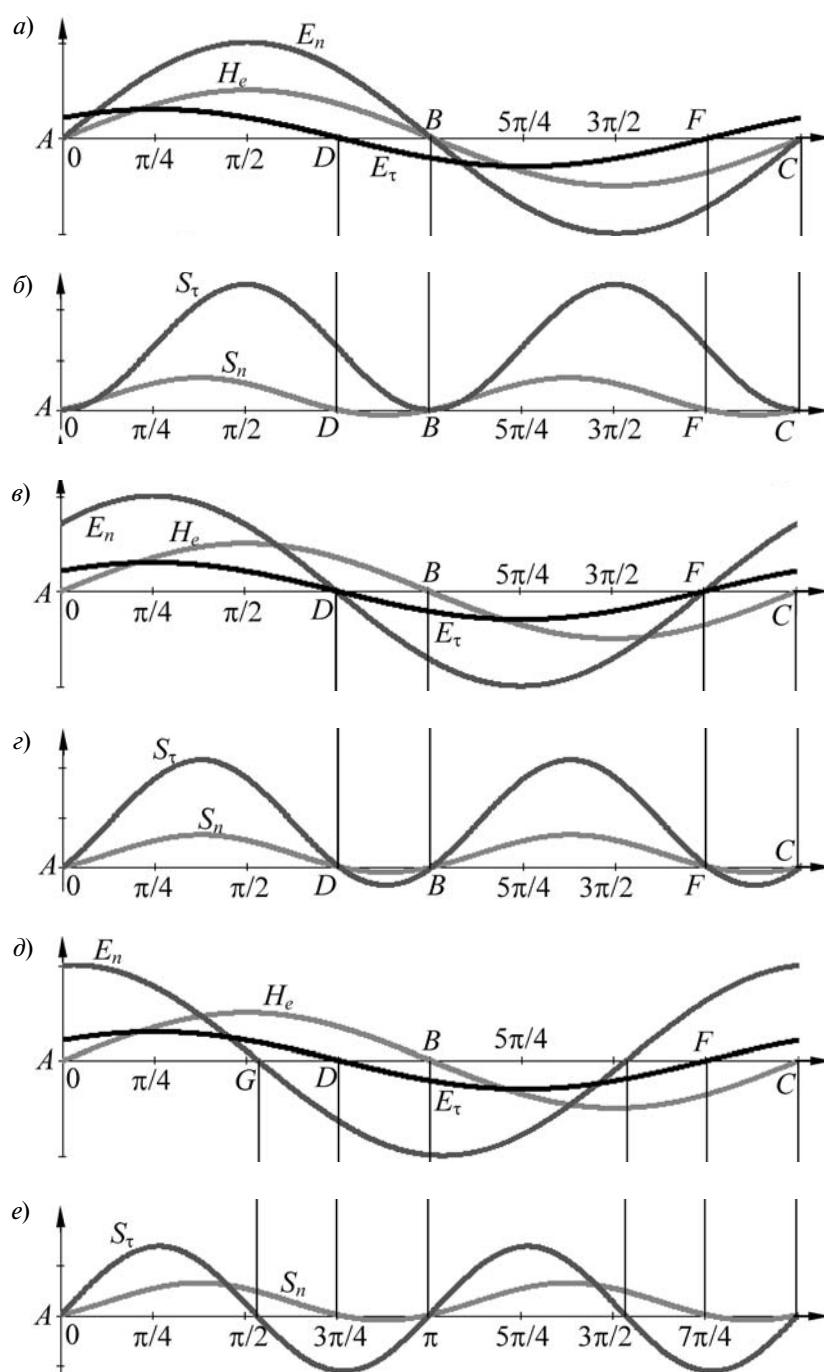


Рис. 7. Изменение во времени мгновенных значений напряженностей магнитного поля (H_e) и составляющих электрического поля (E_τ и E_n), а также составляющих S_τ и S_n вектора Умова — Пойнтинга на поверхности шины со стороны зазора в сечениях A-A и B-B (рис. 2):

a, в, д — E_τ , E_n и H_e ; б, г, е — составляющие S_τ и S_n вектора Умова — Пойнтинга; в сечении A-A при полной (a, б) и частичной (в, г) компенсации индуктивности системы «шины — индуктор — заготовка» и в сечении B-B без компенсации индуктивности (д, е)



ния к нагрузке (к нагрузочному контуру) в течение всего времени работы (рис. 7, б).

Для этого же случая касательная составляющая на поверхности шин E_τ опережает H_e на $\pi/4$, H_e и E_τ положительны для промежутков от $\omega t = 0$ (точка А) до $\omega t = 3\pi/4$ (точка D на рис. 7, а) и отрицательны для промежутка от $\omega t = \pi$ (точка В) до $\omega t = 7\pi/4$ (точка F). В эти промежутки времени вектор Умова — Пойнтинга положителен, и, значит, энергия входит в материал шин, распространяется и частично выделяется в нем.

Для промежутков от $\omega t = 3\pi/4$ (точка D) до $\omega t = \pi$ (точка В) и от $\omega t = 7\pi/4$ (точка F) до $\omega t = 2\pi$ H_e и E_τ имеют разные знаки, поэтому вектор Умова — Пойнтинга S_n отрицателен, и энергия выходит из материала шин в зазор (рис. 7, б).

2. Конденсаторная батарея подключается непосредственно после сечения А-А, но компенсирует только часть индуктивного сопротивления шин и индуктора, определяемую магнитным потоком в воздушном зазоре между шинами и между индуктором и деталью ($1/\omega C_1 = x_{ш} + x_{ин}$). Нормальная составляющая E_n на поверхности шин совпадает по фазе с E_τ (рис. 7, в). В этом случае E_n и E_τ опережает H_e на угол $\pi/4$. На рис. 7, г видно, что в течение промежутков времени от $\omega t = 0$ до $\omega t = 3\pi/4$, а также от $\omega t = \pi$ до $\omega t = 7\pi/4$ мгновенные значения H_e , E_τ и E_n имеют одинаковый знак, а составляющие S_τ и S_n положительны (рис. 7, г). Значит, в эти промежутки времени энергия в зазоре между шинами проходит через сечение А-А от источника к нагрузке и входит в материал шин. В промежутки же от $\omega t = 3\pi/4$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 7\pi/4$ до $\omega t = 2\pi$ H_e и E_τ , а также H_e и E_n имеют разные знаки, и энергия через сечение А-А идет от нагрузки к источнику; в то же время выходит из материала часть энергии, которая вошла в материал, но не выделилась в нем.

3. Конденсаторная батарея подключена слева от рассматриваемого сечения В-В (см. на рис. 2). Через сечение В-В проходит полный ток, включающий активную и индуктивную составляющие тока нагрузки. В этом случае напряжение $U_{ш}$ на шинах в сечении В-В и E_n должны опережать $I_{ш}$ и H_e на угол φ , определяемый выражением $\cos \varphi = \frac{r_{ш+и}}{z_{ш+и}}$, где $r_{ш+и}$ — активное сопротивление шин и индуктора с заготовкой, $z_{ш+и}$ — полное сопротивление шин и индуктора с заготовкой.

На рис. 7, д видно, что в промежутки от $\omega t = 0$ до $\omega t = \pi - \varphi$ и от $\omega t = \pi$ до $\omega t = 2\pi - \varphi$ мгновенные составляющие величины H_e , E_τ и E_n имеют один знак, а составляющие S_τ и S_n (рис. 7, е) положительны: энергия проходит через сечение А-А по зазору от источника питания к нагрузке. В этот же промежуток времени энергия из зазора входит в материал шин. В промежутки же от $\omega t = 2\pi - \varphi$ до $\omega t = 3\pi/4$ и от $\omega t = 2\pi - \varphi$ до $\omega t = 7\pi/4$ составляющие H_e и E_n имеют разные знаки, а S_τ имеет отрицательное значение, и через сечение В-В в зазоре между шинами энергия проходит от нагрузки к источнику питания и конденсаторной батарее. В этот же промежуток времени H_e и E_τ имеют одинаковые знаки, значит, S_n — положительна, а энергия из зазора продолжает поступать в материал шин (рис. 7, е).

В промежутки же от $\omega t = 3\pi/4$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 7\pi/4$ до $\omega t = 2\pi$ H_e и E_n имеют разные знаки. В этот промежуток времени энергия в зазоре продолжает двигаться от нагрузки к источнику и конденсаторной батарее, но и из материала шин выходит в зазор.

Таким образом, если нагрузка представляет собой нагрузочный контур, где индуктивное сопротивление полностью компенсировано емкостным и контур имеет активное сопротивление в зазоре между подводящими к контуру шинами, энергия в любой момент времени движется к контуру.

Уровень энергии не постоянен по величине, но направление — только от источника питания к контуру.

Внутри же нагрузочного контура (сечение В-В на шинах, соединяющих нагрузку и конденсаторную батарею) существуют промежутки времени, когда энергия движется от источника питания и конденсаторной батареи к нагрузке, и промежутки времени, когда энергия движется от нагрузки к конденсаторной батарее и источнику питания. Если конденсаторная батарея не полностью компенсирует индуктивность нагрузки, то часть энергии возвращается к источнику питания и частично поглощается источником.

При этом энергия из материала (шин, индуктора и заготовки) выходит в течение промежутка от $\omega t = 3\pi/4$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 7\pi/4$ до $\omega t = 2\pi$, а в зазоре энергия продолжает двигаться от нагрузки в сторону конденсаторной батареи и источника.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Рассмотрено распространение высокочастотной электромагнитной энергии в системе «токоподводящие шины — индуктор — нагреваемая заготовка».

2. Электромагнитная энергия распространяется от источника питания к нагрузке — системе «шины — индуктор — нагреваемая заготовка» по воздушному зазору и постепенно ответвляется, входит в материал шин, индуктора и нагреваемой заготовки.

Рассмотрены два случая в зависимости от того, на каком участке шин рассматривается распространение энергии: на шинах, подводящих ток к нагрузочному контуру, и на шинах внутри нагрузочного контура.

В первом случае, когда емкость конденсаторной батареи полностью компенсирует индуктивное сопротивление системы, мощность в зазоре между шинами изменяется в зависимости от времени пульсациями, но движется только от источника питания к нагрузке.

Во втором случае в промежутке от $\omega t = 0$ до $\omega t = \pi - \varphi$ и от $\omega t = \pi$ до $\omega t = \pi - \varphi$ мгновенные значения H_e и E_e имеют одинаковый знак и энергия проходит по зазору от источника питания к индуктору и заготовке (к точке B на рис. 2). В промежутки же времени от $\omega t = \pi - \varphi$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 2\pi - \varphi$ до $\omega t = 2\pi$ H_e и E_e имеют разные знаки, а S_τ — отрицательное значение, и энергия проходит от нагрузки к источнику питания.

Скорость распространения энергии (в воздухе) весьма высока (скорость света), поэтому фазы H_e , E_e и S в зазоре между шинами и в зазоре между индуктором и заготовкой, а также на поверхности шин, индуктора и нагреваемой заготовки одинаковы.

3. Для зазора между шинами и зазора между индуктором и заготовкой в промежутки от $\omega t = 0$

до $\omega t = 3\pi/4$ и от $\omega t = \pi$ до $\omega t = 7\pi/4$ мгновенные значения H_e и E_e положительны и энергия электромагнитного поля входит в материал шин, индуктора и нагреваемой заготовки. В промежутки от $\omega t = 3\pi/4$ до $\omega t = \pi$ и от $\omega t = 7\pi/4$ до $\omega t = 2\pi$ энергия выходит из материала в зазор.

4. Внутри материала шин индуктора и заготовки значения $E(x)$ и $H(x)$ по мере увеличения координаты x меняются по гармоническому за-

кону с коэффициентом $e^{-\frac{x}{\Delta}}$, т. е. уменьшаются в 2,72 раза на глубине $x = \Delta$. Фазы $E(x)$ и $H(x)$ по мере увеличения x уменьшаются на $\frac{x}{\Delta}$ радиан, т. е. на глубине $x = \Delta$ фаза уменьшается на 1 радиан.

5. Значение вектора Умова — Пойнтинга S_n внутри материала уменьшается по мере увели-

чения x с коэффициентом $e^{-\frac{2x}{\Delta}}$, т. е. на глубине $x = \Delta$ S_n уменьшается в $e^2 = 2,718^2 = 7,3875$ раза.

6. В отличие от распространения электромагнитной волны в воздухе, фазы H , E и S по мере распространения в материал шин, индуктора и заготовки с увеличением x уменьшаются на $\frac{x}{\Delta}$, т. е. на глубине $x = \Delta$ уменьшаются на 1 радиан; фаза же S на глубине $x = \Delta$ уменьшается на 2 радиана. Скорость распространения электромагнитной волны в материале равна

$$v = 2\pi\Delta f = 3162,27766 \sqrt{\frac{f\rho}{\mu}} \text{ м/с.}$$

7. Существует промежуток — от $\omega t = \pi - \varphi$ до $\omega t = 3\pi/4$, когда вектор Умова — Пойнтинга \vec{S}_τ уже изменил знак и энергия уже возвращается от нагрузки к источнику питания и конденсаторной батарее, а \vec{S}_n все еще положителен и энергия движется от поверхности шин, индуктора и нагреваемой заготовки в глубину материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шимони, К. Теоретическая электротехника [Текст] / К. Шимони / Пер. с нем. под ред. проф. К.М. Поливанова. — М.: Мир, 1964. — 775 с; ил.
2. Калантаров, П.Л. Теоретические основы электротехники [Текст] / П.Л. Калантаров, Л.Р. Нейман. — Л.-М.: Госэнергоиздат, 1951 — 464 с; ил.
3. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева [Текст] / В.С. Немков, В.Б. Демидович. — Л.: Энергоиздат. Ленинг. отделение, 1988. — 280 с; ил.

4. Иванов, В.Н. Индукционный нагрев металлов. Теория и практика [Текст]: Учеб. пособие для вузов по направлению подгот. «Техн. физика» / В.Н. Иванов, В.Я. Фролов, Д.В. Иванов / СПбГПУ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 360 с.



УДК 621.316.9

А.В. Зайцев, В.Н. Костин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Эффективное противоаварийное управление энергорайонами потенциального выделения возможно лишь при наличии централизованной многоуровневой автоматизированной системы противоаварийной автоматики. На высшем уровне в режиме реального времени осуществляется сбор и обработка информации о параметрах режима и формирование управляющих воздействий на изменение направления действия или уставок локальных автоматик низшего уровня.

Для обеспечения эффективности действия автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ) при аварийном выделении энергорайона с избытком генерации необходима следующая информация:

- схема сети района;

- состав генерирующего оборудования и его характеристики по возможностям регулирования частоты и мощности;

- величина генерации электростанций района;

- величина нагрузки района.

Переработка указанной информации должна проводиться в темпе реального времени. Автоматизация этого процесса обеспечит принятие обоснованных решений по выбору уставок и направления действия АОПЧ и, соответственно, повысит надежность электроснабжения потребителей.

Ленинградским РДУ — филиалом ОАО «СО ЕЭС» — планируется осуществить разработку программного комплекса (ПК) «Система контроля эффективности действия АОПЧ» для мониторинга текущей генерации и потребления во всех районах потенциального выделения в энергосистеме Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Информация о схеме электрической сети района потенциального выделения может быть получена достаточно точно с помощью существующей системы телеизмерений (ТИ) и имеющихся в распоряжении диспетчера программных средств, например ПК «Заявка».

Следует отметить, что, несмотря на сохраняющуюся общую недостаточность наблюдаемости параметров режима работы энергосистемы, в условиях развивающегося рынка электроэнергетики и мощности режим работы электростанций, состав генерирующего оборудования и текущая генерация каждого из генераторов станции в достаточной мере фиксируются средствами телеизмерений и передаются по выделенным каналам.

Таким образом, данные о величине мощности генераторов, остающихся в выделившемся районе, могут использоваться в разрабатываемом ПК «Система контроля эффективности действия АОПЧ», благодаря созданию интерфейса для одной из подпрограмм оперативно-информационного комплекса (ОИК).

Состав и характеристики генерирующего оборудования определяют возможность изменения величины генерации после выделения энергорайона за счет:

- регулирования мощности энергоблоков (агрегаты ТЭС, участвующие в регулировании частоты);

- отключения энергоблоков (агрегаты ГЭС и ГТУ, переходный процесс регулирования мощности которых имеет большую постоянную времени);

- разгрузки энергоблоков (агрегаты КЭС, оснащенные автоматической системой аварийной разгрузки блоков).

Определение текущей нагрузки энергорайона осуществляется с помощью телеизмерений генерации $P_{\Gamma}(t)$ и перетоков мощности $P_{\text{св}}(t)$ по элементам связи с энергосистемой:

$$P_{\text{нагр р-на}}(t) = P_{\Gamma}(t) + P_{\text{св}}(t).$$

С учетом незначительного изменения нагрузки внутри шага квантирования по времени (до 10 минут) получаемые данные вполне достаточны для получения объективной оценки нагрузки района.

Полученные данные по нагрузке экспортируются из ОИК в ПК «Система контроля эффективности действия АОПЧ».

Для районов или части районов, не оснащенных вообще или в достаточной мере средствами телеизмерений, следует использовать данные о нагрузках, полученные по результатам контрольных замеров, выполняемых два раза в год (в июне и декабре). В связи с этим достоверная оценка величины нагрузки в таких районах — весьма актуальная и трудоемкая задача, требующая решения в режиме реального времени.

Поскольку данные нагрузок в дни проведения контрольных замеров получают ежечасно, для каждой подстанции района формируется следующий массив значений нагрузок:

	Дата контрольного замера						
Час	0	1	2	23	24
$P_{нi}$, МВт	$P_{н0}$	$P_{н1}$	$P_{н2}$	$P_{н23}$	$P_{н24}$

На базе таких массивов определяется нагрузка района потенциального выделения $P_{нагр\ p-на}(t)$ в дни контрольных замеров. Для расчета нагрузки района в произвольный день месяца и час суток целесообразно использовать методы интерполяции функции $P_{нагр\ p-на}(t)$. В частности, целесообразно использовать интерполяцию сплайнами, как быстрый, эффективный и устойчивый способ интерполяции функций [3].

На основании данных о текущей нагрузке $P_{нагр\ p-на}(t)$ и генерации $P_g(t)$, составе генерирующего оборудования, его типе и технических характеристик нетрудно сделать вывод о сбалансированности района потенциального выделения. Комплексный анализ состояния схемы и сбалансированности района выделения позволит получить информацию о необходимости изменения уставок или ввода/вывода локальных АОПЧ в режиме реального времени.

Районы потенциального выделения. Энергосистема Санкт-Петербурга и Ленинградской области включает в себя следующие районы и электростанции потенциального выделения на изолированную работу действием частотной делительной автоматики (ЧДА):

район Севера, в том числе Выборгская ТЭЦ (ТЭЦ-17), Северная ТЭЦ (ТЭЦ-21);

район Юга, в том числе Юго-Западная ТЭЦ, Василеостровская ТЭЦ (ТЭЦ-7), Первомайская ТЭЦ (ТЭЦ-14), Авто́вская 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 схем районов потенциального выделения должны осуществляться в графическом редакторе Microsoft Visio, использующем векторную графику. На схемах достаточно отражать только основное оборудование: генераторы электростанций, линии электропередач, трансформаторы и выключатели. Графические обозначения всех элементов схем должны соответствовать действующим ГОСТ. Кроме того, в соответствии со стандартом ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007—29.240.10.035—2009 все условные графические обозначения линий электропередачи, электрооборудования объектов, а также электрические соединения между ними в соответствии с классом напряжения должны выделяться цветом и иметь определенные тип и толщину линий.

Включенное/отключенное положение динамических элементов (силовые выключатели) должно быть отображено на электрической схеме цветовой индикацией в соответствии с требуемой 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 должны формироваться на основе данных телеизмерений ОИК «Монитор Электрик» с настраиваемой периодичностью. Минимальную периодичность следует принять не более 1 мин. [4].

Массив исходных данных о величине нагрузки районов должен формироваться двумя различными способами:

расчетом сальдо между генерацией и потоками активной мощности по внешним связям районов потенциального выделения;



интерполяцией данных ежегодных контрольных замеров нагрузки, проводимых не менее двух раз в год (в июне и декабре).

Основное содержание работ. Разработка интерфейса пользователя, позволяющего в удобной форме осуществить контроль эффективности действия АОПЧ в режиме реального времени, должна включать в себя:

- главное меню пользователя;

- информационные файлы второго уровня.

Главное меню должно обеспечивать:

- световую сигнализацию об условиях эффективности работы АОПЧ;

- доступ к информационным файлам второго уровня, отражающим топологию сети района потенциального выделения электростанций с графическим представлением данных;

- возможность изменения направления действия АОПЧ (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 каждого элемента текущих значений потоков мощности;

- графическую информацию об изменении величины генерируемой мощности, величине мощности нагрузки с периодичностью 1 мин;

- графическое отображение временных интервалов, для которых необходимо изменять уставки или направление действия локальных АОПЧ.

Требования к ПК как к программному продукту. ПК должен быть разработан как web-приложение, обеспечивать регулярную загрузку данных из ОИК с настраиваемой периодичностью, быть совместимым с операционными системами и базами данных.

Серверная часть ПО 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 сервера СУБД MS 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 обеспечивать наличие в сети разделяемой файловой области на любом закрытом файловом 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 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 для автоматического режима загрузки. Также должна присутствовать возможность ручного принудительного запуска загрузки данных из ОИК.

Для доступа к ПК с любого компьютера должно быть разработано web-приложение, устанавливаемое 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 и установлен браузер, через который они и будут работать. Пользователю выдается логин и пароль, посредством которых обеспечивается авторизация.

Принципиальная схема взаимодействия между различными частями (модулями) комплекса представлена на рисунке.

Заключение

Разработана структура автоматизированной системы контроля эффективности действия АОПЧ для восстановления баланса мощности в районах потенциального выделения с избытком генерации, учитывающая характеристики генерирующего оборудования и позволяющей изменять уставки и направление действия локальной противоаварийной автоматики в режиме реального времени. Оценка текущих значе-

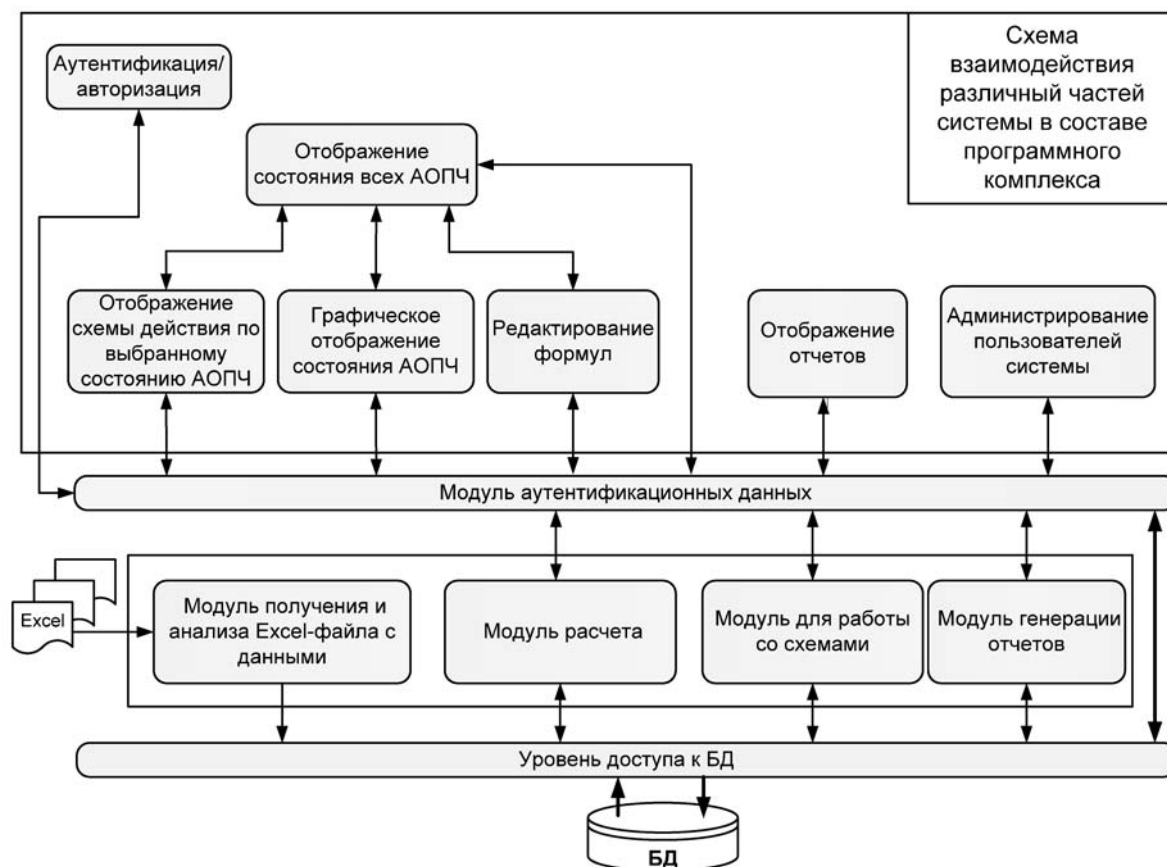


Рис. 1. Принципиальная схема взаимодействия между модулями ПК

ний генерируемой мощности предполагается средствами телеизмерений, оценка мощности нагрузки при отсутствии или недостаточности средств телеизмерений — путем интерполяции на текущий момент времени результатов ежегодных контрольных замеров нагрузки.

Филиалом ОАО «СО ЕЭС» Ленинградское РДУ будет осуществляться разработка программного комплекса для мониторинга и автоматизации системы контроля эффективности действия АОПЧ всех районов потенциального выделения

энергосистемы Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Сформулированы основные требования к функционированию этого программного комплекса.

Применение программного комплекса совместно с переводом системы противоаварийной автоматики на микропроцессорную базу позволит повысить надежность электроснабжения потребителей в районах потенциального выделения с избытком генерируемой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие технические требования к системе ГРАМ гидроэлектростанций [Текст] / РАО «ЕЭС России». — СО 34.35.524—2004. — М.: Изд-во ОАО РАО «ЕЭС России», 2004. — 5 с.
2. Технические требования к маневренности энергетических парогазовых установок блочных тепловых электростанций [Текст] / РАО «ЕЭС России». — СО 34.30.741-96. — М.: Изд-во РАО «ЕЭС России», 1996. — 12 с.

3. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. — М., Наука, 1978. — 513 с.
4. Кравченко, И.В. Принципы построения автоматизированной системы контроля эффективности действия ЧДА [Текст] / А.С. Карпов, И.В. Кравченко, В.Н. Костин, Е.Н. Попков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». — 2011. № 4 (135). — С. 94—99.



УДК 621.316.933

А.В. Косоруков, В.В. Титков

РАСЧЕТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩИХ УДАРАХ МОЛНИИ

Для обеспечения надежности электроснабжения микропроцессорное оборудование объектов электроэнергетики должно удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости. При разработке соответствующего тома проектной документации согласно [1] среди различных электромагнитных воздействий необходимо рассматривать и импульсные перенапряжения во вторичных цепях, созданные последующими ударами молнии.

Сложность данной задачи заключается в том, что нормированный фронт данного воздействия составляет всего 0,25 мкс. Кроме того, из-за необходимости уменьшения площади объекта и обеспечения надежности защиты оборудования элементы системы молниезащиты (молниеотводы и молниеприемные сетки) всегда проходят вблизи (5–20 метров) от трасс кабельных линий (КЛ) вторичных цепей. При этом КЛ имеют длины порядка сотен метров, часто меняют направление прокладки и проходят по различным типам сооружений. На величину перенапряжений также влияет заземляющее устройство, которое имеет индивидуальную конфигурацию на каждом объекте.

Таким образом, для корректного решения задачи необходимо учитывать процессы, включая электрическое воздействие, создаваемое внешним фактором (молния) в разных, произвольно расположенных в пространстве относительно друг друга, протяженных проводящих коммуникациях, каждая из которых является системой с распределенными параметрами.

Задача оценки перенапряжений при таком подходе состоит из двух частей: расчета воздействующей на участок КЛ напряженности электрического поля (помехи) и расчета переходного процесса в кабельной линии как системе с распределенными параметрами.

Одним из численных методов, позволяющих решить уравнения Максвелла в данных услови-

ях, моделировать все перечисленные выше элементы электроустановки, а также неоднородную структуру грунта, является метод конечных разностей во временной области (FDTD метод). Суть метода состоит в том, что рассматриваемая область разделяется на конечные элементы объема (ячейка Yee). Для снижения погрешности расчета, как правило, используются кубические элементы. В серединах граней и ребер ячейки расположены искомые составляющие векторов напряженности магнитного (H) и электрического (E) полей [2]. Вид ячейки представлен на рис. 1.

Так как все компоненты H и E при таком расположении сдвинуты относительно друг друга на половину длины Δ ребра ячейки, то при учете конечной скорости распространения электромагнитного поля во временной области получаем сдвиг в вычислении данных величин на половину шага Δt цикла по времени. В этом случае при использовании центрально-разностной аппроксимации можем записать систему уравнений Максвелла для грунта и воздуха в следующей форме:

$$E_x|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n+0,5} = C_{ax} E_x|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n-0,5} +$$

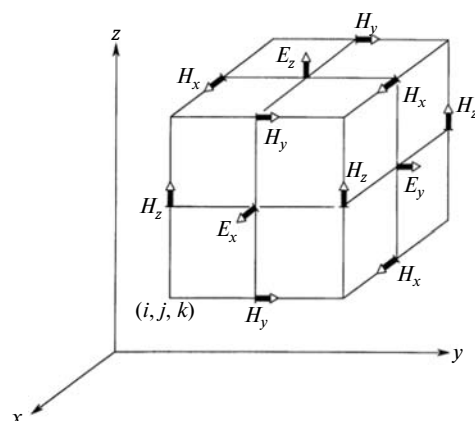


Рис. 1. Ячейка Yee

$$+ C_{bx} \left(H_z \Big|_{i,j+1,k+0,5}^n - H_z \Big|_{i,j,k+0,5}^n + H_y \Big|_{i,j+0,5,k}^n - \right. \\ \left. - H_y \Big|_{i,j+0,5,k+1}^n \right);$$

$$E_y \Big|_{i-0,5,j+1,k+0,5}^{n+0,5} = C_{ay} E_y \Big|_{i-0,5,j+1,k+0,5}^{n-0,5} + \\ + C_{by} \left(H_x \Big|_{i-0,5,j,k+1}^n - H_x \Big|_{i-0,5,j,k}^n + H_z \Big|_{i-1,j+1,k+0,5}^n - \right. \\ \left. - H_z \Big|_{i,j+1,k+0,5}^n \right);$$

$$E_z \Big|_{i-0,5,j+0,5,k+1}^{n+0,5} = C_{az} E_z \Big|_{i-0,5,j+0,5,k+1}^{n-0,5} + \\ + C_{bz} \left(H_y \Big|_{i,j+0,5,k+1}^n - H_y \Big|_{i-1,j+0,5,k+1}^n + H_x \Big|_{i-0,5,j,k+1}^n - \right. \\ \left. - H_x \Big|_{i-0,5,j+1,k+1}^n \right);$$

$$H_x \Big|_{i-0,5,j+1,k+1}^{n+1} = H_x \Big|_{i-0,5,j+1,k+1}^n + \\ + D_{bx} \left(E_y \Big|_{i-0,5,j+1,k+1,5}^{n+0,5} - E_y \Big|_{i-0,5,j+1,k+0,5}^{n+0,5} + \right. \\ \left. + E_z \Big|_{i-0,5,j+0,5,k+1}^{n+0,5} - E_z \Big|_{i-0,5,j+1,5,k+1}^{n+0,5} \right);$$

$$H_y \Big|_{i,j+0,5,k+1}^{n+1} = H_y \Big|_{i,j+0,5,k+1}^n + \\ + D_{by} \left(E_z \Big|_{i+0,5,j+0,5,k+1}^{n+0,5} - E_z \Big|_{i-0,5,j+0,5,k+1}^{n+0,5} + \right. \\ \left. + E_x \Big|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n+0,5} - E_x \Big|_{i,j+0,5,5,k+1,5}^{n+0,5} \right);$$

$$H_z \Big|_{i,j+1,k+0,5}^{n+1} = H_z \Big|_{i,j+1,k+0,5}^n + \\ + D_{bz} \left(E_x \Big|_{i,j+1,5,k+0,5}^{n+0,5} - E_x \Big|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n+0,5} + \right. \\ \left. + E_y \Big|_{i-0,5,j+1,k+0,5}^{n+0,5} - E_y \Big|_{i+0,5,j+1,k+0,5}^{n+0,5} \right). \quad (1)$$

При выводе выражений (1) принято, что внутри области отсутствуют источники тока. Верхние индексы указывают на момент времени вычисления, нижние — на точку расположения компоненты вектора в пространстве. Индексы для констант C и D , описывающих параметры среды, опущены, так как они совпадают с про-

странственными индексами вычисляемых величин. Выражения для C и D следующие:

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma dt}{2\varepsilon} \right) \left(1 + \frac{\sigma dt}{2\varepsilon} \right); \quad (2)$$

$$C_b = \left(\frac{dt}{\varepsilon \Delta} \right) \left(1 + \frac{\sigma dt}{2\varepsilon} \right); \quad (3)$$

$$D_b = \frac{dt}{\mu \Delta}. \quad (4)$$

Из выражений (1) следует, что к моменту вычисления величины любой компоненты векторов H или E все необходимые данные уже содержатся в памяти компьютера.

Шаг Δt расчета по времени вычислялся для случая трехмерного пространства ($D = 3$) и скорости света V (наибольшая скорость распространения электромагнитной волны в расчетной области, соответствующая воздуху) из условия устойчивости Куранта

$$\frac{V \Delta t}{\Delta} \leq \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

и составил приблизительно 0,48 нс.

Параметры среды для векторов вокруг проводящих структур (проницаемость и проводимость) пересчитывались согласно формулам [3]

$$\mu' = \frac{\mu}{m}; \quad (6)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon m; \quad (7)$$

$$\sigma' = \sigma m; \quad (8)$$

$$m = \frac{\ln(0,23)}{\ln\left(\frac{\Delta}{a}\right)}. \quad (9)$$

В выражении (9) a — эквивалентный радиус проводника. При этом, как видно, скорость распространения волны остается такой, что условие (5) выполняется.

В качестве условий поглощения излучения на границе расчетной области были использованы условия Мура [2], реализация которых хоть и дает большую, чем условия PML (идеально согласованные слои), погрешность, однако требует значительно меньших затрат времени на расчет и позволяет обеспечить инженерное приращение программы.

Ток молнии вводится в задачу при помощи жесткого задания циркуляции вектора напря-



женности магнитного поля H на ребрах одной из ячеек. Такой метод отличается от классических представлений о развитии разряда молнии, однако он много лет используется при расчетах заземляющих устройств. Моделирование процесса протекания тока молнии с заданными параметрами в точном соответствии с признанными механизмами развития разряда потребовало бы информации о начальном распределении заряда в грунте и металлических коммуникациях рассматриваемой области. Это распределение зависит от многих факторов, в частности от направления движения грозового облака, процессов первого удара.

Полученное значение напряженности электрического поля E на каждом из участков КЛ позволяет оценить ток помехи в жиле КЛ. Следует отметить, что величина E в реальных условиях существенно ослабляется за счет экранирования жил рассматриваемой КЛ экраном кабеля, другими линиями, а также коммуникациями кабельных сооружений. Поэтому расчет переходных процессов в КЛ, вызванных воздействием молнии, должен выполняться с учетом экранирования. Точные сведения о коэффициентах экранирования можно получить только при помощи измерений на объектах. При проектировании используют унифицированные заниженные значения коэффициентов экранирования [1].

Существуют два основных подхода к расчетам переходных процессов в КЛ при воздействии поля, созданного внешним источником. Если КЛ проложена отдельно, то моделируют все ее проводники, включая экран и броню. В этом случае от тока, протекающего по внешним проводникам КЛ, при помощи сопротивления связи переходят к воздействиям на жилах. В случае, если КЛ проложена в общем потоке, что характерно для объектов электроэнергетики, такой подход обладает существенным недостатком: на практике измерение коэффициента экранирования, созданного только кабельным сооружением, затруднительно. В этом случае измеряют коэффициент экранирования жил КЛ, а при расчете рассматривают процесс в одном, эквивалентном, проводнике. При этом линию считают однопроводной (экран не учитывается), однако скорость распространения и волновое сопротивление рассчитываются исходя из данных об оригинальной конструкции КЛ.

При расчетах перенапряжений были использованы данные о конструкции кабелей типа КВВГЭнг-LS, так как данный тип наиболее широко применяется в электроэнергетике. Эквивалентирование пучка жил, симметрично расположенных в КЛ, а также моделирование затухания были произведены по методике, описанной в [4].

Важная проблема — несовпадение шагов по времени в полевой задаче и задаче расчета переходного процесса, что является следствием различия скоростей распространения электромагнитной волны в изоляции КЛ и в других средах, рассматриваемых в полевой задаче. Данная проблема была решена следующим образом: принято, что шаг по длине dl в задаче расчета переходного процесса в n раз больше, чем шаг Δ в полевой задаче, где n — целое число. Суммарная напряженность поля E , действующая на элементарный новый участок dl , равна сумме n векторов E вдоль трассы КЛ. Шаг по времени $dt = dl/v_{\text{кл}}$ в этом случае оказывается большим, чем в задаче расчета поля. Величина напряженности, действующая на такой участок в конкретный момент времени, определяется путем интерполяции между значениями, полученными на ближайших шагах по времени в полевой задаче.

Приложенная к жиле КЛ ЭДС, включенная в расчетку, создает две волны, распространяющиеся в противоположные стороны. Таким образом, волна напряжения в любой точке КЛ состоит из двух компонент: распространяющейся по КЛ и созданной внешним источником. На концах КЛ имеется емкостная нагрузка. Выбор

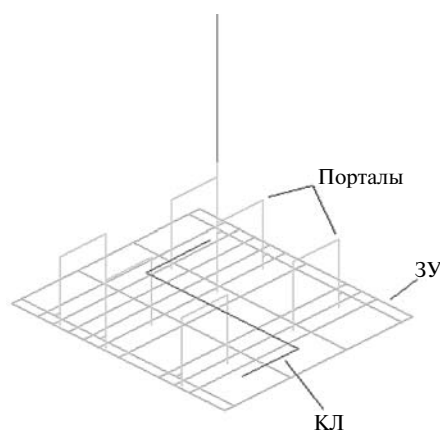


Рис. 2. Расчетная область

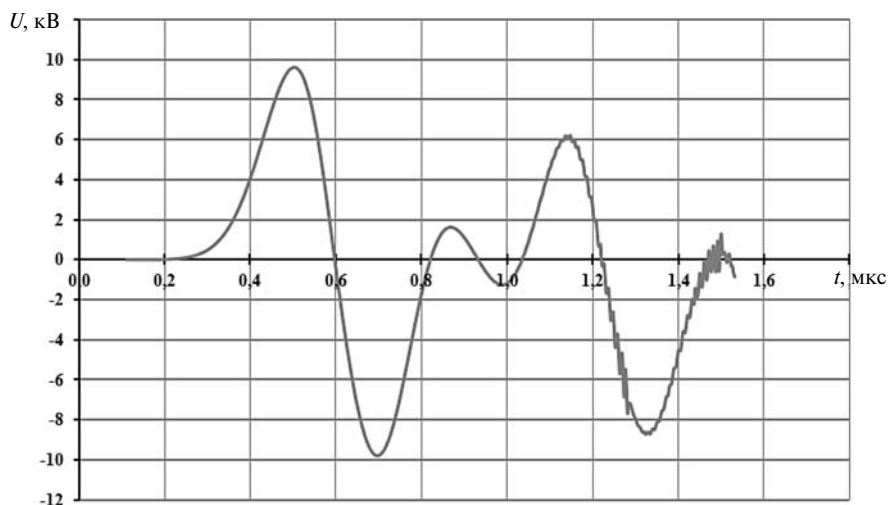


Рис. 3. Напряжение на КЛ со стороны помещения релейных панелей

вида нагрузки связан с тем, что характерные периоды колебаний напряжения соответствуют временам около 1 мкс и менее, т. е. процесс является высокочастотным. Схема замещения концевых устройств в этом случае имеет емкостный характер.

При создании программы также была предусмотрена возможность искусственного увеличения длины КЛ по обоим концам. При этом величина напряженности, воздействующая на эти участки, либо равна нулю, либо приравнивается величине, воздействующей на КЛ на последнем участке в полевой задаче с учетом конечной скорости распространения возмущения. Такой подход позволяет производить оценочные расчеты перенапряжений в КЛ, проходящих по хорошо экранированным помещениям (ядерные острова, плотины и т. п.), а также на ОРУ вдали от источника помехи, не вызывая резкого повышения требований к производительности вычислительной техники из-за увеличения расчетной области в полевой задаче.

Приведен пример (рис. 3) расчета перенапряжений для вторичной КЛ на ОРУ 110 кВ со схемой типа «мост» (рис. 2) при ударе в ближайший порталный молниевывод. Данная задача весьма актуальна, так как площадь подобных РУ мала, а значит КЛ и элементы системы молниезащиты располагаются очень близко друг к другу. При расчете коэффициент экранирования КЛ принят равным 40. Зависимость напряжения на конце КЛ со стороны ОПУ от времени приведена на рис. 3.

Задача расчета перенапряжений во вторичных КЛ при последующих ударах молнии требует учета процессов излучения и, как следствие, распределенного характера воздействия на КЛ

Предложенный алгоритм может быть разделен на две части: расчет электромагнитного поля и расчет переходного процесса в КЛ.

Разработанная программа позволяет оценивать перенапряжения во вторичных КЛ при последующих ударах молнии в условиях, характерных для объектов электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства [Текст] / ФСК ЕЭС // СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007–29.240.044–2010.— Введ. 2010–04–21. — М.
2. Taflöve, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method [Текст] / A. Taflöve, S.C. Hagness.— 2nd ed.— Boston, 2000
3. Taniguchi, Y. An improved arbitrary-radius-wire representation for FDTD Electromagnetic and Surge Calculations [Текст] / Y. Taniguchi, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani // International Conference on Power Systems Transients (IPST2009).— Kyoto, 2009
4. Ефимов, Б.В. Волновые процессы и перенапряжения в подземных линиях [Текст] / Б.В. Ефимов и др.— Л., 1991.

УДК 621.311

Я.Э. Шклярский, В.С. Добуш

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Современные технологии силовой электроники осуществляют преобразование электрической энергии при мощности нагрузки от нескольких Вт до нескольких десятков МВт. Эти преобразования возможны на основе применения силовых ключей-тиристоров, IGBT и MOSFET-транзисторов с частотой коммутации до нескольких десятков кГц. При этом доля таких устройств непрерывно растет. Например, в развитых странах отношение доли регулируемых приводов, построенных на основе силовой электроники, к нерегулируемым уже составляет 1:1, в России этот показатель пока 1:20. Несомненно, что применение такой техники увеличивает эффективность использования электрической энергии. Например, в США в период с 1985-го по 1995 год была проведена реконструкция шестидесяти энергоблоков теплоэлектростанций, где было установлено 300 частотно-регулируемых устройств электропривода в диапазоне от 630 до 4500 кВт, и годовой экономический эффект от этого выразился в экономии 1млрд кВт·ч электрической энергии. Но силовая электроника имеет недостаток, связанный с возникновением искажений тока и, как следствие, напряжения в питающей сети.

Целью исследований, результаты которых приведены ниже, было определение целесо-

образности учета разности фаз между током и напряжением на различных гармониках как на нагрузке (в виде частотно-регулируемого привода), так и в источнике питания сети.

В исследованиях принято, что нелинейная нагрузка эквивалентирована при допущении совпадения для отдельных приемников разности фаз между напряжением и током на различных гармониках.

Для оценки влияния учета разностей фаз, в дальнейшем определенных как энергетические характеристики нелинейной нагрузки, исследовалась обобщенная схема замещения, которая представлена на рис. 1, где совокупностью источников напряжения U_{s1} , U_{s5} , U_{s7} , U_{s11} , U_{s13} , U_{s17} , соединенных последовательно, моделируется фазное напряжение источника питания. Z_{Ls} — сопротивление системы; Z_{n1} , Z_{n2} — комплексные сопротивления нагрузки; Z_{kb} — комплексное сопротивление конденсаторной батареи. Амплитуды источников соответствуют спектру фазного напряжения источника питания. Совокупностью источников тока I_1 , I_5 , I_7 , I_{11} , I_{13} , I_{17} , соединенных параллельно, моделируется фазный ток нелинейного элемента. Амплитуды источников соответствуют спектру фазного тока нелинейного элемента.

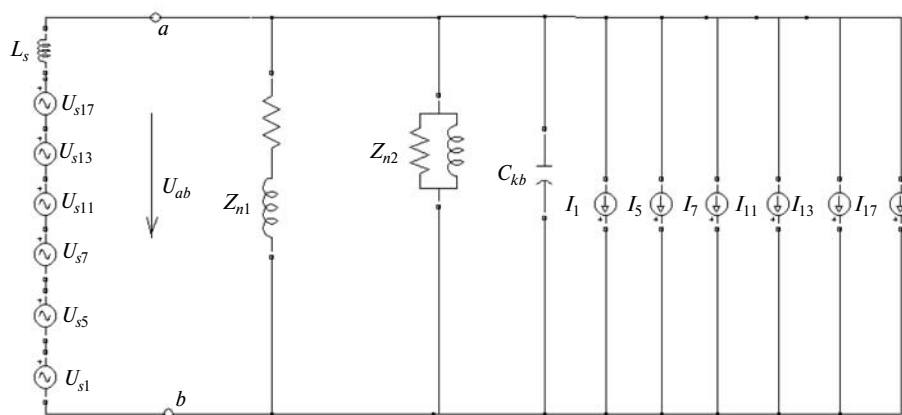


Рис. 1. Обобщенная схема замещения

Анализируемой схеме соответствует случай, когда источником искажений является как питающая сеть, так и нагрузка. Именно в этом случае угол сдвига фаз между током и напряжением на соответствующих гармониках будет влиять на расчет цепи, так как согласно методу наложения на определенных гармониках в рассматриваемой цепи будут присутствовать два источника. На основной гармонике угол сдвига фаз между током и напряжением может находиться в диапазоне от -90° до 90° . На высших гармониках это ограничение не определено.

За целевой параметр принята величина тока конденсаторной батареи (КБ), так как конденсаторы — самое чувствительное звено по отношению к высшим гармоникам.

При классическом расчете параметров режима цепи не учитываются ни начальные фазы источников напряжения, которыми моделируется источник питания, ни фазы источников тока, которыми моделируется нелинейный элемент. В результате чего может возникать значительная погрешность в вычислении токов и напряжений.

При определении погрешности от неучета угла сдвига фаз между током и напряжением, т. е. разности между начальной фазой источника напряжения на определенной гармонике и началь-

ной фазой источника тока, для примера была рассмотрена представленная выше схема. Параметры источника сетевого напряжения: $U_{S1} = 5773 \text{ В}$; $U_{S5} = 390 \text{ В}$; $U_{S7} = 150 \text{ В}$; $U_{S11} = 93 \text{ В}$; $U_{S13} = 82 \text{ В}$; $U_{S17} = 61 \text{ В}$; $\text{THD}_U = 7,62 \%$.

Параметры нелинейной нагрузки: $I_1 = 500 \text{ А}$; $I_5 = 100 \text{ А}$; $I_7 = 71,4 \text{ А}$; $I_{11} = 45,5 \text{ А}$; $I_{13} = 38,5 \text{ А}$; $I_{17} = 29,4 \text{ А}$; $\text{THD}_I = 28 \%$.

Индуктивность ЛЭП: $L_S = 0,2345 \text{ мГн}$.

Параметры линейной нагрузки: $R_{n1} = 67,534 \text{ Ом}$; $L_{n1} = 0,155 \text{ Гн}$; $R_{n2} = 16,67 \text{ Ом}$; $L_{n2} = 0,08 \text{ Гн}$.

Параметры КБ: $C = 149,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Изменялась начальная фаза источников тока от 0 до 360° . Схема рассматривалась отдельно для каждой гармоники.

Моделирование проводилось в программе *MATLAB* в пакете *Simulink*.

На рис. 2 представлена зависимость действующего значения тока КБ от угла сдвига фаз при различных значениях амплитуды основной гармоники I_1 источника тока нелинейной нагрузки (амплитуда меняется от 100 до 500 А с шагом 100 А). Тем самым моделируется случай, когда меняется мощность нелинейной нагрузки. Угол сдвига фаз на основной гармонике может изменяться для выпрямительного режима работы силового моста при фазовом методе управления

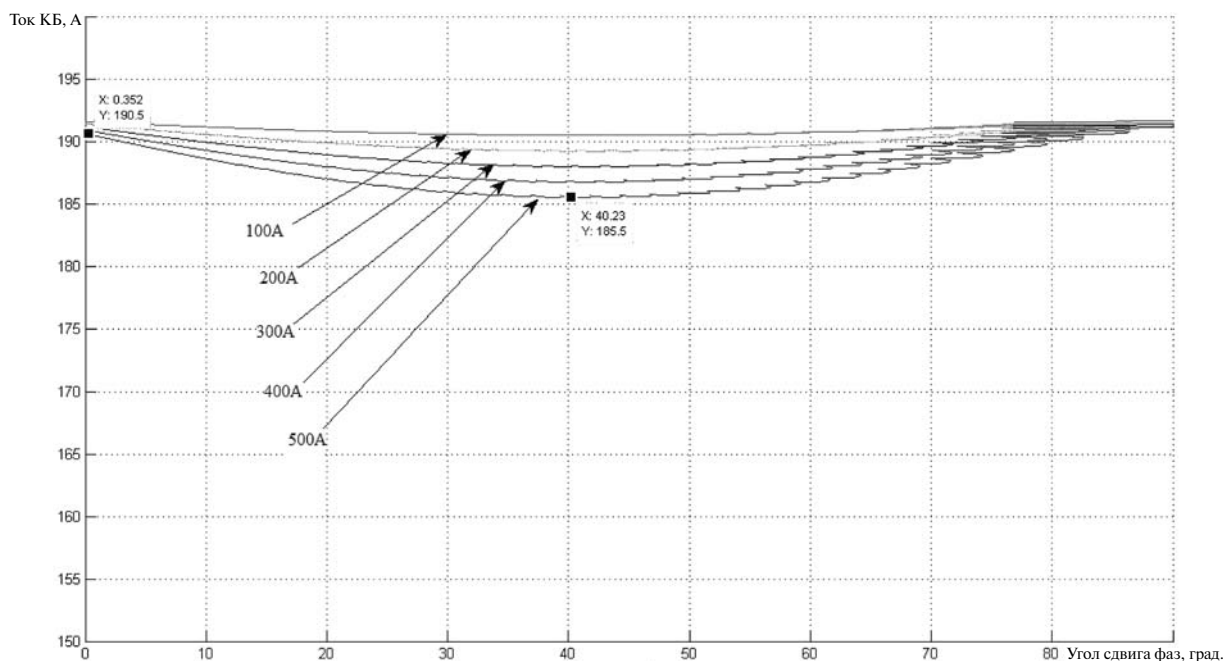


Рис. 2. Зависимость тока КБ на основной гармонике от угла сдвига фаз

силовыми ключами от 0 до 90° , при этом максимально возможная погрешность расчета тока КБ на основной гармонике составляет всего 5 А (2,6 % от действующего значения тока КБ на основной гармонике).

На рис. 3 представлено семейство зависимостей действующего значения тока КБ на пятой гармонике от угла сдвига фаз между U_{ab} (см. рис. 1) и током I_5 источника при различных значениях амплитуды этого источника (амплитуда меняется от 10 до 100 А с шагом 10 А). Как и на основной гармонике, изменение амплитуды пятой гармоники тока имитирует изменение величины нелинейной нагрузки.

Из представленных характеристик можно сделать ряд выводов. Во-первых, при изменении разности фаз между током и напряжением на пятой гармонике значительно меняется величина тока КБ, а значит, при расчете без учета угла сдвига фаз между током и напряжением возникает значительная погрешность. Во-вторых, раз-

ность фаз меняется от -100 до 260° при амплитуде пятой гармоники до 90 А, но при $I_5 = 100$ А разность фаз меняется от 120 до 260° ; это означает, что при превышении определенной величины амплитуды пятой гармоники разность фаз — величина ограниченная и находится во втором и третьем квадрантах. В-третьих, величина возможной погрешности зависит от соотношения линейной и нелинейной части нагрузки: при увеличении нелинейной части значение возможной погрешности увеличивается.

Разность максимального и минимального значения при изменении угла сдвига достигает 488,9 А, что по отношению к действующему значению тока КБ на основной гармонике составляет 255 %. При этом величина тока КБ колеблется согласно зависимости, представленной на рис. 2, от 6,5 А (3,38 % от действующего значения тока КБ на основной гармонике) до 495,4 А (259 % от действующего значения тока КБ на основной гармонике). Необходимо заметить, что

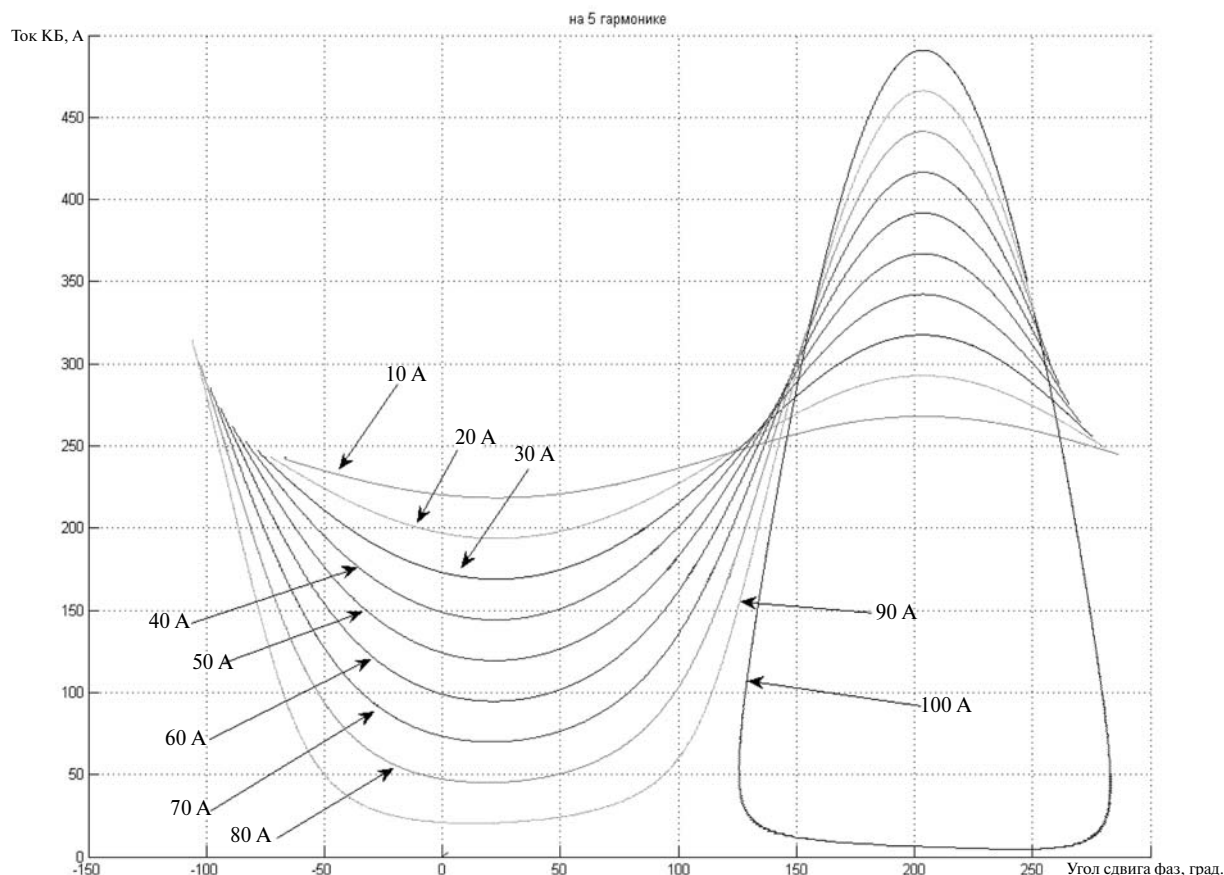


Рис. 3. Зависимости действующего значения пятой гармоники тока КБ от угла сдвига фаз между U_{ab} и током I_5 источника при различных значениях амплитуды этого тока

Результаты моделирования тока КБ

Номер гармоники n	$I_{KB\ n}, A$		
	Классическая модель	Модель при изменении угла сдвига фаз	
		Максимальное значение	Минимальное значение
1	192,4	191,2	178,6
5	350,3	495,4	6,5
7	114,7	147,7	67,15
11	42,4	50,9	31,7
13	33,04	39	25,7
17	23,2	26,4	19,4
Среднеквадр. значение	419,9	555,5 (+32 %)	196,2 (–53 %)

данное значение тока КБ получено только при учете влияния пятой гармоники на рассматриваемую схему.

Зависимости тока КБ от угла сдвига на гармониках выше пятой имеют схожий характер с представленными на рис. 2. Однако разность минимального и максимального значений для этих гармоник значительно меньше, чем для пятой гармоники.

Сводная таблица результатов моделирования при номинальном спектре потребленного тока нелинейной нагрузки представлена ниже (см. таблицу).

Из данных, приведенных в таблице, следует, что среднеквадратичное значение тока КБ при изменении угла сдвига фаз варьируется в пределах от 196,2 до 555,5 А. При этом классическая модель (начальные фазы гармоник тока и напряжения приняты за ноль) дает значение тока КБ 419,9 А.

Из результатов исследований следует, что на основной гармонике с учетом сдвига фаз вели-

чина тока КБ изменяется в пределах 5 % от номинальной величины. На высших гармониках существует значительная зависимость тока КБ от угла сдвига фаз между током и напряжением. С увеличением доли нелинейной нагрузки увеличивается и возможная погрешность расчета параметров, в рассматриваемом случае — тока КБ. Так максимальная расчетная погрешность при возможном токе КБ в 556 А составляет 32 %.

Из полученных результатов следует, что классическая модель не удовлетворяет требуемой точности инженерных расчетов в цепи, содержащей нелинейный элемент и источник несинусоидального напряжения. Можно сделать вывод, что расчет режимов такой сети следует осуществлять с учетом разности фаз на различных гармониках как со стороны нагрузки, так и со стороны питающей сети. Очевидно, что это требует более детального исследования в конкретных условиях действующего или проектируемого предприятия с учетом разнообразия нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. [Текст] / Л.А. Бессонов. — Издание девятое. М.: Высшая школа, 1996.
2. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. — СПб.: Питер, 2008.
3. Семёнов, Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения [Текст] / Б.Ю. Семёнов. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011.
4. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И.В. Жежеленко. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
5. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов [Текст] / Ю.С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.



УДК 621.313

А.В. Каган, А.Л. Виноградов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ АСИММЕТРИИ

Симметричной считается электрическая машина, у которой основная гармоническая индукции \tilde{B} результирующего магнитного поля имеет круговую форму. В несимметричных машинах годографом вектора результирующего магнитного поля является эллипс, что может быть интерпретировано как наличие в таких машинах двух магнитных полей, вращающихся в противоположных направлениях: $\tilde{B} = \tilde{B}_1 + \tilde{B}_2$.

Эллиптическая форма поля в зазоре может быть обусловлена конструктивными, эксплуатационными или технологическими причинами.

Конструктивно электрическая машина может иметь несимметричные магнитопроводы статора или ротора (или статора и ротора одновременно), которые характеризуются разными магнитными проводимостями в различных радиальных направлениях (как, например, в явнополюсных машинах). Под этот конструктивный признак подпадают однофазные машины, а также двухфазные (многофазные) с неравноценными в электромагнитном отношении фазами либо двухфазные машины, у которых пространственный угол сдвига между фазами не равен $\pi/2$ ($2\pi/m$).

Конструктивно симметричная машина в процессе эксплуатации может работать в несимметричных режимах (например, несимметричная нагрузка многофазного синхронного генератора, однофазный режим трехфазного асинхронного двигателя и др.). Несимметричные режимы обычно моделируются с применением метода симметричных составляющих, согласно которому токи и напряжения раскладываются на прямую, обратную и нулевую последовательности.

Практически все конструктивно симметричные машины, работающие в симметричных эксплуатационных режимах, строго говоря, являются несимметричными, что обусловлено технологическими погрешностями их изготовления. При моделировании технологические и эксплуатационные причины появления эллиптического поля могут быть сведены к конструктивным.

В зависимости от того, как технически произведено отступление от симметрии в машине, различают параметрическую, электрическую, магнитную и пространственную асимметрии*.

Расчет несимметричных машин вызывает определенные затруднения. Особенно сложна эта проблема при одновременном присутствии в электромагнине каких-либо двух видов несимметрии, а также при полной ее асимметрии. Рассмотрим приближенный метод расчета, позволяющий получить необходимые количественные оценки.

Сначала создадим математическую модель асинхронной машины с произвольным пространственным смещением осей обмоток.

Любое отклонение одной или нескольких осей фазных обмоток от их симметричной пространственной ориентации приводит к возникновению в воздушном зазоре машины обратно вращающегося поля. Причем расчет любой несимметричной m -фазной машины в конечном счете можно свести к расчету некоторой эквивалентной двухфазной машины с двумя вращающимися в противоположные стороны полями. Такой подход дает возможность проанализировать физическую сторону процесса и позволяет получить интегральную информацию об электромагнитном состоянии и обобщенных выходных показателях работы машины без пофазной детализации.

В соответствии с этим подходом составим математическое описание модели машины с двумя вращающимися во встречных направлениях полями, амплитуды которых находятся в функциональной зависимости от угла смещения осей обмотки. В качестве базовой модели примем асинхронный двигатель с двумя идентичными невзаимоиндуктивными фазными статорными обмотками, расположенными по осям α , β (рис. 1).

* Каган, А.В. Математическое моделирование в электромеханике [Текст] / А.В. Каган. — Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». — СПб., 2012.

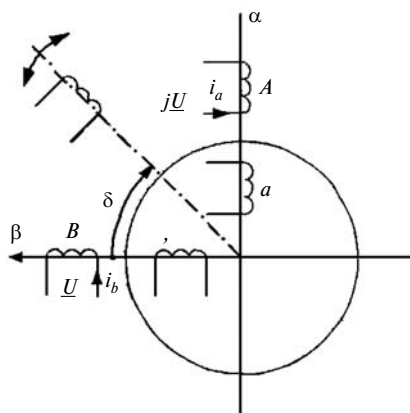


Рис. 1. Пространственная модель несимметричной машины

Моделирование пространственной асимметрии будем производить за счет изменения угла δ , характеризующего отклонение оси обмотки B от координатной оси β .

Пульсирующие в направлении осей α, β (при $\delta = 0$) основные гармонические магнитных потоков, сдвинутые друг относительно друга во времени на четверть периода, в соответствии с общим правилом могут быть разложены на вращающиеся в противоположных направлениях потоки половинной амплитуды. При этом потоки, вращающиеся прямо находятся в пространственно-временной фазе и суммируются алгебраически, а потоки, вращающиеся обратно, — в противофазе и взаимно компенсируются.

С изменением угла δ в интервале $(0, \pi/2)$ изменяются амплитуды результирующих прямо вращающегося (Φ_1) и обратно вращающегося

(Φ_2) потоков. В рассматриваемых условиях каждый из этих потоков может быть представлен на пространственно-временной комплексной плоскости как геометрическая сумма двух составляющих потоков соответствующих последовательностей. Наглядная графическая интерпретация электромагнитного процесса, подтверждающая сказанное, представлена на рис. 2. Она соответствует моменту времени, когда $i_a = 0$, $i_b = I_{\max}$. Амплитуда результирующего прямо вращающегося потока равна

$$\Phi_1 = \sqrt{\Phi_{1a}^2 + 2\Phi_{1a}\Phi_{1b}\cos\delta + \Phi_{1b}^2},$$

где Φ_{1a}, Φ_{1b} — амплитуды прямо вращающихся потоков фаз A и B .

Принимая одну из фазных обмоток, например обмотку A , за главную и учитывая, что $\Phi_{1a} = \Phi_{1b} = \Phi_a / 2$, преобразуем последнее выражение к виду

$$\Phi_1 = \sqrt{\frac{1 + \cos\delta}{2}} \Phi_a = k_1 \Phi_a,$$

где Φ_a — амплитуда пульсирующего потока фазы.

Имея в виду, что обратные поля при $\delta < \pi/2$ направлены навстречу друг другу, аналогично получаем

$$\Phi_2 = \sqrt{\frac{1 - \cos\delta}{2}} \Phi_a = k_2 \Phi_a.$$

Связанные с варьированием угла δ изменения амплитуд результирующих потоков Φ_1, Φ_2 по представленным законам, физически можно интерпретировать как изменения само- и взаимноиндуктивностей, а следовательно, и соответ-

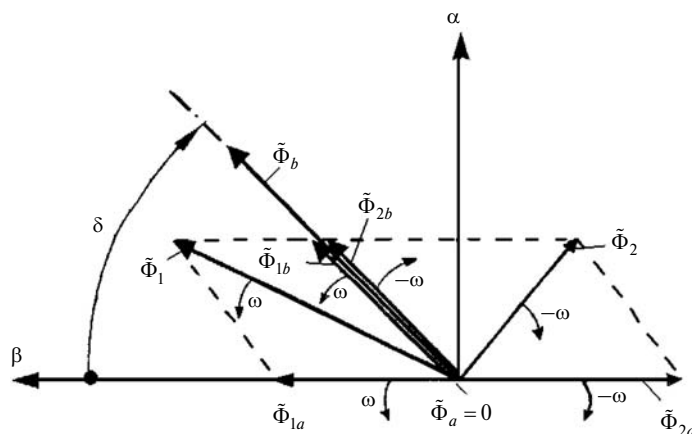


Рис. 2. Пространственно-временная диаграмма

ствующих индуктивных сопротивлений. Таким образом, наличие пространственной асимметрии обмоток можно смоделировать как параметрический фактор и учитывать в уравнениях равновесия напряжений машины путем введения в качестве сомножителей соответствующих коэффициентов при индуктивных сопротивлениях контуров. При этом целесообразно использовать метод суперпозиции и, не нарушая принципа инвариантности электромагнитной мощности, без учета начальных фаз приближенно считать, что прямо- и обратно вращающиеся потоки создаются некоторой одной эквивалентной фазой машины.

Уравнения для напряжений прямой и обратной последовательностей в эквивалентной фазе двигателя имеют в матричной форме вид

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{11} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j(x_1 + k_1 x_0) & jk_1 x_0 \\ jk_1 x_0 & \frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + k_1 x_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{11} \\ \underline{I}_{12} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{21} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j(x_1 + k_2 x_0) & jk_2 x_0 \\ jk_2 x_0 & \frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + k_2 x_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{21} \\ \underline{I}_{22} \end{bmatrix},$$

где \underline{U}_{11} и \underline{U}_{21} — напряжения прямой и обратной последовательностей; $\underline{I}_{11}, \underline{I}_{12}$ — токи прямой последовательности соответственно обмоток статора и ротора; $\underline{I}_{21}, \underline{I}_{22}$ — токи обратной последовательности статора и ротора.

В результате решения матричных уравнений и определения входных сопротивлений обеих последовательностей может быть получена Т-образная схема замещения (рис. 3).

Эта математическая модель представляет собой модифицированную схему замещения однофазной машины с двумя вращающимися полями. В случае, когда $\delta = 0$, она приобретает традиционное для симметричной в пространственном отношении машины очертание. В другом частном случае — при $\delta = \pi/2$ — схема соответствует однофазному двигателю с пульсирующим при скольжении $s = 1$ полем.

Применение данного метода позволяет относительно просто смоделировать конструктивные и технологические отклонения осей фазных обмоток от симметричной пространственной ориентации и оценить их последствия для тех или иных электромашин.

Распространяя указанный метод на машины с другими видами асимметрии — параметрической, электрической и магнитной, получим соответствующую этим случаям схему замещения. Она будет отличаться от представленной ранее лишь значениями коэффициентов при индуктивных сопротивлениях взаимной индукции:

$$k_1 = \frac{\sqrt{1 + k(k + 2\cos\delta_1)}}{2};$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{1 + k(k - 2\cos\delta_2)}}{2},$$

где $k = \frac{k_\beta}{k_\alpha} \frac{F_b}{F_a}$; k_α, k_β — коэффициенты формы поля по осям симметрии несимметричного (явнополюсного) статора; F_a, F_b — магнитодвижущие силы фазных обмоток *A* и *B*; $\delta_1 = \delta + \delta_b$, $\delta_2 = \delta - \delta_b$; δ — пространственный угол отклонения оси фазной обмотки от симметричного расположения; δ_b — временной угол сдвига фаз от симметричного случая (положительные значения — при $\delta < \pi/2$).

Рассмотрим характерные частные случаи.

1. *Параметрическая и электрическая асимметрии* ($\delta_1 = \delta_2 = \delta_b$, $k = F_b/F_a$):

$$k_1 = \frac{\sqrt{1 + \frac{F_b}{F_a} \left(\frac{F_b}{F_a} + 2\cos\delta_b \right)}}{2};$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{1 + \frac{F_b}{F_a} \left(\frac{F_b}{F_a} - 2\cos\delta_b \right)}}{2}.$$

При чисто электрической (параметрической) асимметрии воздушный зазор в радиаль-

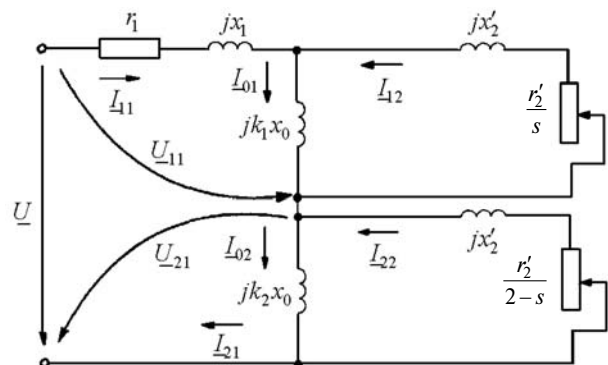


Рис. 3. Схема замещения несимметричной машины

ном направлении — равномерный, а оси фазных обмоток сдвинуты на 90 эл. градусов.

В случае неравноценности в электромагнитном отношении обеих фаз амплитуды МДС фазных обмоток не равны — $F_a \neq F_b$ (параметрическая асимметрия). Как следствие, временной угол между МДС (токами) при симметричной системе напряжений ($\underline{U}, j\underline{U}$) отличается от $\pi/2$ (электрическая асимметрия). Таким образом, основные гармонические МДС будут пульсировать в направлении осей обмоток с различной амплитудой с временным рассогласованием в $\pi/2 + \delta_b$.

В результате разложения МДС обеих фаз на вращающиеся прямо и обратно и раздельного геометрического сложения величин прямой и обратной последовательностей для амплитуд результирующих МДС, вращающихся прямо и обратно, получаем

$$F_1 = \sqrt{F_{1a}^2 + 2F_{1a}F_{1b}\cos\delta_b + F_{1b}^2},$$

$$F_2 = \sqrt{F_{2a}^2 - 2F_{2a}F_{2b}\cos\delta_b + F_{2b}^2},$$

где F_{1a}, F_{1b} и F_{2a}, F_{2b} — амплитуды прямо и обратно вращающихся МДС фаз A и B .

Учитывая, что $F_{1a} = F_{2a} = F_a/2$ и $F_{2b} = F_{1b} = F_b/2$, а также коэффициент приведения $k = \frac{F_b}{F_a}$, после преобразований получаем

$$F_1 = k_1 F_a, \quad F_2 = k_2 F_a.$$

Отклонение амплитуды результирующей прямо вращающейся МДС F_1 от значения F_a и появление составляющей F_2 обусловлено отклонением вращающегося поля от круговой формы. При $F_a = F_b$ ($k=1$) и $\delta_b = 0$ получаем схему замещения полностью симметричного двигателя. В другом частном случае при $F_b = 0$ ($k=0$) приходим к схеме замещения однофаз-

ной машины с одной обмоткой на статоре. Заметим, что при $F_a = F_b$ ($k=1$) и несимметричной системе напряжений будет иметь место чисто электрическая несимметрия.

2. *Магнитная асимметрия* ($\delta_1 = \delta_2 = 0$; $k = \frac{k_\beta}{k_\alpha}$):

$$k_1 = \frac{1 + \frac{k_\beta}{k_\alpha}}{2}; \quad k_2 = \frac{1 - \frac{k_\beta}{k_\alpha}}{2}.$$

Магнитная асимметрия в чистом виде предполагает наличие неравномерного воздушного зазора (явнополюсность статора) при полной идентичности фазных обмоток, сдвинутых в пространстве на 90 эл. градусов.

Пульсирующие в направлении осей α, β МДС фаз вследствие различной магнитной проводимости зазора будут создавать разные индукции ($B_a \neq B_b$).

В случае равномерного зазора ($k_\alpha = k_\beta$) имеем $k_1 = 1$, $k_2 = 0$, и схема замещения отвечает симметричной машине.

3. *Пространственная асимметрия* ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$; $k=1$):

$$k_1 = \frac{\sqrt{1 + \cos\delta}}{2}; \quad k_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos\delta}}{2}.$$

В итоге приходим к полученным ранее результатам.

Рассмотренный метод позволяет моделировать асинхронные машины с параметрической, электрической, магнитной и пространственной асимметриями, а также их комбинациями. В силу такой универсальности он имеет определенное методическое значение и находит практическое применение при рассмотрении соответствующих разделов учебных программ в процессе подготовки студентов вузов и технического персонала.

УДК 539.3

*Д.В. Латышев, А.А. Митюков
М.Ю. Петров, В.А. Попов*

ОБ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В последнее время получили развитие различные феноменологические модели упруговязкопластического поведения материалов при нормальной температуре в условиях постоянных и возрастающих нагрузок. Вопросы адекватного описания упруговязкопластического деформирования с использованием различных моделей освещены в работах [1–4]. Назовем несколько работ, с которыми связано наше исследование. В [5] приводятся результаты испытаний на ползучесть образцов из стали 15Х2МФА в условиях осевого растяжения при нормальной температуре. Разрыв в скоростях деформаций, обнаруженный при переходе от активного нагружения в режим ползучести, позволил сделать заключение о справедливости основной гипотезы упруговязкопластического тела, согласно которой тензор деформаций можно представить в виде суммы

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^v, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_{ij}^p, \varepsilon_{ij}^v$ — компоненты упругой, пластической и вязкой деформаций.

Автором предложена реологическая модель, учитывающая установленные в эксперименте особенности.

В общем случае действия нагрузки и других факторов в [6] предложены следующее разложение полной деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{vp} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{cp}. \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_{ij}^{vp}, \varepsilon_{ij}^{th}, \varepsilon_{ij}^{cp}$ — составляющие вязкопластической, температурной и определяемой фазовыми переходами деформаций. В условиях нор-

мальной температуры двумя последними слагаемыми можно пренебречь, а основную гипотезу упруговязкопластического материала записать следующим образом:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{vp}. \quad (3)$$

Е. Кремплем [7, 8] разработана модель упруговязкопластического тела на основе полной деформации, в которой уравнение состояния предлагается в форме

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{in} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma - g(\varepsilon)}{EK[\sigma - g(\varepsilon)]}, \quad (4)$$

где E — модуль упругости; $g(\varepsilon)$ — функция материала, отвечающая равновесной кривой «напряжение — деформация», полученной в опытах с весьма медленным нагружением; $K = K[\sigma - g(\varepsilon)]$ — функция вязкости; $\dot{\varepsilon}^{el}, \dot{\varepsilon}^{in}$ — составляющие скоростей упругой и неупругой деформации.

В частности, рассматриваемая модель при испытаниях на ползучесть в условиях постоянной нагрузки дает следующее выражение для истинного напряжения:

$$\sigma = \frac{\sigma_0(1 - v(\varepsilon_0)\varepsilon_0)^2}{(1 - v(\varepsilon)\varepsilon)^2}, \quad (5)$$

где σ_0, ε_0 — истинные напряжение и деформация в начале испытания на ползучесть; $v(\varepsilon)$ — функция, отражающая изменение коэффициента поперечной вязкопластической деформации; $v(\varepsilon_0)$ — значение последнего при $\varepsilon = \varepsilon_0$.

Таким образом, использование теории Кремпла требует знания величины коэффициента поперечной деформации, обусловленной вязкопластическими свойствами материала.

Автор сожалеет о недостатке экспериментальных работ по этому вопросу и, в частности, отмечает, что в известных опытах А. Филиппа [9] не подтвердилось часто используемое предположение $\nu = 0,5$ при ползучести.

В предлагаемой статье изучается поведение коэффициента поперечной деформации при мгновенном и квазистатическом нагружении, а также в условиях кратковременной ползучести при нормальной температуре.

С целью единообразия в терминологии диаграмму деформирования, полученную при обычных испытаниях, будем называть диаграммой мгновенного нагружения, а аналогичную, построенную по результатам испытаний с выдержками времени на каждой ступени, — равновесной, или квазистатической [5, 7, 10].

Проведение испытаний.

Образцы. Измерительные приборы

Опыты проводились на установке [11], обеспечивающей нагружение трубчатых образцов по схеме $p_b - p_n - P$ (внутреннее, наружное давления, осевая сила). Осевая сила создавалась действием равных наружного и внутреннего давлений жидкости $p_b = p_n = p$. При этом напряжения, возникающие в стенке образца, вычислялись по формулам

$$\sigma_z = p \frac{d_0^2}{4d_{cp}t} - p, \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r = -p,$$

где σ_z , σ_θ , σ_r — осевое, кольцевое и радиальное напряжения; d_{cp} , t — текущие средний диаметр и толщина стенки образца; d_0 — диаметр плунжера, передающего на образец осевую силу. Величинами кольцевого и радиального напряжений можно пренебречь в силу их малости по сравнению с осевым.

Образцы представляли собой смежные отрезки средней части цельнотянутой трубы из стали X18H10T и в условиях возрастающей нагрузки испытывались попарно. Наружный диаметр трубы составлял $d_n = 26,4$ мм, толщина стенки $t = 0,3$ мм, разностенность не превышала 0,01 мм. Длина рабочей части образца содержала 6–8 диаметров. Процесс нагружения состоял из определенного числа ступеней (35–40) и длился вплоть до нарушения однородности

напряженно-деформированного состояния или разрушения. Первый образец из названной пары на каждой ступени выдерживался одну секунду, затем разгружался и извлекался из камеры для измерений. Выдержка второго (парного) образца на каждой ступени перед разгрузкой составляла пять минут. Идеализированные диаграммы нагружения парных образцов представлены на рис. 1, а.

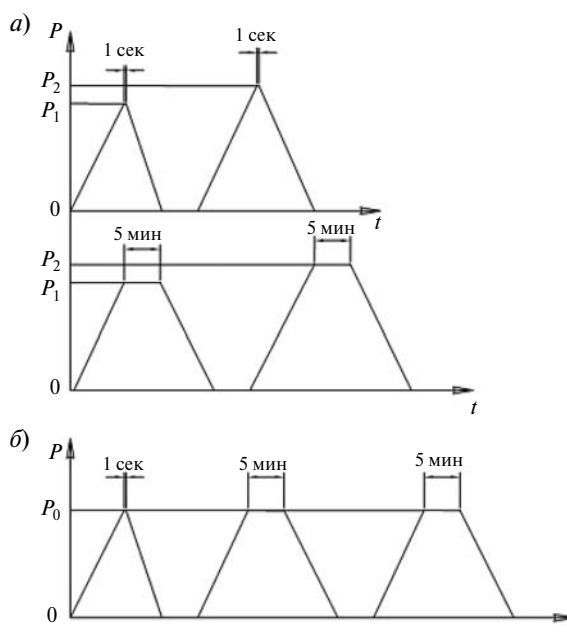


Рис. 1. Диаграммы ступенчатого нагружения парных образцов при осевом растяжении:

а — в условиях возрастающей нагрузки;
б — при постоянной нагрузке

Наружные диаметры — начальный и текущий — находились как среднее арифметическое измерений в трех направлениях трех сечений по длине рабочей части. Базовый размер по длине определялся как среднее измерений по противоположным образующим образца. Диаметры измерялись микрометром с ценой деления 0,01 мм, размеры по образующей — штангенциркулем с ценой деления 0,05 мм. Базовые размеры по образующей в 3–4 раза превышали диаметр.

Осевая и кольцевая логарифмические деформации подсчитывались по формулам

$$\varepsilon_z = \ln(l/l_0); \quad \varepsilon_\theta = \ln(d_n/d_{n0}), \quad (7)$$

где l , d_n и l_0 , d_{n0} — текущие и начальные базовый размер и диаметр образца.

Согласно основной гипотезе упруговязко-пластического тела (3) после разгрузки на каждой ступени осевая и кольцевая неупругие деформации составят:

при мгновенном нагружении

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^p; \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^p; \quad (8)$$

при квазистатическом нагружении (с выдержкой времени)

$$\varepsilon_{zt} = \varepsilon_z^p + \varepsilon_z^{vp}; \quad \varepsilon_{\theta t} = \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_\theta^{vp}. \quad (9)$$

Составляющие деформации, обусловленные вязкопластическими свойствами стали, найдутся как разности величин (9) и (8):

$$\varepsilon_z^{vp} = \varepsilon_{zt} - \varepsilon_z; \quad \varepsilon_\theta^{vp} = \varepsilon_{\theta t} - \varepsilon_\theta. \quad (10)$$

Соответствующие значения коэффициента поперечной деформации определяются выражениями

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_\theta^p}{\varepsilon_z^p} \right|; \quad \nu_t = \left| \frac{\varepsilon_{\theta t}}{\varepsilon_{zt}} \right|; \quad \nu_{vp} = \left| \frac{\varepsilon_\theta^{vp}}{\varepsilon_z^{vp}} \right| = \left| \frac{\varepsilon_{\theta t} - \varepsilon_\theta}{\varepsilon_{zt} - \varepsilon_z} \right|. \quad (11)$$

Результаты испытаний в условиях возрастающей нагрузки

Диаграммы деформирования $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ и $\sigma_{zt} = \sigma_{zt}(\varepsilon_{zt})$, построенные по результатам испытаний в условиях мгновенного и квазистатического нагружений, а также зависимости $\nu = \nu(\varepsilon_z)$ и $\nu_t = \nu_t(\varepsilon_{zt})$ представлены на рис. 2.

Видно, что в промежутке $0,048 < \varepsilon_z < 0,110$ имеет место снижение ν и ν_t от $\nu = 0,49$ до $\nu = 0,46$. Для всех последующих значений неупругой деформации вплоть до нарушения однородности ($\varepsilon_{zt} = 0,423$) значения коэффициента поперечной деформации независимо от вида нагружения весьма тесно группируются относительно $\nu = 0,46$. Средние арифметические, подсчитанные по 39 значениям, составляют $\nu = 0,462$, $\nu_t = 0,461$.

В отношении упомянутого выше снижения значений ν заметим, что подобный спад наблюдали Стэнг с сотрудниками [12]. Авторы объясняли его малым упрочнением материала. На наш взгляд, это явление обусловлено погрешностями эксперимента, поскольку для названного промежутка неупругих деформаций изменения базовых размеров сопоставимы с погрешностями измерительных приборов.

В зависимости $\nu_{vp} = \nu_{vp}(\varepsilon_z^{vp})$, представленной на рис. 3, обращает внимание значительный разброс значений коэффициента именно для названного выше промежутка неупругих деформаций. Тем не менее по мере роста вязкопластической составляющей деформации значения ν_{vp} располагаются на горизонтальной прямой $\nu_{vp} = 0,46$. Среднее арифметическое, подсчитанное по 27 значениям, получается равным $\nu_{vp} = 0,459$. Для пояснения графиков на рис. 2 и 3 в табл. 1 и 2 представлены выдержки из журнала наблюдений и обработки результатов испытаний.

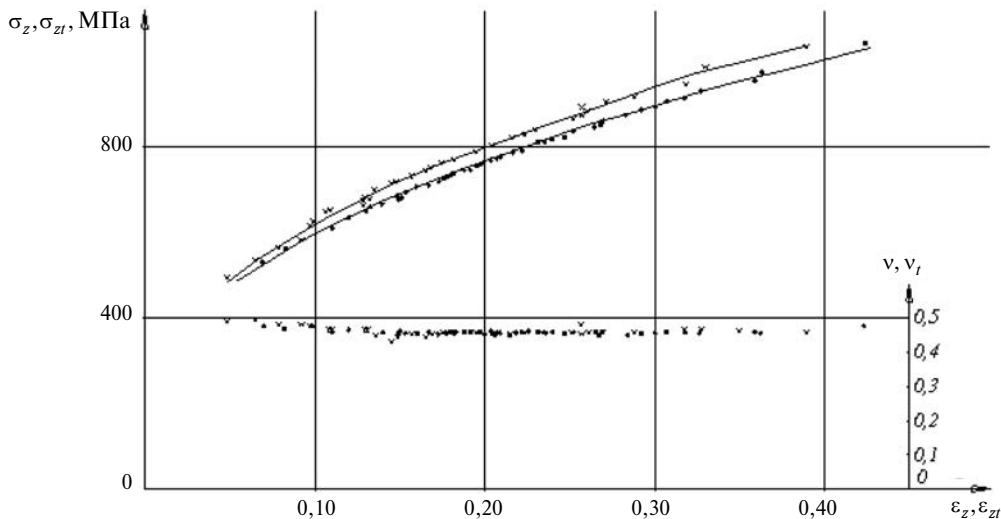


Рис. 2. Графики $\sigma_z = \sigma_z(\varepsilon_z)$ (x) и $\sigma_{zt} = \sigma_{zt}(\varepsilon_{zt})$ (•), а также зависимости $\nu = \nu(\varepsilon_z)$ (x) и $\nu_t = \nu_t(\varepsilon_{zt})$ (•)

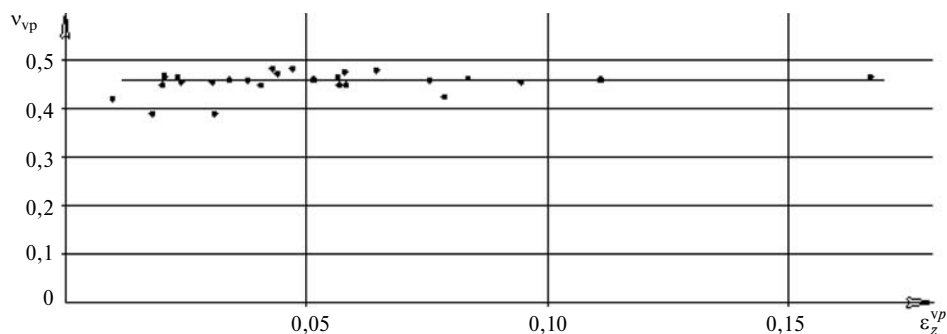


Рис. 3. График $\nu_{vp} = \nu_{vp}(\varepsilon_z^{vp})$, построенный по вязкопластическим составляющим кольцевой и осевой деформаций

Таблица 1

Коэффициент поперечной деформации, определенный по результатам испытаний в условиях квазистатического (а) и мгновенного (б) нагружений

а) Образец № 1: $l_0 = 64,25$ мм, $d_{н0} = 26,33$ мм, $t_0 = 0,30$ мм. Осевое растяжение. Время выдержки на каждой ступени $t = 5$ мин

Номер ступени нагружения	$P_B = P_H$, МПа	l , мм	d_H , мм	ε_{zt}	$\varepsilon_{\theta t}$	σ_z , МПа	σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	ν_t
26	53,4	80,45	23,730	0,225	-0,104	802,6	-53,4	-53,4	0,462
27	53,7	81,10	23,664	0,233	-0,107	814,0	-53,7	-53,7	0,459
28	54,0	81,70	23,566	0,240	-0,111	825,0	-54,0	-54,0	0,462
29	54,3	82,70	23,458	0,252	-0,116	840,4	-54,3	-54,3	0,460
30	54,6	84,10	23,266	0,269	-0,124	860,3	-54,6	-54,6	0,461
31	54,9	85,25	23,181	0,283	-0,127	877,5	-54,9	-54,9	0,449
32	55,2	86,05	23,032	0,292	-0,134	891,1	-55,2	-55,2	0,459
33	55,5	87,35	22,838	0,307	-0,142	910,4	-55,5	-55,5	0,462
34	55,8	89,15	22,664	0,327	-0,150	935,3	-55,8	-55,8	0,459
35	56,1	92,40	22,301	0,363	-0,166	976,6	-56,1	-56,1	0,457
36	56,4	98,15	21,481	0,424	-0,204	1046,6	-56,4	-56,4	0,481

б) Образец № 2: $l_0 = 54,70$ мм, $d_{н0} = 26,33$ мм, $t_0 = 0,30$ мм. Осевое растяжение. Время выдержки на каждой ступени $t = 1$ сек

Номер ступени нагружения	$P_B = P_H$, МПа	l , мм	d_H , мм	ε_z	ε_{θ}	σ_z , МПа	σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	ν
26	53,4	64,70	24,384	0,168	-0,077	755,2	-53,4	-53,4	0,458
27	53,7	65,15	24,291	0,175	-0,081	762,5	-53,7	-53,7	0,463
28	54,0	65,60	24,231	0,182	-0,083	775,1	-54,0	-54,0	0,456

Окончание табл. 2

29	54,3	66,50	24,075	0,195	−0,090	790,8	−54,3	−54,3	0,461
30	54,6	67,10	23,987	0,204	−0,093	802,9	−54,6	−54,6	0,459
31	54,9	67,10	23,957	0,204	−0,094	807,3	−54,9	−54,9	0,461
32	55,2	67,90	23,852	0,216	−0,099	822,0	−55,2	−55,2	0,458
33	55,5	68,40	23,744	0,223	−0,103	833,0	−55,5	−55,5	0,462
34	55,8	69,00	23,668	0,232	−0,107	845,3	−55,8	−55,8	0,461
35	56,1	70,40	23,496	0,252	−0,114	868,2	−56,1	−56,1	0,452
36	56,4	70,70	23,218	0,257	−0,126	876,8	−56,4	−56,4	0,486

Таблица 2

**Коэффициент поперечной деформации,
определенный по отношению вязкопластических составляющих кольцевой и осевой деформаций**

Номер ступени нагружения	ε_{zI}	$\varepsilon_{\theta I}$	ε_z	ε_{θ}	ε_z^{vp}	$\varepsilon_{\theta}^{vp}$	ν_{vp}
26	0,225	−0,104	0,168	−0,077	0,057	−0,027	0,474
27	0,223	−0,107	0,175	−0,081	0,058	−0,026	0,448
28	0,240	−0,111	0,182	−0,083	0,058	−0,028	0,483
29	0,252	−0,116	0,195	−0,090	0,057	−0,026	0,456
30	0,269	−0,124	0,204	−0,093	0,065	−0,031	0,484
31	0,283	−0,127	0,204	−0,094	0,079	−0,033	0,418
32	0,292	−0,134	0,216	−0,099	0,076	−0,035	0,461
33	0,307	−0,142	0,223	−0,103	0,084	−0,039	0,464
34	0,327	−0,150	0,232	−0,107	0,095	−0,043	0,453
35	0,363	−0,166	0,252	−0,114	0,111	−0,052	0,468
36	0,424	−0,204	0,257	−0,126	0,167	−0,078	0,467

Перейдем к результатам опытов по определению коэффициента поперечной деформации в условиях ползучести при постоянной нагрузке.

Результаты испытаний в условиях постоянной нагрузки

Образцы испытывались осевой растягивающей силой по схеме, представленной на рис. 1, б. На первой ступени выдержка составляла одну секунду, затем производились разгрузка и из-

влечение образца из камеры для измерений и вычисления мгновенных пластических деформаций ε_z^p и ε_{θ}^p . Далее при том же значении осевой силы образец выдерживался в течение пяти минут на каждой из последующих ступеней, которые также завершались разгрузкой и измерениями. Устанавливались значения деформаций ε_{zI} и $\varepsilon_{\theta I}$ после каждой ступени.

Опыты были произведены при двух уровнях нагрузки: $p_B = p_H = 53,4$ МПа; $p_B = p_H = 55,2$ МПа.

При этом отношения исходного истинного осевого напряжения σ_{z0} к начальному пределу текучести $\sigma_{0,2} = 325$ МПа составляли соответственно

$$\sigma_{z0} / \sigma_{0,2} = 777/325 = 2,39;$$

$$\sigma_{z0} / \sigma_{0,2} = 870/325 = 2,68.$$

Значения коэффициента поперечной деформации подсчитывались по второй и третьей формулам (11). Результаты опытов и их обра-

ботки приводятся в табл. 3. Графики $v_t = v_t(\varepsilon_{zt})$ и $v_{vp} = v_{vp}(\varepsilon_z^{vp})$ даются на рис. 4, где наряду с величиной нагрузки показаны средние арифметические значения коэффициента.

Как видно из этого рисунка, независимость названного коэффициента от уровня деформации сохраняется и в условиях постоянной нагрузки. При этом коэффициент, подсчитанный по отношению полных неупругих деформаций, больше, чем для случая вязкопластических.

Таблица 3

**Определение коэффициента поперечной деформации
по результатам испытаний в условиях ползучести при постоянной нагрузке**

№ п/п	$P_B = P_H$, МПа	l , мм	d_{H0} , мм	ε_{zt}	ε_{0t}	ε_z^p	ε_0^p	ε_z^{vp}	ε_0^{vp}	v_t	v_{vp}	σ_z , МПа
<i>Образец № 12: $p_B = p_H = 53,4$ МПа; $l_0 = 70,50$ мм; $d_{H0} = 26,313$ мм; $t_0 = 0,30$ мм</i>												
0	53,4	85,60	24,099	—	—	0,194	−0,088	—	—	—	—	777,3
1	53,4	86,00	24,054	0,199	−0,090	0,194	−0,088	0,005	−0,002	0,452	0,400	781,1
2	53,4	87,55	23,888	0,217	−0,097	0,194	−0,088	0,023	−0,009	0,447	0,391	796,1
3	53,4	87,80	23,838	0,219	−0,099	0,194	−0,088	0,025	−0,011	0,452	0,440	798,6
4	53,4	88,30	23,778	0,225	−0,101	0,194	−0,088	0,031	−0,013	0,449	0,419	803,4
5	53,4	89,50	23,657	0,239	−0,106	0,194	−0,088	0,045	−0,018	0,443	0,400	815,0
6	53,4	89,90	23,578	0,243	−0,110	0,194	−0,088	0,049	−0,022	0,453	0,449	818,9
7	53,4	90,35	23,539	0,248	−0,111	0,194	−0,088	0,054	−0,023	0,447	0,426	823,3
8	53,4	90,60	23,502	0,251	−0,113	0,194	−0,088	0,057	−0,025	0,450	0,439	825,7
<i>Образец № 14: $p_B = p_H = 55,2$ МПа; $l_0 = 57,80$ мм; $d_{H0} = 26,313$ мм; $t_0 = 0,30$ мм</i>												
0	55,2	71,10	23,892	—	—	0,207	−0,097	—	—	—	—	870,0
1	55,2	75,45	23,267	0,266	−0,123	0,207	−0,097	0,059	−0,026	0,462	0,441	923,1
2	55,2	75,90	23,209	0,272	−0,126	0,207	−0,097	0,065	−0,029	0,463	0,446	928,6
3	55,2	76,00	23,192	0,274	−0,126	0,207	−0,097	0,067	−0,029	0,460	0,433	929,8
4	55,2	76,35	23,162	0,278	−0,128	0,207	−0,097	0,071	−0,031	0,460	0,437	934,1
5	55,2	76,50	23,124	0,280	−0,129	0,207	−0,097	0,073	−0,032	0,461	0,438	935,9
6	55,2	76,80	23,078	0,284	−0,131	0,207	−0,097	0,077	−0,034	0,461	0,442	939,6
7	55,2	76,90	23,068	0,286	−0,132	0,207	−0,097	0,079	−0,035	0,461	0,443	940,8

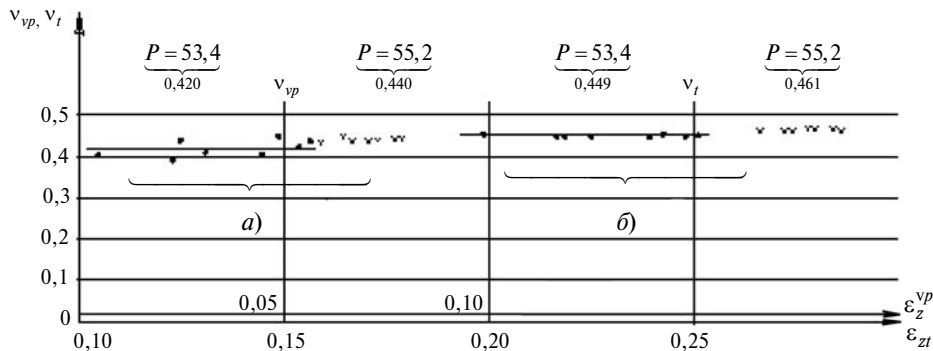


Рис. 4. Коэффициент поперечной деформации, определенный по отношениям вязкопластических составляющих кольцевой и осевой деформаций $v_{vp} = |\epsilon_{\theta}^{vp} / \epsilon_z^{vp}|$ (а) и полных неупругих деформаций $v_l = |\epsilon_{\theta l} / \epsilon_{zl}|$ (б)

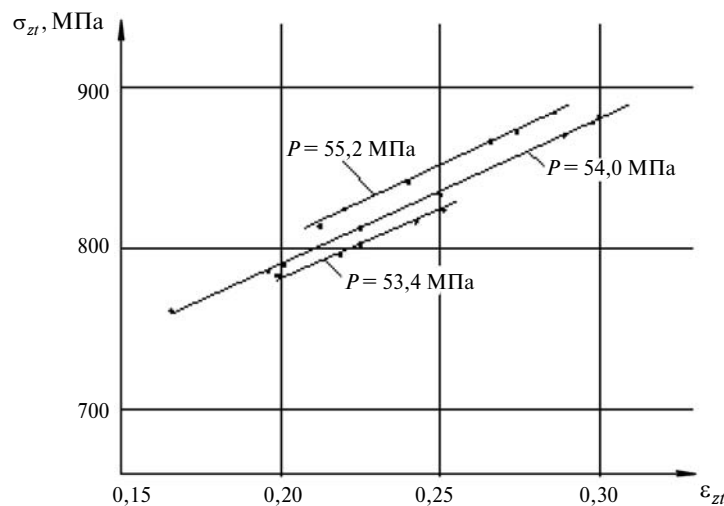


Рис. 5. Графики зависимостей $\sigma_{zl} = \sigma_{zl}(\epsilon_{zl})$, построенные для трех значений осевой силы. Точками (•) отмечены значения, подсчитанные по (12) (при этом принимались $v = v_l$, равные 0,449; 0,457; 0,461, отвечающие нагрузкам $p_b = p_n$ величиной 53,4; 54,0; 55,2 МПа соответственно)

Применительно к результатам наших исследований уравнение Кремпла (5) для вычисления напряжений в испытаниях на ползучесть при постоянной нагрузке получает вид

$$\sigma = \frac{\sigma_0(1 - v_0\epsilon_0)^2}{(1 - v\epsilon)^2}, \quad (12)$$

где $v_0 = 0,46$ — коэффициент поперечной деформации в условиях мгновенного нагружения;

v — величина, фиксированная для данного уровня нагрузки (растягивающей силы).

На рис. 5 приведены графики $\sigma_{zl} = \sigma_{zl}(\epsilon_{zl})$, построенные по результатам испытаний при трех уровнях осевой силы. На них также нанесены точки, ординаты которых подсчитаны по (12).

Как видно из рис. 5, расчетные значения напряжений согласуются с результатами экспериментов.

По результатам экспериментов, проведенных на хромоникелевой стали X18H10T, можно сделать следующие выводы:

1. Значения коэффициента поперечной деформации, подсчитанные по результатам мгновенного (ν) и квазистатического (ν_t) нагружений, а также по отношению вязкопластических составляющих кольцевой и осевой деформаций (ν_{vp}) в условиях возрастающей нагрузки, сохраняются неизменными и практически не разли-

чаются на всем промежутке неупругих деформаций ($0,045 < \varepsilon_{zt} < 0,423$).

2. Значения ν_t и ν_{vp} , определенные по экспериментам на ползучесть в условиях постоянной нагрузки, не зависят от уровней соответственно полной неупругой и вязкопластической деформаций, но они зависят от величины нагрузки, при которой производился опыт. При этом бóльшим нагрузкам отвечают бóльшие значения ν_t и ν_{vp} . Для равных нагрузок ν_t больше ν_{vp} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Melnikov, B.E.** Creation and Application of Hierarchical Sequences of Material Models for Numerical Analysis of Elastic-Plastic Structures [Текст] / B.E. Melnikov, A.S. Semenov // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik.— 1996.— Special Vol. Applied Analysis.— Issue 2.— P. 336–340.
2. **Мельников, Б.Е.** Многомодельный метод решения краевых задач термоупруговязкопластичности [Текст] / Б.Е. Мельников, Л.Б. Гецов, А.С. Семёнов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного технического университета.— 2002.— №3 (29).— С. 160–167/
3. **Семёнов, А.С.** Циклическая нестабильность при расчетах больших упругопластических деформаций [Текст] / А.С. Семёнов, М.Ю. Горохов, Б.Е. Мельников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.— 2003.— №3 (33).— С. 129–138.
4. **Мельников, Б.Е.** Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние [Текст] / Б.Е. Мельников, А.С. Семенов, С.Г. Семенов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.— 2010. Вып. 53(337).— С. 85–92.
5. **Шкодзинский, О.К.** Феноменологическая модель упруговязкопластического материала [Текст] / О.К. Шкодзинский // Проблемы прочности.— 1987. № 11.— С. 53–56.
6. **Бессон, Ж.** Нелинейная механика материалов [Текст] / Ж. Бессон, Ж. Каето, Ж.-Л. Шабощ, С. Фо-
- рест.— СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010.— С. 307.
7. **Кремпл, Е.** Анализ вязкопластичности на основе полной деформации. Описание ползучести при учете начальной деформации и старения [Текст] / Е. Кремпл // Теор. основы инж. расчетов.— 1979.— Т. 101, № 4.— С. 83–91.
8. **Krempl, E.** Rate (time)–dependent deformation behavior: an overview of some properties of metals and solid polymers [Текст] / E. Krempl, F. Khan // International Journal of Plasticity.— 2003.— Vol. 19.— P. 1069–1095.
9. **Philips, A.** Fundamental Experiments in Plasticity and Creep of Aluminum— Extension of Previous Results [Текст] / A. Philips, M. Ricciuti // International Journal of Solids and Structures. 1976.— Vol. 12.— P. 158–171.
10. **Блинов, Э.И.** Аналитическое описание временных эффектов деформации при сложном нагружении [Текст] / Э.И. Блинов // Проблемы прочности.— 1989.— № 6.— С. 47–52.
11. **Попов, В.А.** Установка для испытания тонкостенных трубчатых образцов в условиях объемного напряженного состояния [Текст] / В.А. Попов, А.Г. Митюков // Матер. научно-техн. конф. «Кораблестроительное образование и наука— 2003».— СПб.: СПбГУН, 2003.— С. 423–428.
12. **Stang, A.H.** Poisson's ratio of some structural alloys for large strains [Текст] / A.H. Stang, M. Greenspan, S.B. Newman // J. Res. Nat. Bur. Stand.— 1946. Vol. 37, № 4.

УДК 669.1.017:669.018.44:669:018.28:621.74.011

*М.Д. Фукс, А.С. Орыщенко,
С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади*

ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛИТОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА 45X26H33C2B2

Известно, что змеевиковые системы высокотемпературных установок различного назначения, в том числе в нефтехимической и металлур-

гической отраслях промышленности, работают в предельно жестких условиях [1, 2]. Перепад температур по толщине стенки (8–15 мм) реак-

ционной трубы достигает 250 °С при значениях температур на внутренней и наружной поверхностях соответственно 850 и 1100 °С (при перегревах до 1150 °С). Повышение эффективности производства за счет более глубокой переработки сырья требует увеличения температуры в зоне реакции, и следует ожидать, что в ближайшее время верхний предел штатных рабочих температур достигнет 1150 °С. Соответственно, материалы, из которых изготавливаются детали высокотемпературных установок, должны удовлетворять повышенным эксплуатационным требованиям.

К таким материалам относятся сплавы на основе системы Fe-Cr-Ni с высоким содержанием никеля (до 50 масс. %) и вольфрама (до 5 масс. %), например сплав X28H48B5 [3], а также дополнительно легированные кобальтом (до 25 масс. %) [3]. Однако в настоящее время в качестве конструкционных материалов для змеевиковых систем применяются относительно экономнолегированные жаропрочные сплавы типа X25H20 и X25H35 [1, 4]. Сплавы используются в литом состоянии, поскольку считается, что оно обеспечивает наиболее высокую длительную прочность при температурах эксплуатации [1]. Эти сплавы — сложнелегированные системы, упрочнение в которых осуществляется за счет того, что при кристаллизации и охлаждении в структуре образуются карбидные фазы различного состава, формирующиеся в виде межкристаллитной сетки и отдельных частиц [1, 2]. В работах [5–7] показано, что структура таких сплавов в литом состоянии нестабильна, постоянно претерпевает фазовые превращения в процессе эксплуатации при температурах 1100–1200 °С. При этом за счет диффузионного перераспределения химических элементов в сплаве устанавливается некоторое условное динамическое равновесие. Такое состояние может быть достаточно устойчивым к разупрочнению и обеспечивать высокую работоспособность сплава. Основной количественной характеристикой работоспособности жаропрочных сплавов служит длительная прочность [8]. Однако для сплавов типа X25H20 и X25H35 значения этой характеристики при температурах выше 1100 °С в научной литературе отсутствуют.

Цель нашей работы — исследование длительной прочности жаропрочного литого сплава на

основе системы Fe-Cr-Ni базовой композиции X25H35 при температуре 1150 °С.

Материал исследования — жаропрочный сплав 45X26H33C2B2, применяемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [4]. Сплав выплавляли в индукционных печах емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (по ГОСТ 977–88). Фактический химический состав исследованного сплава следующий:

Элемент	Содержание элемента, масс. %
C	0,48
Si	1,86
Mn	0,91
Cr	24,6
Ni	35,3
Nb	1,72
W	0,57
Mo	0,23
Ti	0,14
N	0,05
Fe	Ост.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145–81 на оригинальной установке, изготовленной на базе нагружающей машины АИМА-2 и электрической печи типа СШОЛ с нагревательной спиралью из фехральной проволоки марки 0Х27ЮТ. Точность измерения температуры испытываемого образца составляла ± 2 °С. Образцы на длительную прочность (рис. 1) изготавливали в соответствии с ГОСТ 10145–81 «Металлы. Методы испытания на длительную прочность» и СТП 90.067–87, являющимся стандартом предприятия ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (№ 140, тип 6).

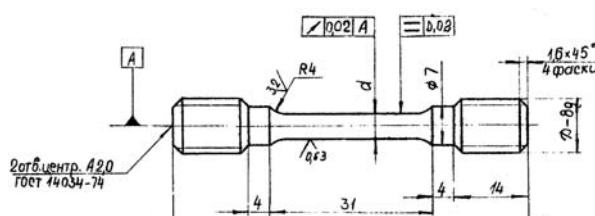


Рис. 1. Образец для испытаний на длительную прочность по ГОСТ 10145–81 ($d = 6,0 \pm 0,05$ мм, $D = M10$)

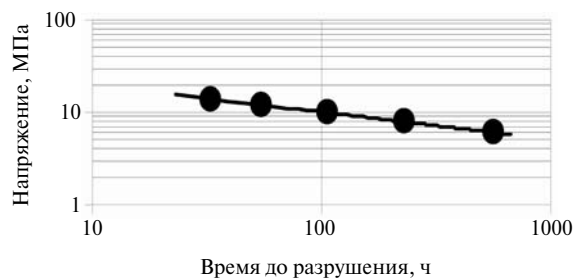


Рис. 2. Длительная прочность литого сплава 45X26H33C2B2 при температуре 1150 °C

Результаты испытаний на длительную прочность сплава 45X26H33C2B2 при температуре 1150 °C представлены на рис. 2.

Для оценки уровня жаропрочности исследованного сплава целесообразно сопоставить экспериментально полученные значения его длительной прочности при 1150 °C с аналогичной характеристикой известных более высоколегированных жаропрочных сплавов. На рис. 3 приведены кривые длительной прочности сплава 45X26H33C2B2 и сплава X28H48B5 [3]. Видно, что значения длительной прочности двух сплавов хорошо коррелируют между собой, причем исследованный сплав с пониженным содержанием никеля и вольфрама не уступает по этой характеристике сплаву X28H48B5.

Следует отметить, что излом исследованного сплава после разрушения под действием приложенной нагрузки разной величины имеет вид поверхности вязкого, преимущественно межзеренного разрушения дендритной морфологии, а относительное остаточное удлинение состав-

ляет 10–13 % (рис. 4). Это свидетельствует, что сплав 45X26H33C2B2, обладая высокой длительной прочностью при 1150 °C, имеет и достаточный запас пластичности.

Из рис. 3 также следует, что зависимость в логарифмических координатах, полученная при обработке результатов испытаний длительной прочности исследованного сплава методом наименьших квадратов, имеет вид прямой, описываемой уравнением

$$\sigma_{\text{дл}} = \frac{\sigma_0}{\left(\tau/\tau_0\right)^{0,3}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{дл}}$ — длительная прочность при температуре $T = 1150$ °C; $\sigma_0 = 14$ МПа и $\tau_0 = 33$ ч — соответственно длительная прочность и время для первой серии испытаний при температуре $T = 1150$ °C, принятой за базу.

Экспериментальные и рассчитанные по формуле (1) значения длительной прочности сплава 45X26H33C2B2 при температуре 1150 °C приведены в таблице.

Общепринято, что для оценки жаропрочности сплавов наиболее достоверны значения длительной прочности, полученные с помощью расчета по методам, основанным на принципе эквивалентных состояний [9]. К таким методам относится расчет температурно-временных параметров, наиболее используемых при обработке экспериментальных данных [10]. Параметрический метод основан на таком видоизменении шкалы времени для деформации ползучести, при котором все изотермические кривые ползучести совпадают или разрушение при заданном

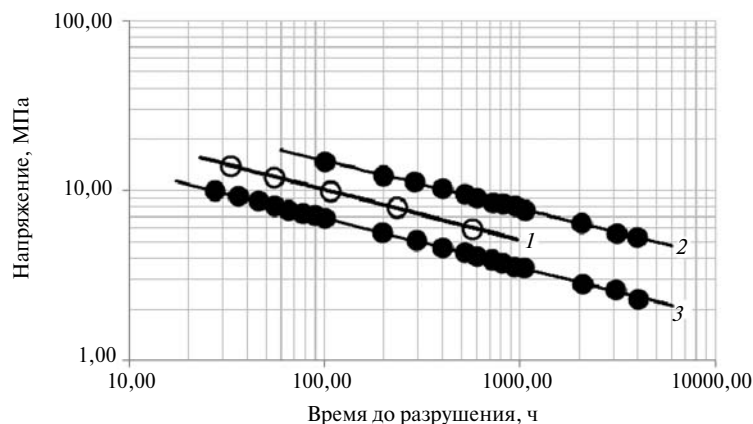


Рис. 3. Длительная прочность сплава 45X26H33C2B2 при 1150 °C (1) и сплава X28H48B5 [3] при 1100 (2) и 1200 °C (3)

значении напряжения происходит при одинаковом значении времени, скорректированном с учетом температуры испытания. Иными словами, можно построить единую зависимость между логарифмом напряжения и принятым параметром, используя данные при различных температурах испытаний. Величину параметра для каждого испытания определяют по формуле

$$P_{дп} = T(\lg \tau_k + c)10^{-3}, \quad (2)$$

где T — температура испытания, К; τ_k — время до разрушения, ч; c — постоянная. Величину постоянной c принимают равной 20. По средним величинам параметра длительной прочности проводят прямую линию условной параметрической диаграммы. Далее, подставляя вместо τ_k заданный ресурс, по формуле (2) вычисляют значение параметра. По вычисленному параметру и линии условной параметрической диаграммы определяют приближенную величину предела длительной прочности $\sigma_{дп}$.

На рис. 5 представлена условная параметрическая диаграмма для сплава Х28Н48В5, построенная по данным [3] с использованием значений длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °С. На этом же рисунке показаны значения длительной прочности исследованного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Из полученных результатов следует, что по уровню жаропрочности сплав 45Х26Н33С2Б2 полностью соответствует сплаву Х28Н48В5. Таким образом, несмотря на выявленные в [5–7] особенности структуры литого сплава 45Х26Н33С2Б2, свидетельствующие о ее нестабильности, этот материал имеет высокую длительную прочность при температурах

Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С ($\sigma_0 = 14$ МПа и $\tau_0 = 33$ ч)

Номер образца	Напряжение, МПа		Время до разрушения, ч
	Фактическое	Расчетное	
1	14	13,940	33
2	12	12,010	55
3	10	9,865	106
4	8	7,799	232
5	6	5,970	565

эксплуатации до 1150 °С, сопоставимую с более легированными жаропрочными сплавами.

Таким образом, экономнолегированный сплав 45Х26Н33С2Б2 конкурентоспособен по отношению к более дорогим высоколегированным жаропрочным сплавам при использовании в качестве конструкционного материала для изготовления высокотемпературного оборудования различного назначения с рабочей температурой выше 1100 °С.

Определена длительная прочность литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. На основании математической обработки экспериментальных данных получено уравнение, позволяющее рассчитывать значение длительной прочности сплава при различной величине внешнего напряжения.

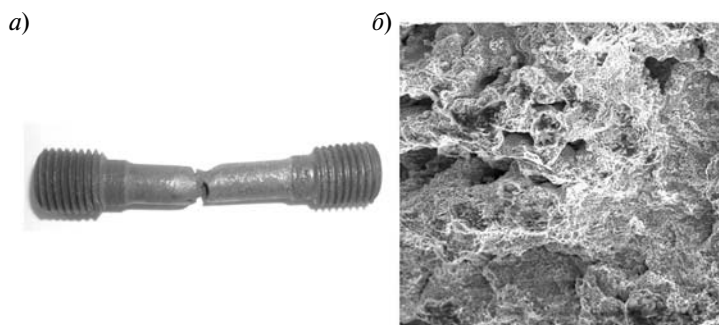


Рис. 4. Внешний вид (а) и излом при увеличении $\times 1000$ (б) образца литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после испытаний на длительную прочность при температуре 1150 °С и напряжении 12 МПа

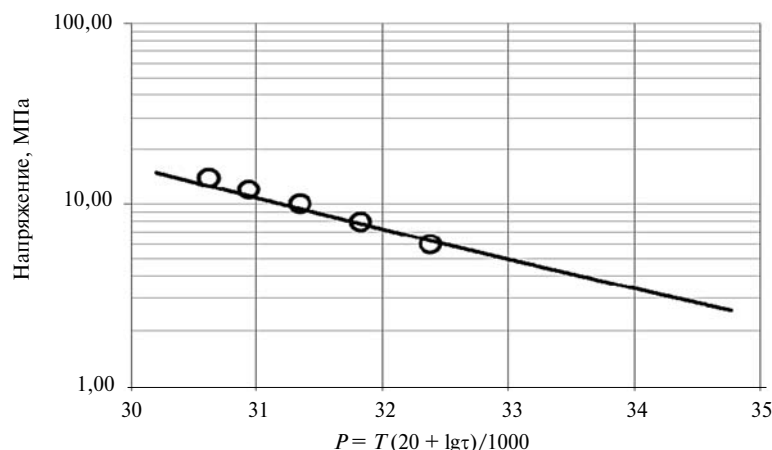


Рис. 5. Условная параметрическая кривая для сплава X28H48B5 (—) и результаты испытаний (о) сплава 45X26H33C2B2

Показано, что по уровню жаропрочности сплав 45X26H33C2B2 не уступает таким жаропрочным высоколегированным никелем и вольфрамом

сплавам, как X28H48B5, и является перспективным для изготовления высокотемпературных установок с температурой эксплуатации 1100–1200 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орыщенко, А.С. Жаростойкие жаропрочные сплавы [Текст] / А.С. Орыщенко.— СПб.: Наука, 2011.— 191 с.
2. Орыщенко, А.С. Разработка жаростойких сплавов для элементов конструкции радиантной части змеевиков высокотемпературных установок нефтесинтеза [Текст] / А.С. Орыщенко // Вопросы материаловедения. — 2006. № 1 (45).— С. 147–159.
3. Марочник стали для машиностроения [Текст].— М.: Изд-во НИИ информации по машиностроению, 1965.— 594 с.
4. Орыщенко, А.С. Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург.— 2008. № 2.— С. 66–68.
5. Орыщенко, А.С. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование.— 2012. № 1 (142).— С. 155–163.
6. Орыщенко, А.С. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование.— 2012. № 2–1 (147).— С. 217–228.
7. Рудской, А.И. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений [Текст] / А.И. Рудской, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование.— 2012. № 3 (154), Т. 2.— С. 143–150.
8. Хажинский, Г.М. Деформирование и длительная прочность металлов [Текст] / А.И. Рудской.— М.: Научный мир, 2008.— 136 с.
9. Угорский, А.Э. О параметрических методах температурно-временной экстраполяции предела длительной прочности [Текст] / А.Э. Угорский // Проблемы прочности.— 1986. № 1.— С. 40–43.
10. Le May, I. Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data [Текст] / Iain Le May // Journal of Engineering Materials and Technology.— 1979. Vol. 101, № 4.— P. 326–330.



УДК 66.047.75

*Е.С. Васильева, С.В. Кидалов,
С.Н. Шевырталов, Т.С. Кольцова*

ПОЛУЧЕНИЕ И СТРУКТУРА ПОРОШКОВ МЕДИ, ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННОЙ ДЕТОНАЦИОННЫМИ НАНОАЛМАЗАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РАСПЫЛЕНИЯ РАСТВОРОВ

Одно из направлений современной технологии — создание композиционных материалов с требуемым сочетанием свойств компонент, образующих композит. Уникальное сочетание рекордных значений твердости, теплопроводности и химической стойкости алмаза сделали этот материал одним из привлекательных компонентов для создания композитов. В последние годы результаты исследований и коммерческая доступность наноалмазов детонационного синтеза (ДНА) определили развитие нанотехнологии композиционных материалов на основе ДНА [1]. При этом особое внимание уделяется композиционным материалам на основе наноалмаза и цветного металла. Так, например, в [2, 3] сообщается об улучшении механических свойств никелевых покрытий при введении наноалмазов, в [4] — о получении композитов на основе алюминия со значением микротвердости выше 10 ГПа, в [5] — о получении и свойствах композитов «наноалмаз — медь», приготовленных механическим перемешиванием, для чего использовались порошок меди и наноалмаза.

В предлагаемой статье изложены первые результаты получения нанокompозита «алмаз — медь» методом распыления суспензии ДНА [1] и растворов солей меди [6]. Добавление ДНА как структурообразующего фактора должно обеспечить дисперсионное упрочнение материала, тем самым повысить его прочностные характеристики и улучшить физические свойства.

Материалы и методики

В работе использовались ДНА, полученные методом детонационного синтеза, со средним размером кристаллитов 3–5 нм. ДНА использовался в виде одностичных водных суспензий [7]. Распределение наноалмазов в суспензии по размерам определялось методом динамического рассеяния света; средний размер частиц составлял 4–6 нм.

Для введения ДНА в медную матрицу использовали метод распылительной сушки [8]. Последовательность действий включала в себя: приготовление водного раствора солей, содержащих частицы ДНА ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и суспензия ДНА); получение композиционного порошка методом распылительной сушки водного раствора смеси; термическую обработку, чтобы удалить влагу и летучие компоненты, с получением порошка оксидов; восстановление оксидного порошка (CuO) в атмосфере водорода.

Установка для получения нанокompозиционных порошков методом распыления растворов включает: систему подачи воздуха с электрическим нагревателем, обеспечивающую концентрический ввод горячего воздушного потока вокруг распылительного сопла; распылительный цилиндр; циклон для выделения частиц продукта из газового потока; емкость для сбора высушенного продукта.

В результате экспериментов были получены образцы нанокompозиционного порошкового материала на основе меди, содержащего 0,5, 1 и 5 масс. % ДНА.

Восстановление оксида меди, получаемого в результате описанного процесса, проводилось в атмосфере водорода при температуре 300–500 °С при времени отжига около 2 часов.

Микроскопические исследования были проведены на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) двух типов — Leo DSM 982 Gemini и JEOL JSM-7500F.

Для определения пикнометрической плотности порошков использовался прибор Ultracipnometer 1000 Quantachrom (США). Условия измерений: продувка гелием — 30 мин, количество пробегов — 10.

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлена схема установки для получения порошков «медь–ДНА» из растворов солей.

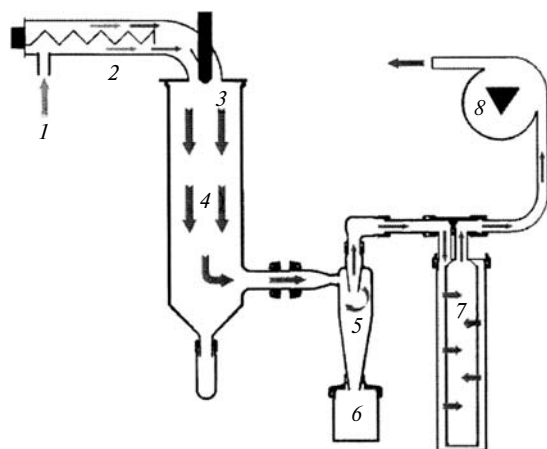


Рис. 1. Схема распылительной сушилки:

1 — вход воздуха; 2 — электрический нагреватель воздуха; 3 — концентрический ввод горячего воздушного потока вокруг распылительного сопла; 4 — распылительный цилиндр; 5 — циклон для выделения частиц продукта из газового потока; 6 — емкость для сбора высушенного продукта; 7 — выходной фильтр; 8 — аспиратор для прокачки воздуха через систему

Сразу после получения порошки на основе диоксида меди имеют губчатую структуру и широкое или бимодальное распределение по размерам.

По результатам рентгенофазового анализа частицы состоят из оксида меди; ДНА не детектируется вследствие его малой концентрации

в готовом порошке и ультра малого размера частиц, что соответствует рентгеноаморфному состоянию. Однако исследования методом электронно-дисперсионного анализа показывают наличие углерода в частицах.

После восстановительного отжига в атмосфере водорода наблюдалось частичное оплавление в структуре отдельных частиц, несмотря на то, что температура отжига значительно ниже температуры плавления компактной меди. При этом, как видно из рис. 2, количество и размер пор в частицах отличается для порошков с различной концентрацией ДНА: в структуре порошков до восстановления с увеличением концентрации ДНА от 0,5 до 5 масс. % повышается рыхлость и наличие крупных пор.

Эффект оплавления поверхности приводит к образованию закрытых пор, что подтверждают данные сканирующей микроскопии и пикнометрической плотности. При этом структура оплавленного порошка при содержании наноуглерода до 1 масс. % (см. рис. 1) более упорядоченная, дендритная, оплавление происходит равномерно, а пористость имеет открытый характер. При увеличении содержания ДНА до 5 масс. % наблюдается локальное оплавление агломератов в структуре частиц, причем остаются неупорядоченно расположенные крупные поры на поверхности и во внутричастичном пространстве.

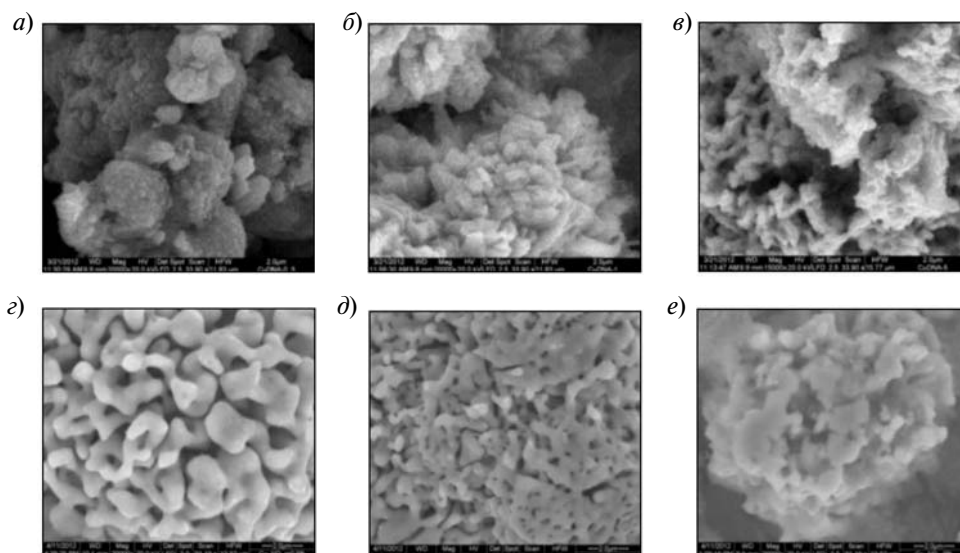


Рис. 2. Изображения в сканирующем электронном микроскопе наноконпозиционных порошков после восстановительной (в, д, е) и невосстановительной (а, б, в) обработки. Содержание ДНА в порошках 0,5 (а, в), 1 (б, д) и 5 (в, е) масс. %. Масштаб: каждый фрагмент на рисунке соответствует 10×10 мкм

В полученных порошках была определена зависимость пикнометрической плотности от концентрации ДНА. При оплавлении частиц в процессе восстановления меди в закрытых порах могут содержаться конденсированные пары воды. Это подтверждает то, что полученные после отжига значения пикнометрической плотности для порошков с различной концентрацией наноалмаза ниже теоретических в среднем на 10 %. Существенное увеличение плотности для образца с 1 % ДНА наблюдается после двукратного отжига в атмосфере водорода. В результате длительного отжига поры открываются, и происходит восстановление оксида меди. Однако, несмотря на видимую большую рыхлость структуры частиц, полученных при большей концентрации наноалмаза, значения пикнометрической плотности для образцов с 5 масс. % ДНА выше и стремятся к теоретическим значениям быстрее, чем для частиц с меньшей концентрацией.

Как видно из рис. 3, восстановительная термообработка приводит к уменьшению среднего размера частиц для порошков с высокой концентрацией ДНА, однако приводит и к появлению некоторого количества крупных агломератов.

Для порошков с меньшей концентрацией отжиг сокращает количество ультрадисперсной фазы и приводит к уменьшению размеров частиц в интервале размеров от 10 до 15 мкм за счет оплавления поверхности и спекания субмикронных агломератов в составе частиц. Распределение частиц по размерам нормализуется, при этом ярко выраженная бимодальность для частиц с минимальной концентрацией ДНА остается и после восстановления. Средний же размер частиц, определенный по максимуму распределе-

ния, для порошков с большей концентрацией ДНА выше для всех полученных образцов.

Исследованная в работе методика может быть использована для получения способами порошковой металлургии материалов с равномерным распределением нанодисперсного компонента.

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность получения композиционных порошков на основе системы «медь — детонационные наноалмазы» при содержании ДНА до 5 масс. % путем спрейной сушки суспензии ДНА в водном растворе нитрата меди.

Композиционные порошки, полученные методом термохимической обработки, имеют дендритную форму с равномерным распределением наноалмазов в медной матрице.

Высокоразвитая поверхность получаемых порошков при термообработке приводит к образованию большого количества закрытых пор, что сильно портит свойства материала при компактировании. Поэтому требуется проводить многоступенчатую термообработку, чтобы эффективно удалять конденсат и адсорбированные газы из межчастичного пространства.

Равномерное распределение ДНА в медной матрице позволит получить высокие физико-механические, электрические и другие свойства композитов, приготовленных из этих порошков.

Авторы благодарны А.Я.Вулю и О.В.Толочко за предложение темы и полезные обсуждения.

Работа частично (С.В. Кидалов) выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12–08–00174–а), контракта ГК 16.470.11.0216 и при поддержке министерства науки и образования Российской Федерации.

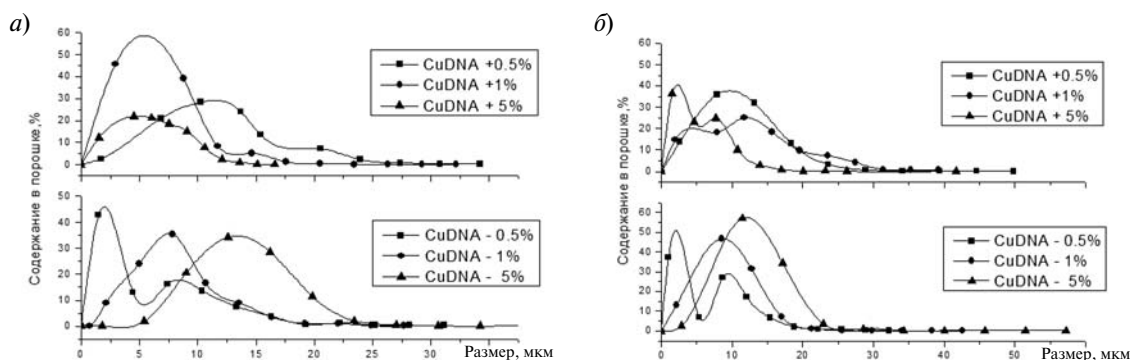


Рис. 3. Экспериментальные зависимости размеров частицы после восстановительной (а) и невосстановительной (б) обработки при разных содержаниях наноалмаза (0,5, 1 и 5 масс. % ДНА) для двух разных, но одинаково приготовленных партий материала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуль, А.Я. Детонационные наноалмазы: технология, свойства и применения [Текст] / А.Я. Вуль, А.Е. Алексенский, А.Т. Дидейкин. — «Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Нанонаука и нанотехнологии». — М.: Издательский дом МАГИСТР-ПРЕСС, 2009. — С. 832–857.
2. Petrov I., Nickel galvanic coatings co-deposited with fractions of detonation nanodiamond [Текст] / I. Petrov, P. Detkov, A. Drovosekov [et al.] // Diamond & Related Materials. — 2006. Vol. 15. — P. 2035–2038.
3. Wang, L. Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings [Текст] / L. Wang, Y. Gao, O. Xue, H. Liu, T. Xu // Materials Science and Engineering. — 2005. — Vol. 390. Is. 1–2. — P. 313–318.
4. Molian, P. Laser shock wave consolidation of nanodiamond powders on aluminum 319 [Текст] / P. Molian, R. Molian, R. Nair // Applied Surface Science. — 2009. Vol. 255. — P. 3859–3867.
5. Hanada, K. Further studies on copper nanocomposite with dispersed single-digit-nanodiamond particles [Текст] / K. Hanada, K. Yamamoto, T. Taguchi [et al.] // Diamond & Related Materials. — 2007. Vol. 16. — P. 2054–2057.
6. Lee, D.W. Aluminum Oxide Dispersion Strengthened Copper Produced by Thermo-Chemical Method [Текст] / D.W. Lee, O. Tolochko, C.J. Choi, B.K. Kim // Powder Metallurgy. — 2002. Vol. 45, № 3. — P. 267–270.
7. Aleksenskiy, A.E. Deagglomeration of Detonation Nanodiamonds [Текст] / A.E. Aleksenskiy, E.D. Eydelman, A.Ya. Vul' // Nanoscience and Nanotechnology Letters. — 2011. Vol. 3. — P. 68–74.
8. Толочко, О.В. Механические свойства нанопорошкового сплава WC-10Co [Текст] / О.В. Толочко, В.К. Ким // Научно-технические ведомости СПбГТУ. — 2003. №3 (33). — С. 74–77.

УДК 66.047.75

Пугуанг Цзи, И.А. Сизова, О.Г. Климова

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Дисперсноупрочненные медные сплавы традиционно широко используются в сварочном производстве, в частности в качестве электродов для контактной сварки, токоподводящих наконечников электродуговой сварки, сопел плазменных горелок и т. п. [1, 2]. Для данной области применения материалу необходимы высокие прочность, жаропрочность, износостойкость, твердость при одновременно высоких значениях электро- и теплопроводности и др. [3, 4].

Достижение высоких механических характеристик медных сплавов без существенной потери электрической и тепловой проводимости возможно, если применять комплексную термическую обработку с использованием старения. Выделение мелкодисперсных частиц из твердого раствора значительно упрочняет медный сплав [3, 5]. Однако длительная эксплуатация таких сплавов при температурах выше тем-

пературы старения приводит к росту частиц и снижению механических свойств.

Для упрочнения медных сплавов используют методы дисперсного упрочнения путем внедрения в медную матрицу неметаллических включений, таких, как оксиды. Очевидно, что основное влияние на механические свойства этих материалов будут оказывать такие параметры, как размер включений, степень гомогенности структуры и чистота материала. Процесс литья при получении композиционных материалов с гомогенным распределением мелкодисперсных частиц оксидов [1] обычно имеет серьезные ограничения из-за существенной разности плотностей. В последнее время порошковая металлургия рассматривается как наиболее перспективное направление для получения дисперсноупрочненных материалов с гомогенной структурой [1, 3, 5].

Большое внимание уделяется процессу внутреннего окисления, который считается наиболее удобным для получения нанопорошков состава $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ [1, 6, 7]. Размер частиц Al_2O_3 в порошках на основе меди, по данным различных зарубежных авторов, колеблется от 3 до 12 нм, от 10 до 100 нм и даже до 1000 нм. При этом достигается высокая однородность в распределении частиц [7–9]. Наиболее оптимальным процессом с высоким выходом продукта является комплексное использование механического измельчения с внутренним окислением [1, 2, 8, 10].

Несмотря на высокие результаты указанных методов, существуют еще несколько способов получения наноструктурированного композиционного материала типа «медь — оксид алюминия», который обладает уникальным комплексом физико-механических свойств. В этой статье излагается инновационный подход для получения наноструктурированного композиционного материала «медь — оксид алюминия», а именно — метод термического восстановления солей.

Материалы и методика эксперимента.

Методика получения порошков $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$

Процесс приготовления порошка включал следующие стадии:

1) приготовление 50 %-ного водного раствора, содержащего соли нитратов меди и алюминия ($\text{Cu} \cdot (\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) марки ХЧ;

2) получение исходного порошка методом спрейной сушки водного раствора солей ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) и ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) в струе воздуха, нагретого до 200–220 °С;

3) двухступенчатая термическая обработка с целью удаления влаги и летучих компонентов с получением порошка, состоящего из оксидов меди и алюминия (отжиг в воздушной среде с целью разложения солей и получения соответствующих оксидов);

4) восстановление оксидного порошка в атмосфере водорода.

При приготовлении раствора соотношение концентраций соответствующих солей в водном растворе рассчитывалось в соответствии с требуемым содержанием металлических компонентов получаемого сплава: Cu — (0,2–2) вес. % Al_2O_3 . В целом процесс получения композиционного порошка $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ подробно представлен в [11].

В данной работе процесс компактирования порошков включал в себя следующие стадии: одноосное прессование с различным давлением в интервале от 70 до 1000 МПа, нагрев в восстановительной атмосфере и горячее прессование при температурах 850 и 900 °С.

Электронномикроскопические исследования выполняли с помощью растрового микроскопа (Leo DSM 982 Gemini и JEOL JSM-7500F), а рентгеноструктурный анализ — на дифрактометре D8 Advance Bruker в $\text{CuK}\alpha$ монохроматизированном излучении (40 кВ, 40 мА). Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили при скорости нагрева 10 °С/мин и при пропускании воздуха 40 см³/мин в корундовых тиглях с помощью анализатора Netzsch STA 449C. Для ТГА использовали образцы чистого исходного порошка и образцы гибридного материала массой 12 ± 1 мг.

Результаты эксперимента

На рис. 1 представлена микрофотография частиц исходного порошка после спрейной сушки раствора солей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ горячим воздухом.

Частицы диаметром 20–80 мкм имеют округлую форму; зачастую внутри полученных частиц наблюдаются пустоты (рис. 1, а), образование которых может быть объяснено внутренней усадкой каплей в процессе сушки. Согласно результатам рентгенофазового анализа материал находится в аморфном состоянии (рис. 2, а).

По данным термогравиметрического анализа, а также по данным рентгенофазового анализа в результате проведенных экспериментов по подбору режима получения оксидных порошков была установлена двухступенчатая термическая обработка оксидного порошка при 400 °С в течение 3 ч (для разложения солей и формирования оксидного порошка $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 1, б)) и при 850 °С в течение 0,5 ч. Термообработка порошка при 850 °С проводилась для кристаллизации необходимой структуры частиц окиси алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с получением порошка $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

После проведения указанной обработки проводилось восстановление порошка $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в атмосфере водорода при температуре 200 °С в течение 1 ч (рис. 2, в), в результате чего на дифрактограмме практически полностью исчезает пик оксида меди. Поэтому для получения более

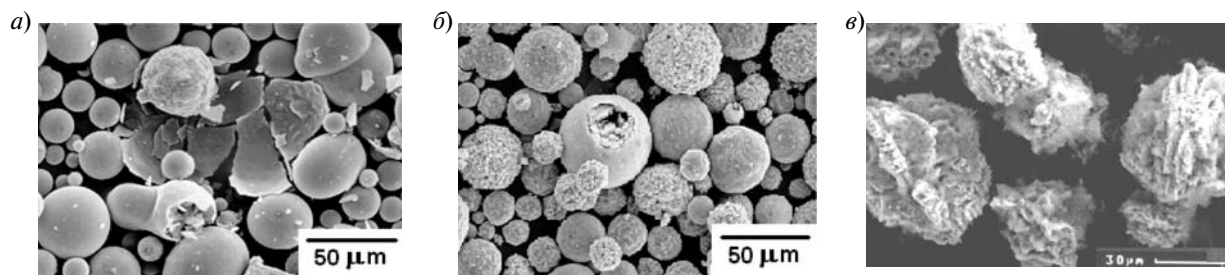


Рис. 1. Микрофотографии частиц порошка, полученного после спрейной сушки раствора солей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (а), отжига (б) и восстановления полученного порошка (в)

надежных результатов был выбран режим восстановления порошка $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в интервале температуры 300–350 °С в течение более 3 ч. Частицы $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ после восстановления имеют дендритную структуру.

Основная кривая прессования порошков с содержанием 2,0 и 1,1 вес. % Al_2O_3 представлена на рис. 3. Вследствие высокой пластично-

сти порошковой меди при относительно невысоких давлениях (до ~0,2–0,3 ГПа) плотность спрессованного образца растет достаточно интенсивно. Известно, что на этой стадии уплотнение в целом происходит без деформации частиц за счет перемещения частиц порошка в поры и пустоты (или за счет скольжения и перемещения частиц без их деформации).

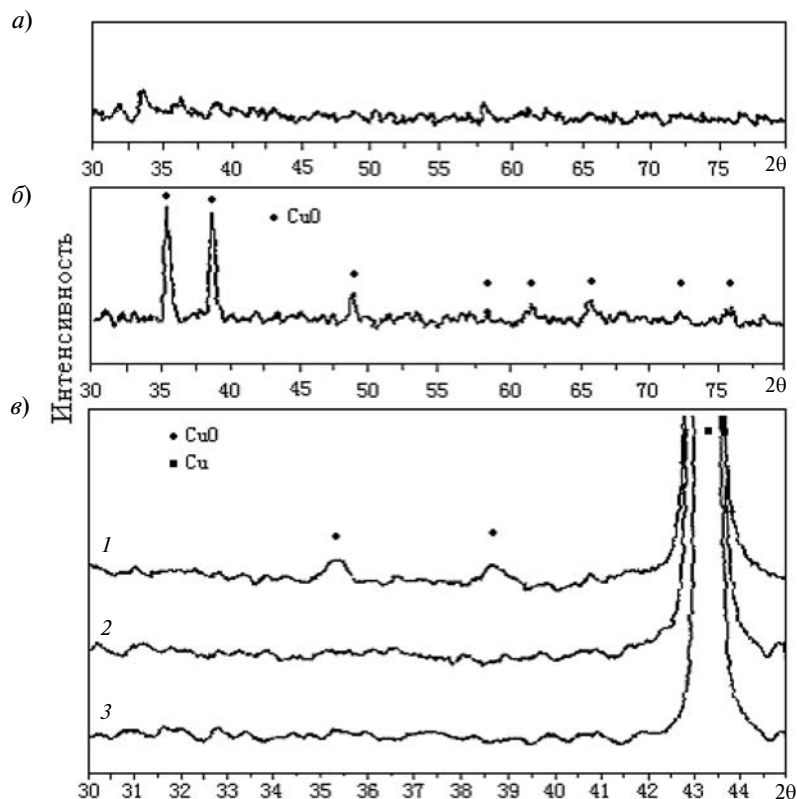


Рис. 2. Характерные дифрактограммы полученного исходного порошка после спрейной сушки (а), после двухступенчатой термической обработки (б) и после восстановительного отжига для получения порошка $\text{Cu}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (в). Восстановление производилось по режимам: 1 – 150 °С, 1 ч; 2 – 200 °С, 0,5 ч; 3 – 200 °С, 1 ч

С повышением давления (вторая стадия) объем пор в матрице понижается, и темп роста плотности значительно снижается, повышение плотности осуществляется в основном за счет пластической деформации частиц порошка в точках контакта. Поэтому при начале этой стадии можно определять предел текучести.

Уплотняемость порошков при прессовании может быть описана с помощью уравнения Шапиро — Котлова:

$$\ln(1/(1 - d_g)) = KP + A, \quad (1)$$

где d_g — плотность при давлении прессования P ; K и A — константы. Между константой K и пределом текучести (σ_Y) материала существует следующее соотношение, описанное уравнением Хеккеля [12]:

$$\sigma_Y = 1/(3K). \quad (2)$$

Это дает возможность оценить значение предела текучести для порошкового материала (см. табл.). Значения предела текучести будут завышенными из-за наклепа частиц при увеличении нагрузки прессования.

Повышение содержания оксида алюминия вызывает дополнительное упрочнение материала. Предел прочности увеличивается от 250 до 376 МПа при увеличении содержания алюминия от 0,56 до 2,01 %, при этом относительное удлинение падает от 27 до 18 %. Измеренный предел текучести хорошо соответствуют пределу текучести, определенному по результатам изучения свойств порошка, однако во всех случаях имеет несколько более низкие значения.

Нагрев и выдержка в течение 1 часа образцов перед горячим прессованием проводился в восстановительной атмосфере для дополнительно удаления окисной пленки с поверхности и из

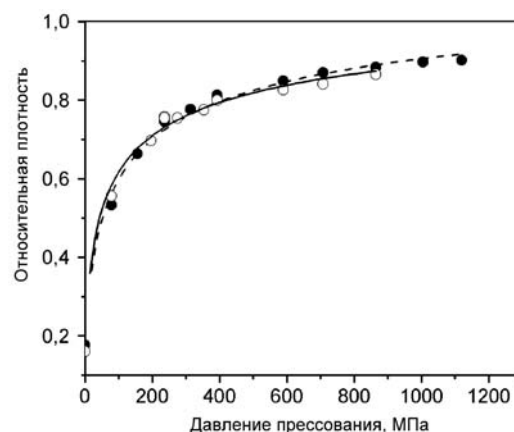


Рис. 3. Зависимость плотности от давления прессования:

- — порошок с содержанием 1,1 вес. % Al_2O_3 ;
- — порошок с содержанием 2,01 вес. % Al_2O_3

пор спрессованных образцов. Результаты измерения относительной плотности образцов в зависимости от давления прессования при температурах 850 и 900 °С приведена на рис. 4, а.

Увеличение давления горячего прессования при температуре 850 °С ведет к увеличению относительной плотности образцов до 97 % от теоретической при давлении прессования 500 МПа: при увеличении давления плотность образцов остается постоянной в пределах погрешности эксперимента и имеет тенденцию к понижению. На рис. 4, б представлены зависимости твердости образцов от их относительной плотности. Твердость по шкале *HRB* образца, горячепрессованного при 900 °С, во всех случаях меньше, чем при 850 °С при той же относительной плотности, что может быть связано со структурными изменениями, возможно, — с укрупнением частиц $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

**Свойства композиционного материала,
полученные из данных по уплотнению порошков и испытаний механических свойств**

Al_2O_3 масс. %	Расчет по уравнению (1)			σ_Y , МПа	σ_B , МПа	δ , %
	A	K , МПа ⁻¹	$\sigma_Y = 1/(3K)$, МПа			
0	1,27±0,09	$(2,2\pm0,2)\times10^{-3}$	151	—	—	—
0,56	1,16±0,07	$(1,44\pm0,09)\times10^{-3}$	231	204	251	30
1,12	1,27±0,06	$(1,05\pm0,07)\times10^{-4}$	335	318	376	27
2,00	1,18±0,03	$(9,5\pm0,6)\times10^{-4}$	348	—	398	18

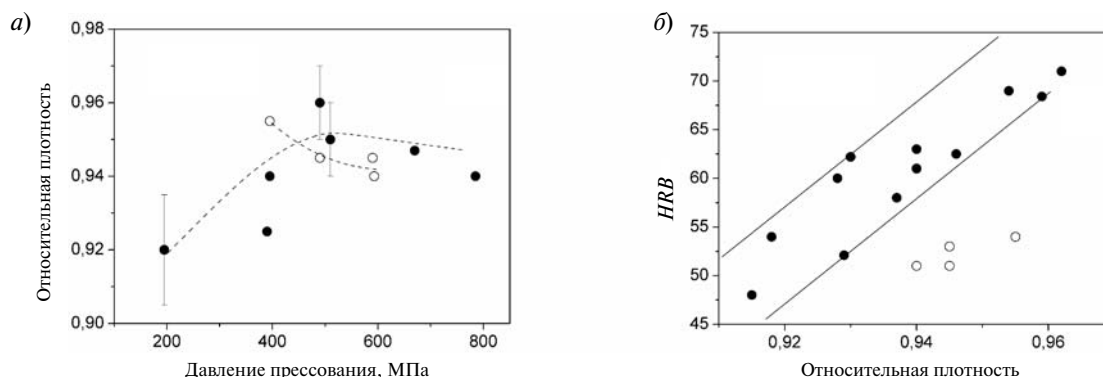


Рис. 4. Зависимость твердости образцов с 2 % γ - Al_2O_3 от давления горячего прессования (● — при $T = 850^\circ\text{C}$; ○ — при $T = 900^\circ\text{C}$)

При увеличении содержания оксида алюминия 0,3–2,0 % постепенно увеличиваются твердость и предел прочности образцов, соответственно в пределах 54–70 HRB и 230–400 МПа; электропроводность снижается до 83 % от электропроводности меди. Сравнение полученного материала с промышленными аналогами показало, что при одинаковом содержании оксида алюминия полученные образцы имеют более высокую электропроводность, но более низкие механические свойства, что может быть объяснено разницей в чистоте медной матрицы (не менее 99,7 % для полученных в работе сплавов) и в размерах упрочняющих частиц, а также модификацией оксида алюминия. В промышленных образцах, полученных методом внутреннего окисления, основной модификацией оксида является α - Al_2O_3 , а размер упрочняющих частиц лежит в интервале 6–12 нм [5, 7]. Однако отметим, что при более высоком содержании оксида полученный сплав показывает свойства, сравнимые с промышленными аналогами, что дает возможность рекомендовать полученный сплав для использования в сопоставимых условиях. Например, образец с содержанием 1,1 вес. % γ - Al_2O_3 после горячего прессования имеет электропроводность 93 % от электропроводности меди, а предел прочно-

сти — 376 МПа, в то время как у промышленного образца GlidCop® AL-15 [7] — соответственно 93 % и 392 МПа.

Основные результаты проделанных исследований можно сформулировать так:

1) предложен метод для получения композиционного порошка $\text{Cu}/\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$. Метод состоит из трех основных стадий: спрейной сушки водного раствора солей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$; последующего получения оксидного порошка путем термообработки (400°C , 3 ч + 850°C , 30 мин.); восстановления оксидного порошка в атмосфере водорода (300°C , 3 ч);

2) путем прессования, спекания и горячего прессования получены образцы дисперсно-упрочненного сплава с гомогенным распределением упрочняющих частиц γ - Al_2O_3 размером 30–40 нм в медной матрице высокой чистоты (более 99,94 вес. %);

3) при содержании оксида алюминия 0,2–2,0 вес. % образцы имеют электрическую проводимость не менее 80 % от стандарта для чистой меди (93 % для сплава с 1,1 % оксида) и повышенные механические характеристики: твердость до 70 HRB. Полученный материал сопоставим по механическим свойствам и электропроводности с промышленными сплавами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nadkarni, A.V. / A.V. Nadkarni, J.E. Synk. — Metals Handbook. — Powder Metallurgy ASM, Metals Park. — OH, 1984. — 711 p.
2. Орлов, Б.Д. Технология и оборудование контактной сварки [Текст]: Уч. для машиностроительных

вузов / Б.Д. Орлов, А.А. Чакалев, Ю.В. Дмитриев [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.

3. Groza, J. Heat-resistant dispersion-strengthened copper alloys [Текст] / J. Groza // Journal of Materials



Engineering and Performance.— 1992. Vol. 1. № 1.— P. 113–121.

4. **Groza, J.** Principles of particle selection for dispersion strengthened copper [Текст] / J. Groza, J. Gibeling // Material Science Engineering.— 1993. A171.— P. 115–125.

5. **Correia, J.B.** Strengthening in rapidly solidified age hardened CuCr and CuCrZr alloys [Текст] / J.B. Correia, H.A. Davies, C.M. Sellars // Acta Materialia.— 1997. Vol. 45. № 1.— P. 177–190.

6. **Tian, B.** Fabrication of the nanometer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite by internal oxidation [Текст] / B. Tian, P. Liu, K. Song [et al.] // Materials Science and Engineering.— A. 2006. Vol. 435–436.— P. 705–710.

7. **Solomon, R.R.** GlidCop® DSC properties in the temperature range of 20–350 °C [Текст] / R.R. Solomon, J.D. Troxell, A.V. Nadkarni // Journal of Nuclear Materials.— 1996. Vol. 233–237, № 1.— P. 542–546.

8. **Rajkovic, V.** The Influence of Powder Particle Size on Properties of $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ [Текст] / V. Rajkovic, D. Bozic,

M. Popovic, M.T. Jovanovic // Science of Sintering.— 2009. Vol. 41.— P. 185–192.

9. **Ritasalo, R.** The microstructural effects on the mechanical and thermal properties of pulsed electric current sintered $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ composites [Текст] / R. Ritasalo, X.W. Liua, O. Söderberg [et al.] // Procedia Engineering.— 2011. Vol. 10.— P. 124–129.

10. **Ying, D.Y.** Processing of $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling [Текст] / D.Y. Ying, D.L. Zhang // Materials Science and Engineering.— A. 2000. Vol. 286. Is. 1.— P. 152–156.

11. **Lee, D.W.** Aluminium oxide dispersion strengthened copper produced by thermochemical process [Текст] / D.W. Lee, O. Tolochko, C.J. Choi, B.K. Kim // Powder Metallurgy.— 2002. Vol. 45. № 2.— P. 267–270.

12. **Domingez, O.** The relationship between consolidation behavior and particle size in Fe nanometric powders [Текст] / O. Domingez, M. Phillippot, J. Bigot // Scripta metallurgica et materialia.— 1995.— Vol. 32.— № 1.— P. 13–17.

УДК 537.523:539.25

*М.В. Мишин, С.Е. Александров,
И.В. Кретушева, И.К. Боричева*

ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР МИКРОМЕТРОВОГО РАЗМЕРА ИЗ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Исследования процессов образования разнообразных нанообъектов играют важную роль в развитии технологий микро- и нанoeлектроники, а также других отраслей науки и техники. Нанопорошки различных материалов находят широкое применение для получения композитных материалов, керамики, катализаторов и т. д. Особый интерес представляют процессы плазмохимического осаждения нанопорошков в низкотемпературной плазме атмосферного давления [1–5].

В ходе обзора методов плазмохимического осаждения наноматериалов обнаружено возникновение разнообразных двух- и трехмерных образований из получаемых частиц, что свидетельствует об интенсивных процессах самоорганизации, протекающих одновременно с синтезом частиц.

В нашей работе исследовались закономерности образования на поверхности монокристаллического кремния упорядоченных структур из наночастиц диоксида кремния, получаемых в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда при атмосферном давлении.

Методика эксперимента

Наночастицы диоксида кремния были получены в плазме атмосферного давления ВЧ-разряда с частотой 13,56 МГц в системе с плоскопараллельными электродами. На рис. 1 представлена схема реактора. Мощность разряда поддерживалась постоянной на уровне 10 Вт. Реагентом служил тетраэтоксисилан (ТЕОС). Расход плазмообразующего газа гелия изменялся в интервале 100–720 см³/мин, расход газа-носителя гелия через испаритель составлял

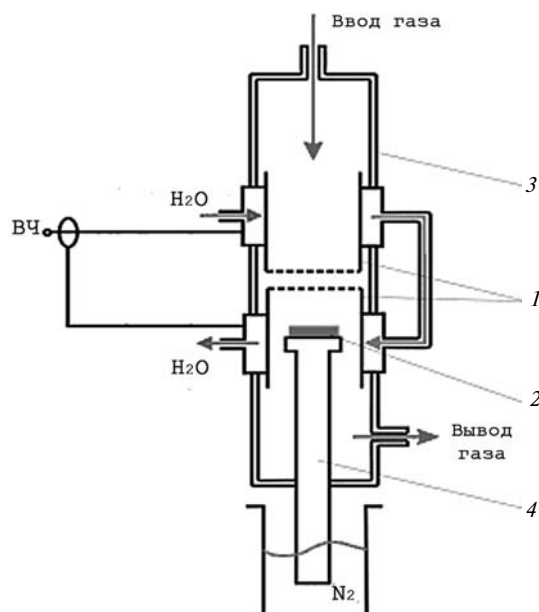


Рис. 1. Схематическое изображение реактора:

1 — электроды, 2 — подложка, 3 — корпус,
4 — охлаждаемый столик

100–250 см³/мин. Температура испарителя варьировалась в интервале 20–40 °С.

Смесь реагента с газом-носителем попадала в зону синтеза, расположенную между плоскими водоохлаждаемыми электродами 1, расстояние между которыми варьировалось в пределах 0,5–5 мм. Продукт синтеза осаждался на подложке 2. Подложка располагалась на столике 4, который при необходимости охлаждался жидким азотом. Расстояние между электродом и подложкой можно было менять в пределах 10–80 мм. Корпус прибора 3, изготовленный из оптического кварцевого стекла, позволял визуально наблюдать морфологию разряда и регистрировать спектр оптического излучения.

Продукт синтеза — наночастицы диоксида кремния — был исследован посредством растрового электронного микроскопа (РЭМ) Supra 55 VP с использованием детектора вторичных электронов.

Степень превращения реагента в плазме оценивалась посредством инфракрасной спектроскопии газовой смеси на выходе из реактора при помощи ИК Фурье-спектрометра ФСМ-1201.

С целью количественной оценки сложности образующихся поверхностных структур, которые представляют собой сложные двухмерные

образования, обладающие свойством самоподобия, определялась их фрактальная размерность. Такие структуры, сформированные из наночастиц на подложке монокристаллического кремния, имели дробную метрическую размерность Хаусдорфа — Безинковича [6], которая рассчитывалась с помощью специализированного программного продукта Fractal analysis system 3.4.7.

Результаты

По результатам ИК-спектроскопии было установлено, что степень превращения TEOS в плазме составила 85–98 % в исследуемых диапазонах технологических параметров.

Анализ РЭМ изображений поверхности подложки с осажденными частицами показал, что получаемый продукт синтеза в основном состоял из наночастиц размером 8–16 нм, образующих агломераты. В некоторых случаях наблюдалось образование отдельных частиц с ярко выраженной сферической формой размером от 0,5 до 1,5 мкм. Однако в настоящей работе механизмы их образования не рассматривались, а их присутствие исключалось из фрактального анализа образующихся продуктов.

Характер агломерации мелких частиц, а также его изменение сильно зависели от технологических параметров эксперимента. При варьировании технологических параметров фрактальная размерность образующихся структур изменяла значения от 2 до 1,45.

Значение фрактальной размерности равное 2 соответствовало случаю агломерации, когда частицы образовывали двухмерную равномерную пленку, неоднородность по высоте которой соизмерима с размерами этих частиц. Такую агломерацию в дальнейшем будем условно называть однородной пленкой. Типичное РЭМ изображение получаемого осадка с фрактальной размерностью 1,92 показано на рис. 4, б.

Уменьшение фрактальной размерности соответствовало случаю, когда наночастицы агломерировали с образованием двухмерных объектов, представляющих собой области на поверхности подложки, имеющие характерные размеры в микрометровом диапазоне. При этом вблизи таких объектов наблюдалось ярко выраженное обеднение поверхности подложки наночастицами (см. рис. 2). Фрактальная размерность таких осадков могла уменьшаться до значения 1,45.

На рис. 3 представлен график зависимости фрактальной размерности синтезируемого осадка от времени осаждения. Из представленных данных видно, что за первые 10 минут синтеза образовывалась фрактальная структура, сильно отличающаяся от однородной пленки и имеющая размерность 1,66. При увеличении времени осаждения до 20 минут размерность фрактальных структур уменьшалась до 1,45, а при длительности осаждения 30 минут — возрастала до значения 1,95, что соответствовало двухмерной однородной пленке.

На рис. 4, а показан график зависимости фрактальной размерности получаемых осаждаемых продуктов синтеза от температуры испарителя, на котором можно выделить три характерных участка. Первый участок, соответствующий интервалу температур испарителя 20–22 °С, характеризуется падением размерности полученных структур от 2 до 1,55. Второму участку ($T_{\text{исп}} = 22\text{--}26\text{ °С}$) соответствует практически неизменная размерность. При дальнейшем повышении температуры испарителя до 33 °С размерность плавно возрастает от 1,55 до 1,65.

Зависимость фрактальной размерности осаждаемых структур от суммарного расхода газа, подаваемого в реактор (рис. 5), выражается кривой с минимумом. На графике можно также выделить три характерных участка. На первом, соответствующем увеличению общего расхода газов до 250 см³/мин, фрактальная размерность уменьшается от 1,97 до 1,55; в диапазоне расходов газов 250–550 см³/мин ее значение остается практически постоянным, а при расходах газов выше 550 см³/мин фрактальная размерность увеличивается до значения 1,95.

На каждой из трех зависимостей фрактальной размерности от технологического параметра (см. рис. 3, 4, а, 5, а) нанесены большие точки, соответствующие условиям образования «классических» фракталов с размерностью порядка 1,7 (рис. 5, б, в). Появление таких фрактальных структур носит стохастический характер.

Модель формирования фрактальных структур

Для объяснения наблюдаемых закономерностей и явлений можно предложить следующую эмпирическую модель, в соответствии с которой этапы процесса образования фрак-

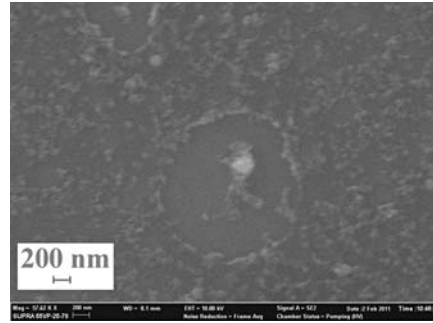


Рис. 2. РЭМ-изображение обедненной области поверхности вблизи формирующийся структуры.

Условия эксперимента: общий расход гелия — 250 см³/мин; время осаждения — 15 мин

талов на поверхности схематично изображены на рис. 6.

На поверхность из области реакции поступают наночастицы с большим отрицательным зарядом, вплоть до 10²–10⁴ Кл [7]. Так как диоксид кремния является диэлектриком и проводимость таких частиц низка, стекание с них заряда обусловлено наличием поверхностных ловушек и занимает значительное время, много большее времени прихода на поверхность следующих заряженных частиц. Процесс разрядки носит неоднородный характер, поэтому частицы в процессе миграции локализуются в области пониженного потенциала. Таким образом, начинается рост фрактальной структуры, сопровождающийся понижением ее размерности.

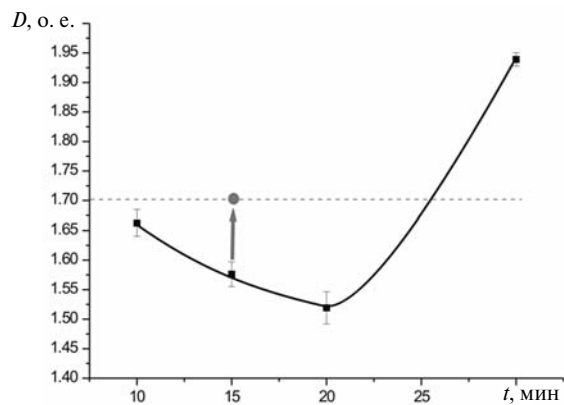


Рис. 3. График зависимости фрактальной размерности от времени осаждения. Условия эксперимента: общий расход гелия — 350 см³/мин, температура испарителя — 26 °С

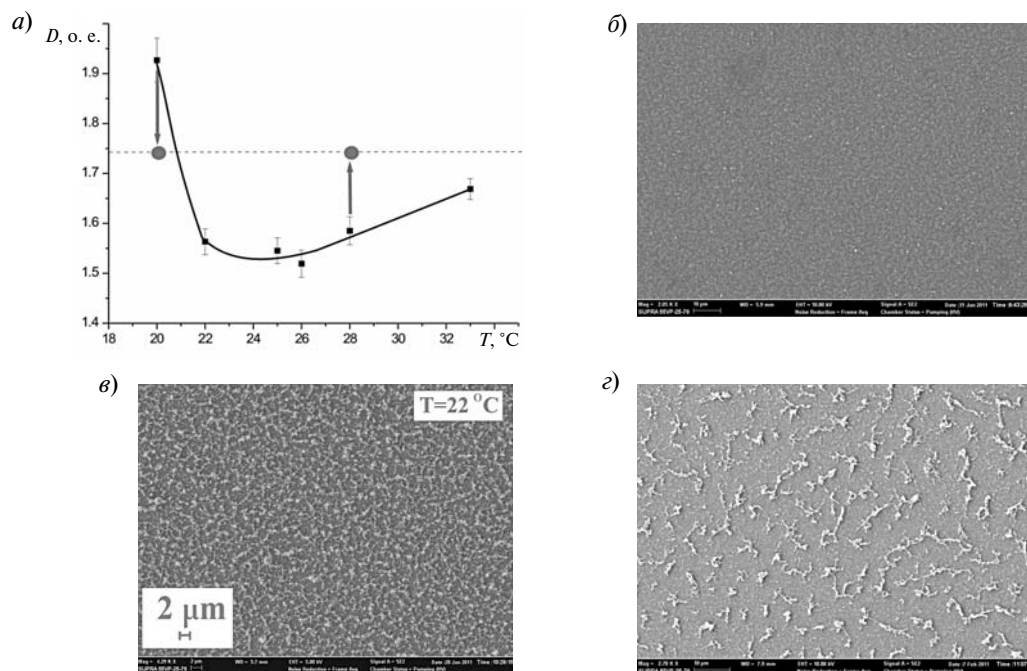


Рис. 4. График зависимости фрактальной размерности от температуры испарителя. (а, б-в) и РЭМ-изображения поверхности образцов, полученных при разных температурах испарителя, и, соответственно, с фрактальными размерностями d 1,92, (б), 1,56 (в), 1,65 (г).

Условия эксперимента: общий расход гелия — 250 см³/мин; расход гелия через испаритель — 100 см³/мин; время осаждения — 20 мин; расстояние до газоразрядного промежутка — 20 мм

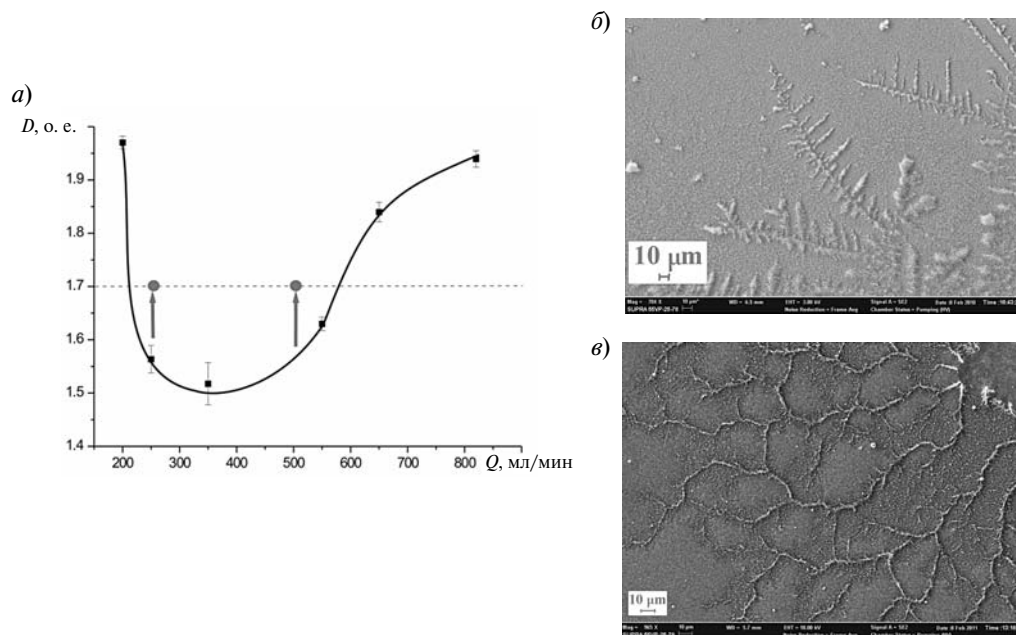


Рис. 5. График зависимости фрактальной размерности от суммарного расхода газа (а). РЭМ-изображения поверхности фрактальных структур с размерностью, близкой к 1,7, на поверхности однородной пленки при общем расходе гелия 500 см³/мин (б) и 250 см³/мин (в).

При этом расход гелия через испаритель — 100 см³/мин; температура испарителя — 20 °С, время осаждения — 15 мин

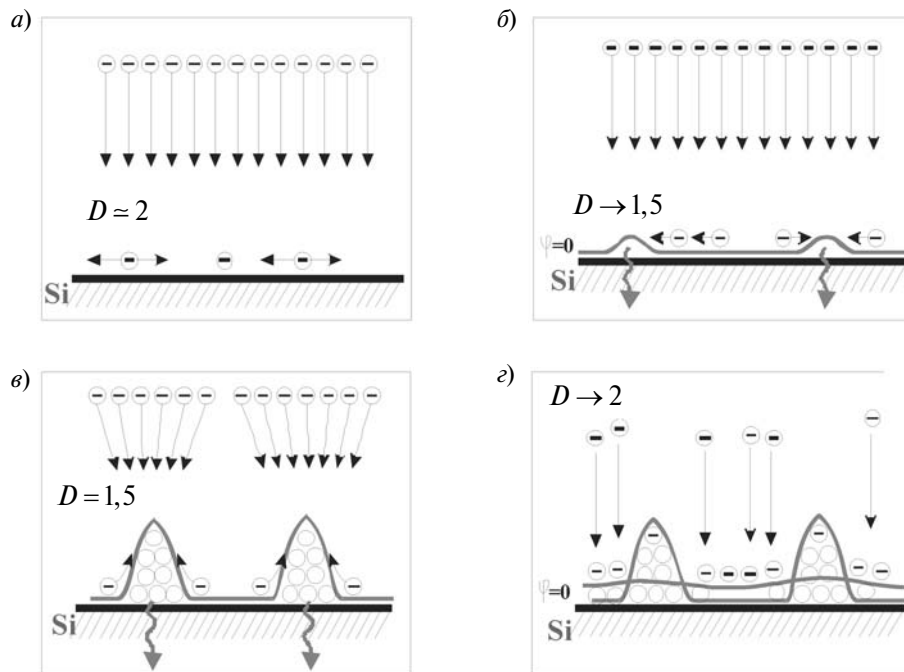


Рис. 6. Этапы образования фракталов на поверхности

Рост таких структур наблюдается в условиях, соответствующих ниспадающим ветвям графиков зависимости, изображенных на рис. 3, 4, а и 5, а.

Участки графиков, соответствующих слабому изменению размерности вблизи значения 1,5, вероятнее всего, соответствуют отсутствию образования новых фрактальных структур и характеризуют увеличение высоты уже образовавшихся структур. Вертикальный рост продолжается до тех пор, пока размер не будет ограничиваться стеканием заряда с поверхности вновь прибывающих частиц. Направленная диффузия в этом случае уменьшается вследствие выравнивания потенциала поверхности. Вновь растет геометрически однородная пленка, частицы заполняют области между кластерами. Это соответствует восходящей ветви на графиках (рис. 3, 5, а), где фрактальная размерность стремится к 2.

Наблюдаемые «классические» фракталы с размерностью 1,7 (рис. 5, б, а) можно связать с электрическим пробоем формируемой пленки. Скорость поступления заряда на поверхность превышает скорость поверхностной диффузии заряженных частиц. Наличие дефектов в кремнии может вызывать неоднородность электрического поля, приводя к электрическому пробое

в месте расположения дефекта и, соответственно, к аномальному локальному изменению проводимости пленки и росту фрактала диффузионно-ограниченной агрегации.

Заключение

В нашей работе в плазме ВЧ-разряда атмосферного давления были получены фрактальные структуры на кремневой подложке, образованные наночастицами диоксида кремния.

Размер наночастиц, формировавших структуры, составлял 8–16 нм. Фрактальная размерность полученных структур в зависимости от условий процесса синтеза варьировалась в интервале 1,45–2. Предполагается, что образование фракталов «классического вида» с размерностью 1,7, было следствием пробойных явлений на поверхности самой подложки.

Выражаем благодарность господину Н. Sasaki за предоставленную специализированную программу Fractal analysis system 3.4.7 для расчета фрактальной размерности двухмерных структур [8].

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alexandrov, S.** Atmospheric pressure plasma enhanced CVD of Fe nanoparticles [текст] / S. Alexandrov, I. Kretusheva, M. Mishin // ECS Transactions.— 2009. Vol. 25. — P. 943–951.
2. **Chen, C.** Continuous generation of TiO₂ nanoparticles by an atmospheric pressure plasma-enhanced process [текст] / C. Chen, H. Bai, H. M. Chein // Aerosol Science and Technology. — 2007. Vol. 41.— P. 1018–1028.
3. **Zhu, H.** RF plasma synthesis of YBa₂Cu₃O_{7-x} powders [текст] / H. Zhu, Y.C. Lau, E. Pfender // Journal of Superconductivity.— 1990. Vol. 3, № 2.— P. 171–175.
4. **Barankin, M.D.** Synthesis of nanoparticles in an atmospheric pressure glow discharge [текст] / M.D. Barankin, Y. Creyghton, A. Schmidt // Journal of Nanoparticle Research.— 2006. Vol. 8.— P. 511–517.
5. **McIlroy, D.N.** Nanoparticle formation in micro-channel glass by plasma enhanced chemical vapor deposition [текст] / D.N. McIlroy, J. Huso, Y. Kranov [et all.] // Journal of Applied physics.— 2003. Vol. 93, № 9.— P. 5643–5649.
6. **Benoit, B.** The Fractal Geometry of Nature [Текст] / Benoit B. Mandelbrot / Henry Holt and Co. Times Books.— 1983.— 480 с.
7. **Fortov, V.E.** Dependence of the dust-particle charge on its size in a glow-discharge plasma [Текст] / V.E. Fortov, A.P. Nefedov, V.I. Molotkov, M.Y. Poustylnik, V.M. Torchinsky // Phys. Rev. Lett.— 2001. Vol. 87. P. 205002–1–4.
8. **Sasaki, H.** Method for evaluation of Japanese lawn grass (*Zoysia japonica* Steud.) ecotypes for different purposes [Текст] / H. Sasaki, S. Shibata, T. Hatanaka // Bull. Natl. Grassl. Res. Inst.— 1994. Vol. 49.— P. 17–24.

УДК 621.9.048.7

*Г.А. Туричин, И.А. Цибульский,
М.В. Кузнецов, Д.В. Шелюховская*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИЯ В МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При лазерно-дуговой сварке сплавов, особенно легких сплавов на основе алюминия, проблема расчета параметров сварного соединения, предсказания его химического состава и механических свойств достаточно сложна в силу необходимости учитывать удаления легколетучих добавок (таких, как магний), 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 у основного металла, в основном зависят от содержания магния в сплаве. С увеличением содержания магния возрастает прочность сплава.

Для повышения эффективности разработки технологии лазерно-дуговой сварки применена компьютерная модель процесса. Модель постро-

ена на основе технологически приемлемых 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 является развитие автоколебаний парогазового канала и сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением [3, 4].

Многочисленные экспериментальные результаты подтверждают, что процесс сварки с глубоким проплавлением не является стационарным даже при стабилизации всех внешних факторов, влияющих на сварочную ванну [5]. В частности, высокоскоростная киносъемка лазерной сварки составных образцов из металла и оптически прозрачного материала [6] показала непрерывное изменение формы канала, ква-

зипериодическое движение зоны с максимальной яркостью по глубине канала, а также наличие таких зон на задней его стенке. Съемка плазменного факела показала также наличие его квазипериодических флуктуаций [7].

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 [8].

Исследования проводились в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Экспериментальная установка для исследования технологического процесса лазерно-дуговой сварки

В экспериментах была использована гибридная лазерно-дуговая сварочная установка, разработанная и собранная в ИЛиСТ СПбГПУ.

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 фокусиров-

ки 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 (рис. 1).

Экспериментальная установка укомплектована также источником питания дуги EWM Phoenix 520 RC PULS. Для подачи присадочного материала использовался механизм подачи проволоки PHOENIX DRIVE 4 ROB 2.

В ходе экспериментов сваривались в стык плоские образцы размерами 100×50 мм из сплавов АМг3 и АМг6 толщиной соответственно 4 мм и 10 мм. Сварка осуществлялась прямолинейными стыковыми швами в нижнем пространственном положении. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовались аргон и смесь аргона с гелием. В качестве присадочного материала в экспериментах использовалась проволока марки AlMg6Zr.

Качество всех сварных швов оценивалось визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов. Определялись также механические свойства сварного соединения: микротвердость, предел прочности на разрыв и ударная вязкость сварного соединения.

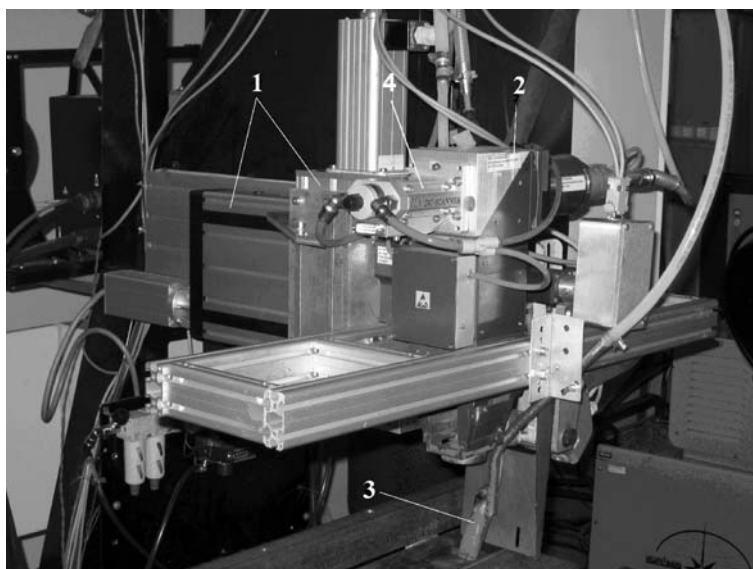


Рис. 1. Рабочий инструмент лазерно-дугового модуля:

1 — система перемещения рабочего инструмента относительно заготовки;
2 — лазерная сварочная головка; 3 — дуговая горелка; 4 — однокоординатный сканатор DC-Scanner

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, и 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.

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. Прихватки выполнялись на тех же режимах и по той же технологии, что и сварка. Сварка производилась при комнатной температуре.

Параметры режимов лазерно-дуговой сварки пластин из сплава АМг3 и АМг6 представлены в таблице.

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, а). При этом наиболее нестабильна прикорневая часть пароголового канала и канала проплавления. На рис. 2, а представлена фотография поперечного сечения сварного шва, выполненного лазерной сваркой при тех же параметрах режима. На снимке видно характерное сужение шва, которое может привести к образованию дефекта. Застабилизировать сварочную ванну можно введением кругового сканирования лазерного луча с небольшими (до 0,5 мм) радиусами и высокой (свыше 300 Гц) частотой сканирования (рис. 2, б). При отсутствии такой стабилизации в результате коллапса пароголового канала возможно формирование пор большого диаметра и корневых пиков

Экспериментами показано, что динамическое поведение яркости излучения расплава характеризуется наличием низкочастотных колебаний. Частоты определялись с помощью компьютерного моделирования с использованием динамической модели, а также экспериментально с помощью фотодиодов, направленных на сварочную ванну.

Скорость видеосъемки определяется частотой колебаний расплава. Анализ динамического поведения ванны расплава показал, что в расплаве 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

Параметры режимов лазерно-дуговой сварки

Номер режима	P_d , кВт	I_d , А	U_d , В	ΔL , мм	$V_{св}$, мм/с	$V_{п пр}$, м/мин
АМг3						
20	10	180	18	15	80	9,12
22	10	180	18	15	70	9,12
30	10	150	18	2	100	9,12
АМг6						
2	15	287	49,8	1	100	9,12
27	15	278	37,4	2	120	9,12
37	15	265	37,1	3	100	9,12

P_d — мощность лазерного излучения; I_d , U_d — ток и напряжение дуги; ΔL — расстояние между осью луча лазера и электродом на поверхности пластины; $V_{св}$ — скорость сварки; $V_{п пр}$ — скорость подачи проволоки.

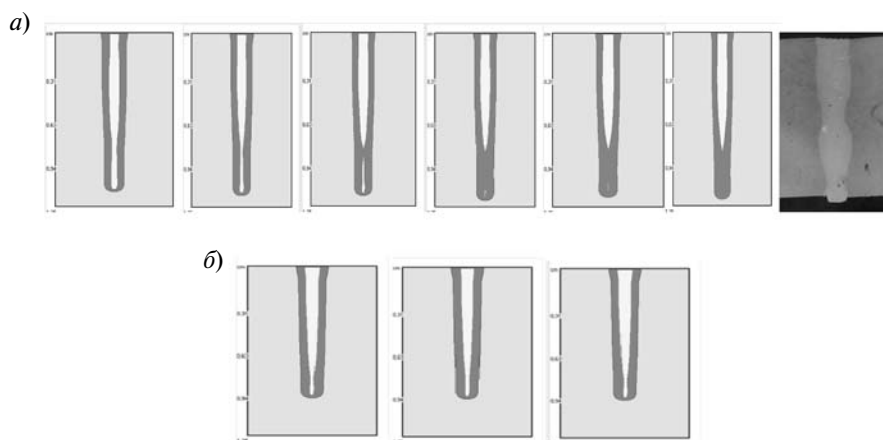


Рис. 2. Результаты расчетов:
а — через 1 мс ($P_{\text{л}} = 15$ кВт, $v_{\text{св}} = 100$ мм/с); б — через 3 мс ($P_{\text{л}} = 12$ кВт, $v_{\text{св}} = 100$ мм/с) со сканированием

видеосъемки позволил определить положение электрода относительно лазерного луча.

Расчет количества легирующих элементов проводился в программе LaserCAD. Результаты такого расчета для различных толщин и параметров режима применительно к алюминий-магнийевым сплавам приведены на рис. 3.

Уменьшение скорости сварки приводит к увеличению потерь легколетучих легирующих элементов, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики сплавов, что и вызывает разупрочнение 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 много-

кратных переотражений в канале, испарение примесей приводит к значительному изменению формы и размеров зоны проплавления.

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. 4.

В случае гибридной сварки наблюдается однородная по всему сечению металла шва структура, состоящая из мелких дендритов. При увеличенном расстоянии между тепловыми источниками наблюдаем более продолжительное пребывание металла шва при повышенных температурах и, как следствие, увеличение размеров дендритов в верхней части шва. В случае гибридного процесса микротвердость металла шва распределена равномерно по глубине и приближается к микротвердо-

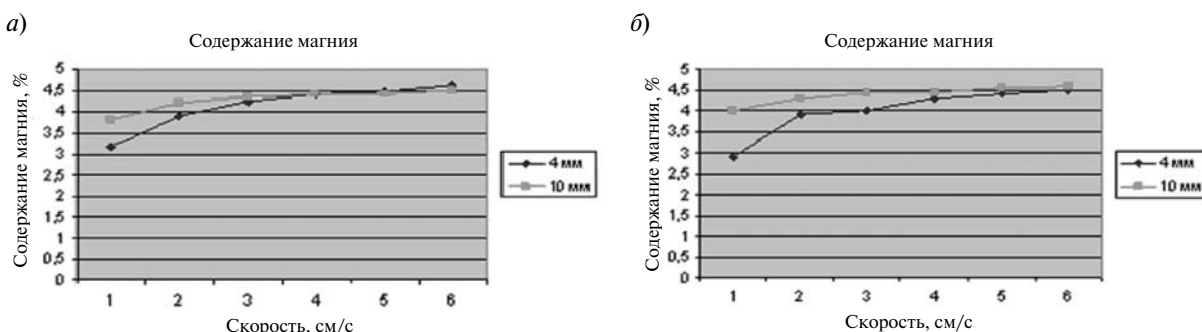


Рис. 3. Расчет изменения содержание магния в металле шва на поверхности образца при лазерной сварке:
а — $P_{\text{л}} = 3500$ Вт, $d_{\text{н}} = 0,3$ мм; б — $P_{\text{л}} = 3000$ Вт, $d_{\text{н}} = 0,3$

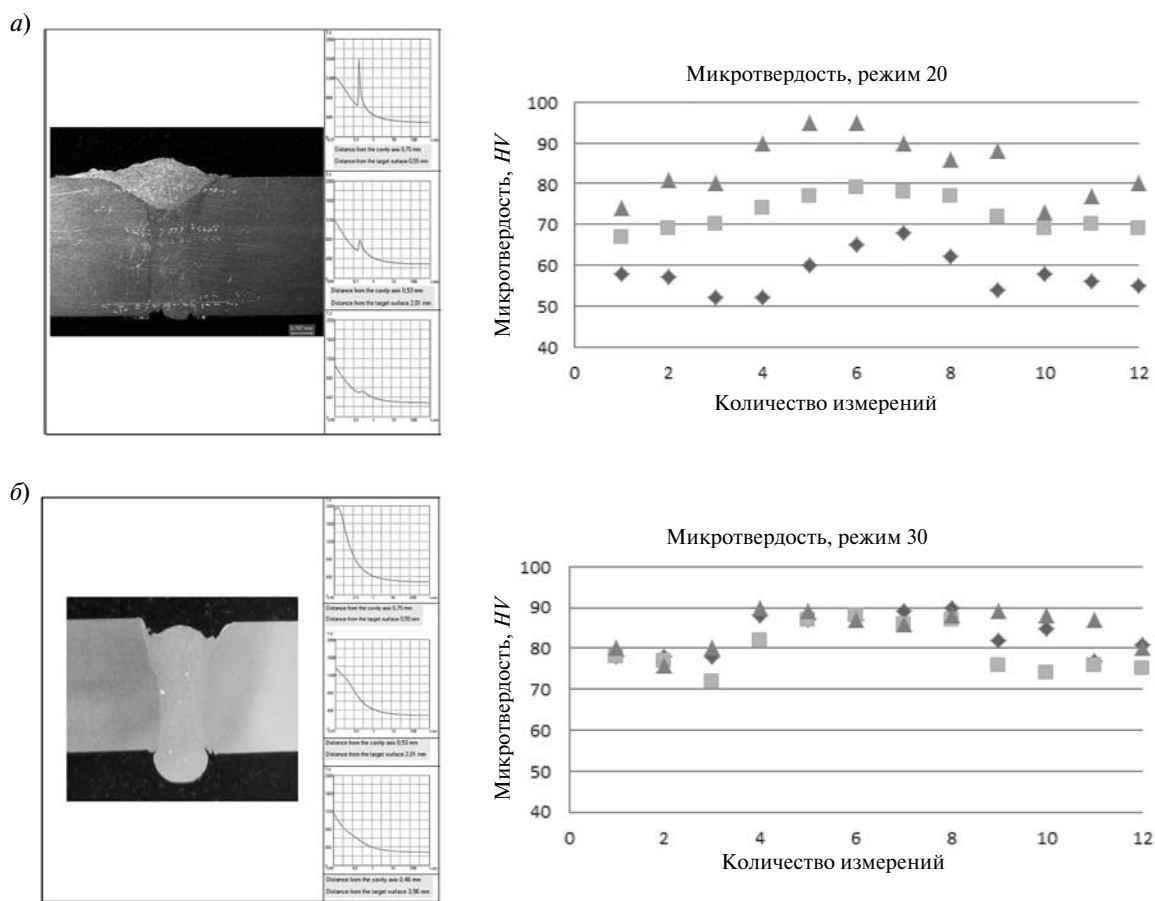


Рис. 4. Результаты расчетов термических циклов сварного шва и измерений микротвердости после ЛДС сплава АМг3: в режимах 20 (а), 30 (б) значения микротвердости на расстоянии 2 мм от поверхности обратного валика (треугольник), значения микротвердости по центру шва (квадрат), на расстоянии 2 мм от поверхности пластины (ромбик)

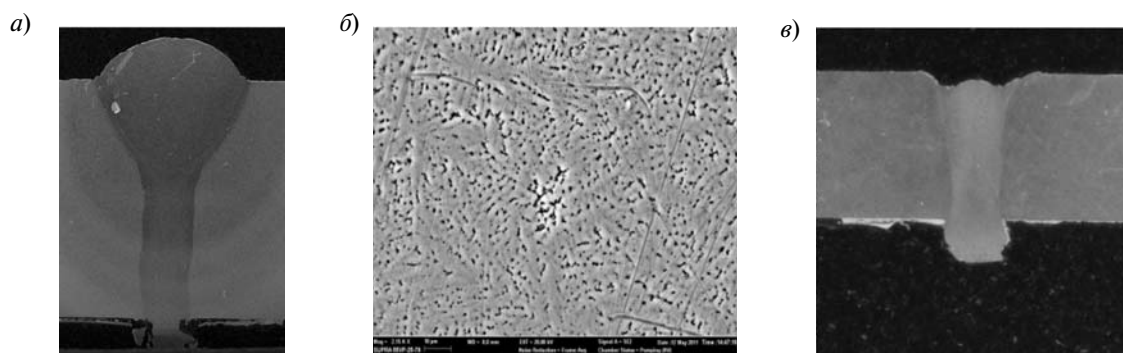


Рис. 5. Поперечное сечение сварного шва (а) и микроструктура металла шва (б) при ЛДС сплава АМг6, $q = 175$ Дж/мм, а также поперечное сечение сварного соединения при ЛДС (в) сплава АМг3, $q = 100$ Дж/мм

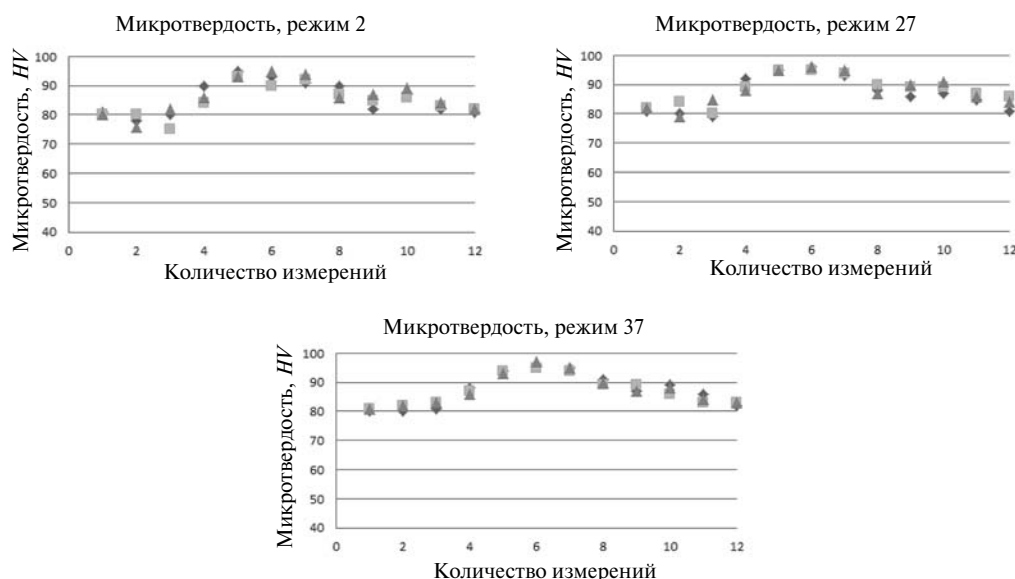


Рис. 6. Микротвердость сварных соединений АМгб

сти основного металла, что обусловлено как его мелкодендритной структурой и более высоким содержанием магния, так и лучшим перемешиванием присадочного металла с основным.

На рис. 5 и 6 представлены поперечное сечение и микроструктура металла шва со сквозным проплавлением пластин из алюминиево-магниевого сплава и результаты измерения микротвердости сварных соединений при лазерно-дуговой сварке АМгб.

Результаты измерения микротвердости сварных соединений, полученных при лазерно-дуговой сварке алюминиево-магниевого сплава АМгб, подтверждают наличие высокого перемешивания присадочного металла с основным металлом и однородную структуру по сечению металла шва.

Показана возможность повышения качества сварных швов с помощью сканирования.

Установлены требуемые частоты сканирования, соответствующие флуктуациям сварочной ванны.

Показана зависимость перемешивания присадочного и основного металлов, а также 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 высокими механическими свойствами.

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.— Vol. 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, E. Valdaytzeva, E.W. Kreutz, W. Schulz // Bellingham/Wash.: SPIE Proceedings. Series 3688.— 1999.— P. 98–107.
4. **Туричин, Г.А.** Исследование формирования пористости алюминиевых сплавов при лазерной и лазерно-дуговой сварке [Текст] / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов [и др.] // ИТБ СПбГПУ.— 2010. № 4.— С. 175–181.
5. **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.

6. **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.

7. **Лопота, В.А.** Структура материала и его пара-

метры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением [Текст] / В.А. Лопота, В.С. Смирнов // ФиХОМ.— 1989. № 2.— С. 104–115.

8. **Matsunawa, A.** Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, J.-D. Kim, N. Seto [et al.] // Journal of Laser Applications.— 1998. Vol. 10, Issue 6.— P. 247–254.

УДК 539.216.2:539.25:544.023.5

*В.С. Протопопова, С.Е. Александров,
А.П. Шаганов, С.В. Лесин*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ НИКЕЛЕВЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ

Морфология тонких металлических слоев во многих случаях обуславливает их области применения. Известно, что именно геометрические и структурные особенности каталитических никелевых слоев (толщина слоя, средний размер зерна, равномерность по площади и толщине и т. д.) определяют размерные и структурные характеристики синтезируемых на них углеродных наноматериалов — нанотрубок и графенов [1, 2]. Сочетание таких свойств, как морфология и состав слоев (особенно количество углерода в покрытиях), определяет их магнитные свойства и перспективность применения в различных микроэлектронных устройствах [3]. В случае получения металлических слоев методом термоактивированного химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) температура осаждения является одним из важнейших технологических факторов, определяющим скорость роста, морфологию и состав получаемого продукта.

В этой связи представляет интерес получение информации о влиянии температуры осаждения на морфологию поверхности и состав никелевых слоев, впервые полученных методом ХОГФ из металлоорганического реагента — бис-(этилциклопентадиенил) никеля $[(EtCp)_2Ni]$.

Методика. Осаждение слоев никеля проводилось в технологической установке для осуществления ХОГФ процессов при пониженном давлении, оснащенной горизонтальным реак-

тором с «горячими стенками», подробное описание которой приведено в работе [4]. Исследуемые образцы были получены в интервале температур осаждения 645–925 К при следующих параметрах газовой фазы: парциальное давление $(EtCp)_2Ni$ составляло 75 Па, водорода — 210 Па, общее давление — 840 Па, суммарный расход газов — 100 см³/мин. Время осаждения во всех случаях составляло 60 минут. В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ 7,5 ориентации (100).

Морфологию полученных слоев исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Supra 55 VP с использованием внутрилинзового детектора вторичных электронов (ВЭ). Статистическую обработку растровых изображений проводили при помощи программного обеспечения Gwyddion 2.19. Кристаллический фазовый состав слоев анализировали при помощи рентгеновского дифрактометра Super Nova Dual Wavelength (Agilent Technology) с использованием $CuK\alpha$ -излучения ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$).

Результаты. Результаты исследования поверхности слоев при помощи РЭМ (рис. 2, 3, 5) показали, что все слои, осажденные в температурном интервале 640–920 К, состояли из наночастиц. В зависимости от среднего диаметра частиц, пористости и сплошности покрытия получаемые слои имели разную поверхностную плотность наночастиц на квадратном микро-

метре. Результаты статистической обработки изображений поверхности слоев, полученных при помощи РЭМ, представлены на рис. 1. Характер изменения среднего размера и поверхностной плотности частиц в слое в зависимости от температуры осаждения позволяет выделить три характерных температурных диапазона.

Первый температурный диапазон (640–660 К), которому на рис. 1 соответствует участок I, характеризуется почти неизменными значениями среднего диаметра и поверхностной плотности никелевых частиц — соответственно 11 нм и 500 мкм⁻². Из рис. 2, а, видно, что слой состоит из отдельных наночастиц, иногда образующих скопления, и крупных вытянутых образований. Толщина покрытия Ni, определенная по результатам рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), т. е. исходя из массы никеля на подложке, составляла 3 нм. На основании этого можно оценить степень заполнения поверхности наночастицами со средним размером 11 нм; она составила 27 %.

Второй температурный интервал (680–810 К), которому на рис. 1 соответствует участок II, характеризуется постоянным значением среднего диаметра никелевых частиц равным 21 нм. Поверхностная плотность наночастиц увеличивается от 160 мкм⁻² до максимального значения 1530 мкм⁻². Изменение морфологии при этом происходит в несколько стадий.

В диапазоне температур 680–700 К по-прежнему наблюдалось образование отдельных наночастиц никеля, однако они отличались от частиц, образующихся в I температурном интервале. Из рисунка 2, б видно, что частицы слоя состоят из светлого ядра, иногда с различимыми

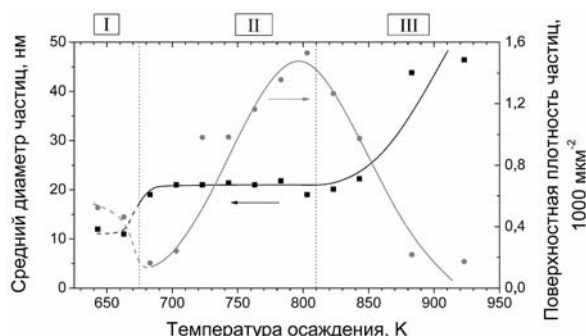


Рис. 1. Графики зависимости среднего диаметра и поверхностной плотности частиц на квадратный микрометр от температуры осаждения

гранями, покрытого менее светлой оболочкой толщиной около 5 нм. Рост их поверхностной плотности происходил от 160 до 240 мкм⁻² и связан с увеличением их общего количества. Толщина покрытия Ni, полученного при 700 К, определяемая из результатов РФА, составила 9 нм. На основании этого оценили степень заполнения поверхности частицами со средним размером 21 нм, которая составила 43 %.

Малое количество осажденного материала не позволяет сделать его химический анализ, но косвенно по данным РЭМ можно судить о наличии разных по составу компонент материала. Известно [5], что на каждом изображении, полученном при помощи детектора ВЭ, присутствует контраст из-за обратнорассеянных электронов, т. е. обусловленный химическим составом. Этот эффект хорошо заметен, например, при анализе углеродных нанотрубок [1], когда «капля» металла-катализатора выглядит светлей и выделяется по контрасту.

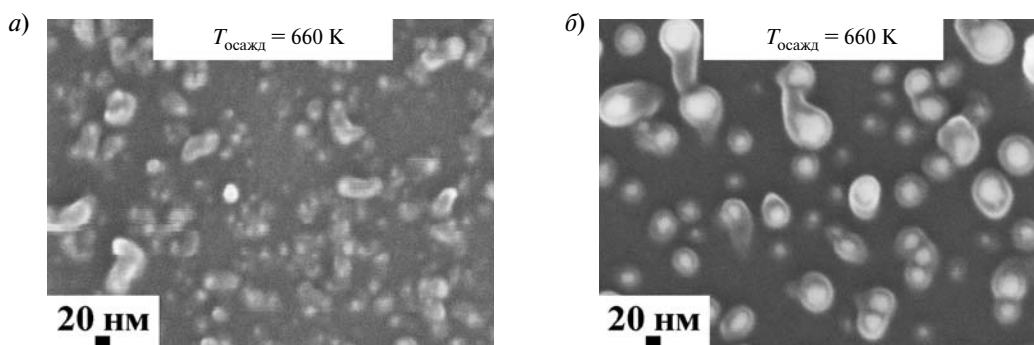


Рис. 2. Изображения поверхности слоя, полученные при помощи РЭМ.

Температура осаждения: а — 660 К; б — 700 К

Таким образом, по наблюдаемому на рис. 2, б контрасту можно предположить, что частицы состоят из никелевого ядра, покрытого оболочкой углерода. Плохой контраст изображения на рис. 2, а, возможно, обусловлен большим содержанием углерода в частицах. Неконтролируемое легирование углеродом осаждаемых слоев — типичная проблема ХОГФ процессов, основанных на использовании металлоорганических соединений в качестве реагентов [6].

В интервале температур 720–780 К наблюдалось образование сплошных слоев, состоящих из наночастиц и наноконусов (рис. 3, а, б). Толщина покрытия Ni, полученного при 760 К, определяемая из результатов РФА, составила 65 нм. Реальную толщину такого слоя трудно определить по РЭМ-изображению профиля (рис. 3, б) из-за наличия наноконусов.

Для детального рассмотрения вида наночастиц и наноконусов были получены несплошные слои в идентичных условиях, но при меньшем парциальном давлении $(EtCp)_2Ni$, равном 23 Па. Из рис. 3, в видно, что наночастицы идентичны частицам, показанным на рисунке 2, б,

и состоят из никелевого ядра и углеродной оболочки. В основании некоторых конусов находятся более светлые никелевые ядра, а вещество, из которого состоит наноконус, по контрасту сходно с углеродными оболочками наночастиц. Вероятно, наноконусы образуются в ходе процесса по механизму, сходному с каталитическим ростом углеродных нанотрубок, когда частица катализатора остается в основании нанотрубки. Известно [7], что осаждение углеродных нанотрубок может происходить из бис-циклопентадиенильных соединений металлов VIII группы (ферроцен, никелоцен, кобальтоцен) и водорода, однако для этого требуются более высокие температуры (970–1170 К).

Статистический анализ изображений слоев, полученных в диапазоне температур 760–780 К (рис. 1), показал, что они являются сплошными и характеризуются неизменным средним размером образующих их наночастиц — 21 нм, при этом поверхностная плотность частиц увеличивается от 980 до 1360 мкм⁻². Это связано с особенностями программной статистической обработки, поскольку каждая наночастица и наноконус рас-

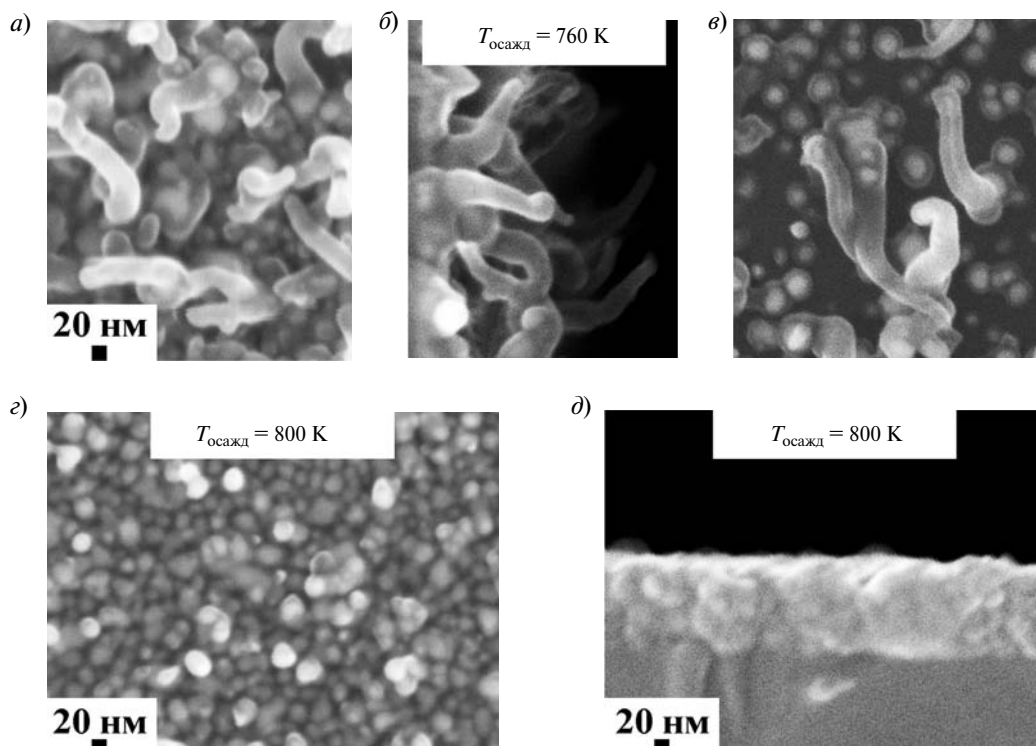


Рис. 3. Изображения поверхности и профиля слоев, полученные при помощи РЭМ. Температура осаждения:

а–в — 760 К; г, д — 800 К. Парциальное давление $P[(EtCp)_2Ni]$: а, б, г, д — 75 Па; в — 23 Па

считается как отдельное зерно. На разных образцах количество наноконусов составляло около 5 % от общего количества частиц, что не влияло значительно на статистику распределения наночастиц по размерам. Вместе с тем из-за своей изогнутой формы и большого размера (от 60 до 120 нм в диаметре эквивалентного диска) 5 % частиц (конусов) закрывает собой от 10 до 30 % площади изображения, что существенно влияет на величину поверхностной плотности частиц. С увеличением температуры осаждения средний размер наноконусов и их количество уменьшалось, что приводило к кажущемуся увеличению поверхностной плотности наночастиц.

Максимальная поверхностная плотность частиц, равная 1530 мкм^{-2} , наблюдалась при температуре осаждения 800 К, при которой не происходило формирования углеродных наноконусов. Толщина никелевого слоя, определяемая по результатам РФА, составляла 115 нм, что хорошо соотносится с толщиной слоя, найденной по РЭМ-изображению профиля (рис. 3, д). Из рис. 3, г, д видно, что слой состоит из частиц никеля шарообразной формы, расположенных неупорядоченно, однако составляющих довольно плотную упаковку без крупных или сквозных полостей.

Одной из возможных причин блокирования роста наночастиц может быть образование фазы карбида никеля, наблюдаемой при исследовании рентгеновской дифракции образцов (рис. 4). Анализ дифрактограммы слоя, осажденного при 800 К на стекле, показал наличие двух фаз: никеля (JCPDS № 04–0850) и метастабильного карбида никеля Ni_3C (JCPDS № 06–0697). Присутствие большого числа рефлексов никеля свидетельствует о нанокристаллической структуре

слоя и об отсутствии их приоритетной ориентации. Анализ пика Ni (100) рентгенограммы при помощи уравнения Шерера (связывает уширение пиков и диаметр нанокристаллов [8]), показал, что средний диаметр нанокристаллов никеля составляет 11 нм. Одной из особенностей рентгенограммы является отсутствие оксидных фаз во всем диапазоне значений 2θ углов. В интервале значений 2θ от 15 до 25° присутствует область диффузного рассеяния, как правило, соответствующая аморфной фазе, появление которой может быть вызвано как природой подложки (стекло), так и наличием аморфного углерода в слое.

Формирование фазы Ni_3C при осаждении никелевых слоев из металлоорганических соединений описано в некоторых работах [9]. Вероятно, в ходе ХОГФ процесса происходит соосаждение углерода вследствие частичной деструкции органических лигандов, катализируемой самим никелем. В работе [10] по результатам просвечивающей электронной микроскопии было продемонстрировано образование частиц никеля, покрытых оболочкой карбида никеля. Таким образом, вероятней всего, карбид никеля находится в виде оболочки частицы никеля. Можно предположить, что полное прекращение роста частиц происходит тогда, когда никелевое ядро полностью покрыто сплошной карбидной оболочкой, а конечный размер зерна связан с балансом скоростей поступления атомов никеля и углерода.

Таким образом, только в узком температурном интервале вблизи 800 К наблюдалось образование металлических слоев с небольшим содержанием углерода, связанного в виде карбида никеля, без других углеродных фаз (углеродные наноконусы и наноболочки).

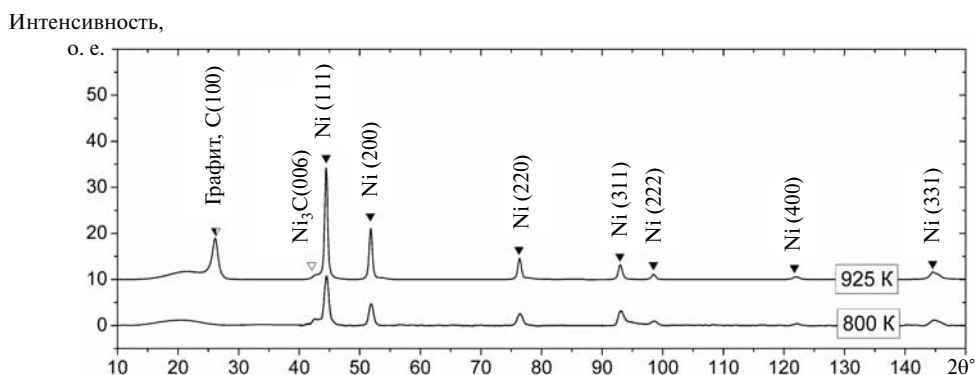


Рис. 4. Рентгенограммы слоев, полученных при 800 и 920 К

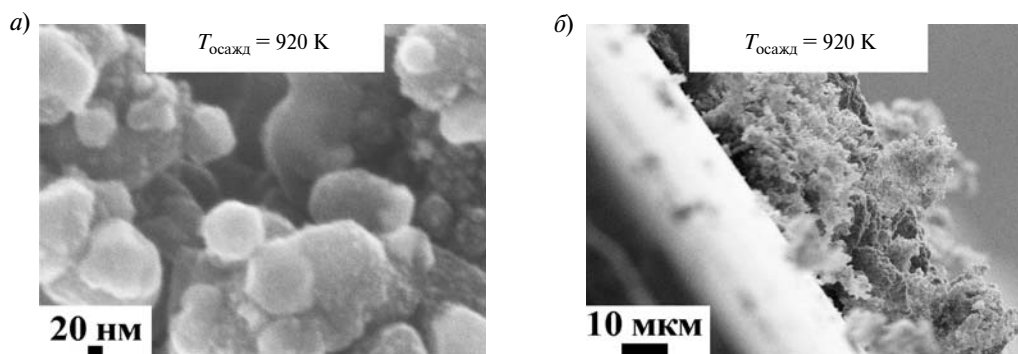


Рис. 5. Изображения поверхности и профиля слоев, полученные при помощи РЭМ. Температура осаждения — 920 К

Третий температурный интервал (810–920 К), которому на рис. 1 соответствует участок III, для которого характерно увеличение среднего диаметра наночастиц от 21 до 45 нм и, соответственно, уменьшение их поверхностной плотности от 980 до 200 мкм⁻². Данный температурный диапазон соответствует режиму протекания ХОГФ процесса, когда происходит обеднение газовой фазы и ограничение скорости роста доставкой реагента [11].

Из рис. 5, а, б видно, что при 920 К образовывался «рыхлый» слой, состоящий из больших (диаметр до 100 нм) и маленьких (диаметр до 20 нм) неплотно прилегающих друг к другу частиц. Толщина никелевого слоя, определяемая по результатам РФА, составляла 315 нм, тогда как толщина, найденная с помощью РЭМ, — несколько микрометров. Кроме того, образующиеся слои не имели металлического блеска, а были черного матового цвета. Результаты рентгенодифракционного анализа слоя свидетельствуют о наличии фаз никеля (JCPDS № 04–0850), карбида никеля (JCPDS № 06–0697) и углерода в кристаллической фазе графита (JCPDS № 41–1487). Оксидных фаз не обнаружено. Анализ пика Ni (100) рентгенограммы при помощи уравнения Шерера показал, что средний диаметр нанокристаллов никеля составляет 19 нм. Можно предположить, что образующийся слой состоит из никелевых частиц, покрытых углеродной оболочкой. А в случае, если углеродные оболочки блокируют места для зарождения новых частиц, происходит образование «рыхлой» структуры слоев. Таким образом, обеднение газовой фазы приводит к образованию «рыхлых» слоев, которые богаты углеродом.

При помощи РЭМ было изучено изменение морфологии поверхности никелевых слоев, осаждаемых в температурном интервале 640–920 К.

В температурном диапазоне 640–660 К происходит формирование слоя из отдельных наночастиц со средним диаметром 11 нм. Температурный интервал 680–810 К характеризуется формированием слоев, состоящих из наночастиц с размером около 21 нм. Однако в пределах данного диапазона морфология осаждаемых слоев менялась значительно: диапазону температур 680–720 К соответствует образование отдельных наночастиц, покрытых оболочкой углерода; промежутку 740–780 К — совместное осаждение никелевых частиц и рост углеродных наноконусов; температуре 800 К — образование слоев, состоящих из плотноприлегающих никелевых частиц, содержащих метастабильную фазу Ni₃C. Диапазон температур 820–920 К характеризуется образованием «рыхлых» слоев с высоким содержанием углерода.

Таким образом, формирование плотных никелевых слоев с небольшим содержанием Ni₃C происходило в узком диапазоне температур вблизи 800 К.

Авторы выражают благодарность заведующей лабораторией «Микроскопии и микроанализа» Ирине Константиновне Боричевой за неоценимую помощь в проведении исследований морфологии поверхности при помощи растровой электронной микроскопии.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chowalla, M.** Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition [Текст] / M. Chowalla, K.B.K. Teo, C. Ducati, N.L. Rupesinghe, G.A.J. Amaratunga, A.C. Ferrari, D. Roy, J. Robertson, W.I. Milne // *J. Appl. Phys.*,— 2001.— Vol. 90, № 10.— P. 5308–5317.
2. **Pollard, A.J.** Formation of Monolayer Graphene by Annealing Sacrificial Nickel Thin Films [Текст] / A.J. Pollard, R.R. Nair, S.N. Sabki, C.R. Staddon, L.M.A. Perdigao, C.H. Hsu, J.M. Garfitt, S. Gangopadhyay, H.F. Gleeson, A.K. Geim, P.H. Beton // *J. Phys. Chem. C Letters*.— 2009.— № 113(38).— P. 16565–16567.
3. **Kim, Y.-G.** Fabricating magnetic Co-Ni-C thin-film alloys by organometallic the vapor deposition [Текст] / Y.-G. Kim, D. Byun, C. Hutchings, P.A. Dowben, H. Hejase, K. Schroder // *J. Appl. Phys.*— 1991.— Vol. 70.— P. 6062–6064.
4. **Протопопова, В.С.** Химическое осаждение из газовой фазы слоев Ni из бис-(этилциклопентадиенил) никеля [Текст] / В.С. Протопопова, С.Е. Александров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Информатика. Телекоммуникации. Управление.— 2011. № 3.— С. 145–150.
5. **Оура, К.** Введение в физику поверхности [Текст] / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма.— М.: Наука,— 2006.— 490 с.
6. **Brissonneau, L.** MOCVD-Processed Ni Films from Nickelocene. Part II: Carbon Content of the Deposits [Текст] / L. Brissonneau, D. de Caro, D. Boursier, R. Ma-
- dar, C. Vahlas // *Chem. Vap. Deposition*.— 1999.— Vol. 5. № 4.— P. 143–149.
7. **Rao, C.N.R.** Synthesis of multi-walled and single-walled nanotubes, aligned-nanotube bundles and nanorods by employing organometallic precursors [Текст] / C.N.R. Rao, A. Govindaraj, R. Sen, B.C. Satishkumar // *Mat. Res. Innovat.*— 1998.— Vol. 2.— P. 128–141.
8. **Premkumar, P.A.** Synthesis and characterization of Ni and Ni/CrN nanocomposite coatings by plasma assisted metal-organic CVD [Текст] / P.A. Premkumar, A. Dasgupta, P. Kuppusami, P. Parameswaran, C. Mallika, K.S. Nagaraja, V. S. Raghunathan // *Chem. Vap. Deposition*.— 2006.— Vol. 12.— P. 39–45.
9. **Brissonneau, L.** MOCVD of Ni and Ni₃C films from Ni(dmen)₂(tfa)₂ [Текст] / L. Brissonneau, A. Kacheva, F. Senocq, J.-K. Kang, S.-W. Rhee, A. Gleiez, C. Vahlas // *J. Phys. IV*.— France.— 1999.— Vol. 9.— P. Pr8–597–604.
10. **Zhou, W.** Ni/Ni₃C Core-shell nanochains and its magnetic properties: one-step synthesis at low temperature [Текст] / W. Zhou, K. Zheng, L. He, R. Wang, L. Guo, C. Chen, X. Han, Z. Zhang // *Nano Lett.*— 2008.— Vol. 8.— № 4.— P. 1147–1152.
11. **Протопопова, В.С.** Исследование кинетических закономерностей процесса химического осаждения из газовой фазы никелевых слоев из бис-(этилциклопентадиенил) никеля [Текст] / В.С. Протопопова, С.Е. Александров // *ЖПХ*.— 2012.— Т. 85, № 5.— С. 741–745.

УДК 621.822.5.001.6

М.С. Бундур, В.А. Прокопенко, Н.А. Пелевин

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Улучшение статических характеристик, долговечности, виброустойчивости технологических систем и оборудования является основной задачей при их разработке, модернизации и эксплуатации. Применительно к металлорежущим станкам (МРС) она обусловлена как требованиями роста производительности и качества обработки, так и потребностью увеличения демпфирующих свойств, что практически не может быть удовлетворена при использовании в шпиндельных узлах (ШУ) традиционных подшипни-

ков качения. Эффективным решением может служить внедрение опор жидкостного трения — гидростатических подшипников (ГСП).

При проведении модернизации серийного токарно-винторезного станка модели 1И611П выполнен комплексный анализ статических и динамических характеристик опорных систем радиального и осевого базирования ШУ МРС с применением ГСП вместо подшипников качения, используемых в исходном (базовом) исполнении.

Основные статические и динамические достоинства ГСП общеизвестны, в том числе и на практике, однако их более широкому внедрению в серийные МРС препятствует недостаточный объем и доступность для специалистов-инженеров рекомендаций по расчетам, оптимизации конструктивных параметров, выбору наиболее обоснованным образом системы управления, средств, позволяющих повысить виброустойчивость, энергетическую стабильность и т. д.

Особое внимание в работе уделено выбору и исследованиям характеристик различных систем управления, среди которых анализировались следующие известные варианты и их возможности:

вариант I — типовая дроссельная система управления с использованием в передней (ПО) и задней (ЗО) опорах ШУ ламинарных дросселей типа «сопло — заслонка» (рис. 1, а);

вариант II — комбинированная схема управления с использованием в ПО и ЗО ШУ в каждом из каналов управления по одному дросселю и одному насосу (рис. 1, б);

вариант III — схема управления «насос — карман» с использованием в ПО и ЗО ШУ автономных насосов (рис. 1, в);

вариант IV с использованием в ПО ШУ в каждом канале управления мембранного регу-

лятора и дросселя, а в ЗО ШУ, аналогично варианту I, — дросселей (рис. 1, г).

Основными целями модернизации были повышение быстроходности ШУ — с $n_{\max} = 2000$ об/мин до $n_{\max} = 5000$ об/мин, его нагрузочной способности в 2,5 раза в радиальном и в 2 раза в осевом направлениях, а также демпфирующих свойств ШУ и МРС в целом, т. е. виброустойчивости. Значения приведенных параметров обоснованы результатами проведенных технологических исследований в направлении расширения возможностей обработки современных легких и цветных сплавов, а также черновой обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе с использованием прогрессивных инструментов.

Эквивалентность вариантов в части статических характеристик была обусловлена обеспечением одинаковой жесткости $C_{\text{радиального ГСП}}$ (примерно 1,1 кН/мкм) с определением рабочей точки по давлению (p_0) в опоре ГСП при разной ширине ГСП B с целью ограничения максимального радиального смещения δ_{Σ} на кромке ГСП (не более 50 % от рабочего зазора, принятого равным 45 мкм).

Установлено, что диаметр шпинделя необходимо увеличить до 90 мм. Ширина ГСП определена по результатам статических расчетов, приведенных в табл. 1.

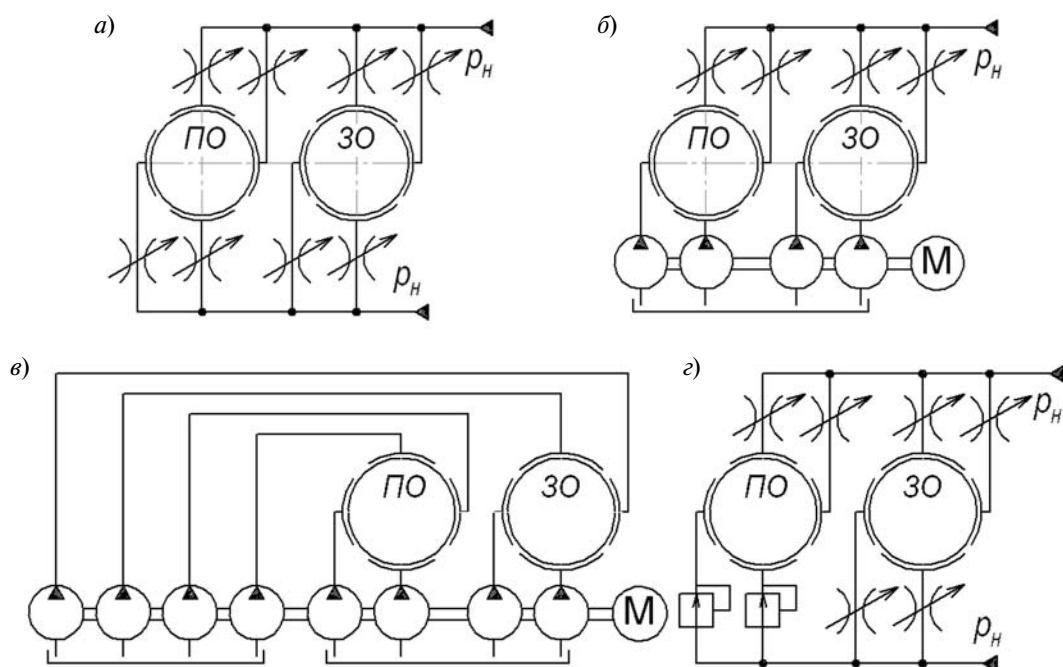


Рис. 1. Схемы управления опорами ГСП

Таблица 1

Результаты статического расчета вариантов ГСП

Вариант	p_n , МПа	D , мм	B , мм	$C \cdot 10^6$, Н/м	δ_Σ , мкм	$\delta_{\Sigma l}$, мкм
I	9	90	50	844	24,3	165
			60	987	23,5	156
			70	1098	22,5	148
II	2,1	90	50	859	24,2	163
			60	979	23,4	152
			70	1101	22,2	146
III	1,85	90	50	838	24,4	162
			60	963	22,8	154
			70	1091	22,3	146
IV	4,5	90	50	840	24,3	165
			60	975	23,1	155
			70	1095	22,0	144

По статическим показателям все рассмотренные варианты обладают близкой нагрузочной способностью, но при этом из-за существенной разницы в несущей способности систем потребное давление питания (начальное давление в опорах ГСП) различно. При этом, как следствие, в вариантах II, III, IV расход рабочей жидкости значительно меньше, чем при использовании дроссельной системы управления (вариант I). Принятое значение ширины ГСП составляет $B = 70$ мм.

Аналогичным образом определены параметры упорного ГСП: ширина $B = 18$ мм; рабочий зазор $h_0 = 45$ мкм; давление питания $p_n = 6$ МПа; статическая ошибка (при максимальной нагрузке) $\delta = 9,4$ мкм; ошибка на кромке углового поворота при радиальной деформации шпинделя $\Delta_n = 5,3$ мкм.

В результате энергетического расчета и исследования вариантов определены значения перегрева рабочей жидкости на максимальных частотах вращения шпинделя, которые не превышают допустимых значений и составляют $15-30^\circ\text{C}$.

Важнейший этап исследований — анализ поведения ГСП в динамике и оценка его результатов.

По известным системам уравнений [1, 2], представляющим собой математическое описание нелинейной модели ГСП в программном пакете «MATLAB Simulink», разработаны модели, по которым выполнены исследования ГСП для всех вариантов систем управления.

Расчет, построение и исследование частотных характеристик производились по линейным моделям системы автоматического регулирования (САР) ГСП, разработанным в «MATLAB Simulink». На рис. 2 в качестве примера приведено окно со структурной схемой линейной разомкнутой САР в обозначениях «MATLAB Simulink» для дроссельного варианта ГСП.

Для остальных вариантов отличие в структурах состоит лишь в значениях некоторых исходных и расчетных параметров схемы или в дополнительных элементах структуры (как в варианте IV).

Основным параметром при оценке динамического качества САР служит значение запаса по фазе ($\Delta\varphi$) на частоте среза (ω_{cp}) логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) [3].

На рис. 3 кривая I — это ЛАЧХ для варианта I ГСП, а кривая I' — соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом

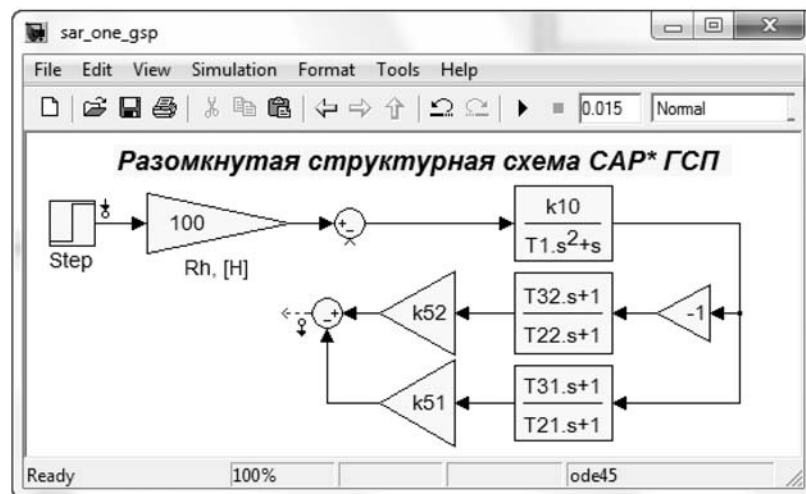


Рис. 2. Окно со структурной схемой в обозначениях «MATLAB Simulink» для линейной САП

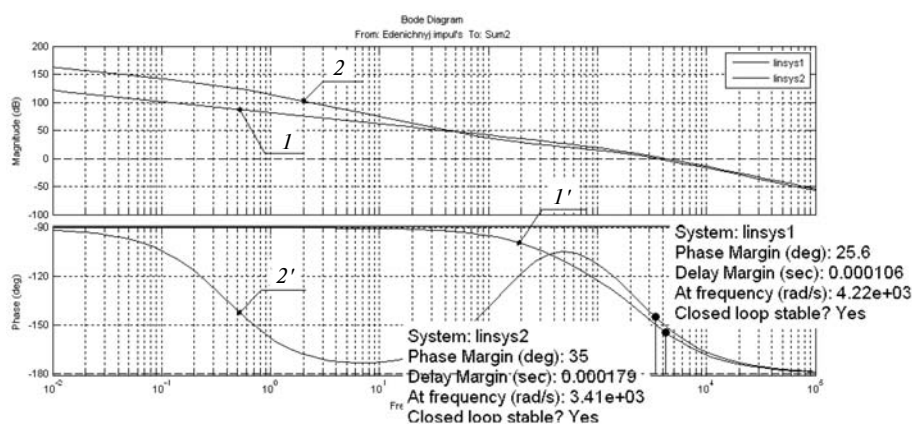


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ для вариантов I и IV

составляет $\Delta\varphi_1 = 26^\circ$ (на частоте среза $\omega_{ср1} = 4220 \text{ с}^{-1}$), что существенно ниже минимально допустимого значения 55° [3].

Кривая 2 — ЛАЧХ для варианта IV, а 2' — соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом несколько выше и составляет $\Delta\varphi_2 = 35^\circ$ (на частоте среза $\omega_{ср2} = 3410 \text{ с}^{-1}$), т. е. на 31 % больше, чем в варианте I, но также ниже упомянутого минимально допустимого запаса для САП высокого качества. Результаты расчета вариантов II, III представлены в табл. 2.

Для дополнительной оценки и анализа динамического качества ГСП выполнены расчет и построение соответствующих переходных процессов (ПП) при больших (рис. 4, а) и малых

(рис. 4, б) нагрузках (черновые и чистовые режимы резания соответственно) на базе пакета «MATLAB Simulink».

При малых нагрузках обе схемы в начале ПП имеют некоторую колебательность. Варианты II, III исследованы аналогичным образом; колебательность ПП в них также присутствует и соответствует рассчитанным значениям $\Delta\varphi$ (см. табл. 2). При больших нагрузках для всех вариантов колебательность проявляется значительно слабее.

Таким образом, установлено, что наилучшими показателями динамического качества обладает САП в варианте IV.

Исследование ЛАЧХ и ЛФЧХ упорного ГСП с дроссельной системой управления показало

Т а б л и ц а 2

**Влияние радиального смещения оси шпинделя
на динамические показатели качества САР ГСП**

Вариант	p_n , МПа	Δ , мкм	$\omega_{ср}$, с ⁻¹	$\Delta\phi$, град	f , Гц
I	9	0	4220	25,6	700
		5	4170	27,8	680
		10	4000	35,1	680
		15	3560	49,0	—
		20	2620	68,6	—
II	2,1	0	4180	32,7	730
		5	4120	35,8	730
		10	3920	44,4	720
		15	3420	60,0	—
		20	2310	75,7	—
III	1,85	0	4190	28,4	670
		5	4150	30,5	670
		10	3980	37,7	670
		15	3540	51,5	—
		20	2610	71,3	—
IV	4,5	0	3410	35,0	630
		5	3030	47,4	600
		10	2470	61,2	—
		15	1780	74,2	—
		20	1160	85,4	—

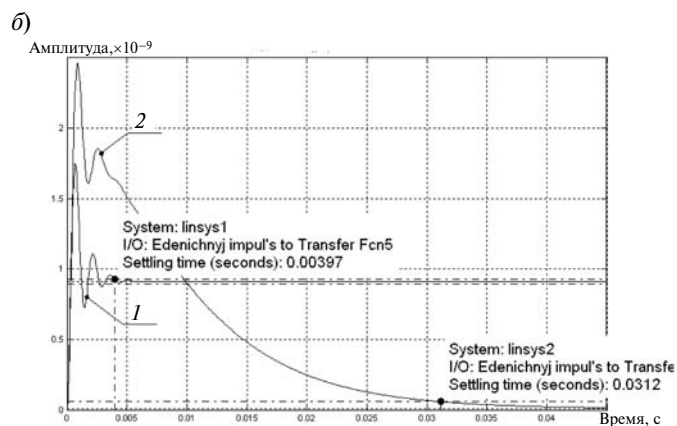
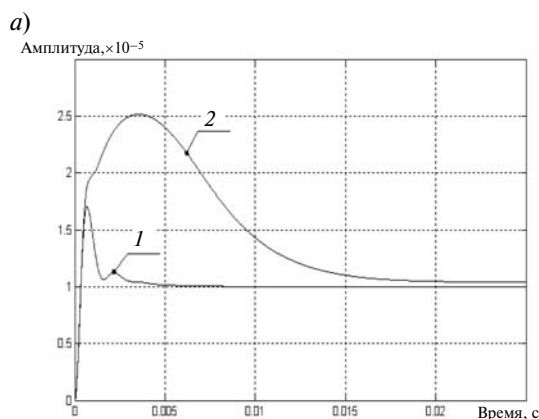


Рис. 4. Переходные процессы в вариантах I (1) и IV (2) САР ГСП:

а — при $P_{\text{рад}} = 6,1$ кН; б — при $P_{\text{рад}} = 100$ Н

фактический запас по фазе $\Delta\varphi = 71^\circ$ (на частоте среза $\omega_{\text{ср}} = 7800 \text{ с}^{-1}$), что выше упомянутого критерия, т. е. САР упорного ГСП соответствует динамическому качеству для САР высокого уровня.

После определения показателей динамического качества следует в случае колебательности САР оценить ее допустимость по критерию виброустойчивости [4], в соответствии с которым собственная частота f ШУ должна быть не менее 500 Гц. Собственная частота для варианта IV составляет 630 Гц (см. рис. 4, б) и близка к упомянутому нижнему пределу. С учетом того, что верхний предел частот вращения модернизированного привода главного движения составляет 5000 об/мин, нельзя исключать при высокоскоростных операциях вероятность появления возмущающих воздействий в области резонансной частоты. Для остальных вариантов установленные значения частот f приведены в табл. 2. Они незначительно отличаются от собственной частоты в варианте IV.

Из изложенного следует, что необходимо рассмотреть возможности дополнительного повышения динамического качества САР ГСП для исключения колебательности и реализации возможностей высокопроизводительной обработки.

Средством повышения динамического качества САР, известным наибольшей эффективностью, является подключение RC-цепей коррекции [5]. Введение RC-цепей коррекции широко используется в практике, но применительно к рассматриваемому станку этому способу присущи следующие недостатки: большие габаритные размеры гидрокорректора; проблемы, связанные с размещением и установкой гидрокорректора; сложность сборки и настройки. Поэтому было проведено исследование возможностей повышения динамического качества за счет перехода к несимметричной схеме САР при радиальном смещении оси шпинделя без использования корректирующих RC-цепей.

В табл. 2 показатели динамического качества при концентричном положении шпинделя ($\Delta = 0$) приведены для всех рассматриваемых вариантов. При выполнении радиального смещения для конструктивно несимметричных систем управления ГСП в вариантах II и IV существенное значение в случае токарного станка

имеет расположение относительно шпинделя в горизонтальной плоскости опоры с дроссельным управлением, что связано с отличиями как в жесткости и несущей способности нагрузочной и разгрузочной ветвей статической характеристики, так и в значениях запаса по фазе $\Delta\varphi$ соответствующих САР. В результате выполненного анализа для варианта IV установлено, что опора с регулятором должна размещаться относительно резцедержателя со стороны, противоположной фартуку станка, и смещение шпинделя Δ должно выполняться в том же направлении. Приведенные в табл. 2 результаты получены с учетом отмеченных особенностей.

Из анализа результатов следует, что запас по фазе растет с увеличением смещения во всех вариантах. Однако с учетом исследований влияния изменяющихся при этом расходов жидкости через опоры ГСП установлено, что тепловыделение на скорости $n_{\text{max}} = 5000$ об/мин (чистовые режимы обработки) в опорах с меньшими зазорами также возрастает и при достижении смещения $\Delta = 15$ мкм близко к предельно допустимым значениям, что является энергетическим ограничением по дальнейшему увеличению возможного смещения и связанного с ним повышения динамического качества. Исходя из этого вариант IV при $\Delta = 15$ мкм по критерию запаса по фазе существенно превосходит остальные варианты (примерно на 25 %) и поэтому обеспечивает наибольший уровень виброустойчивости.

Окончательное решение по выбору величины радиального смещения шпинделя следует принимать из расчета и построения ПП по разработанной динамической модели в программном пакете «MATLAB Simulink». Для различных вариантов смещения построены приведенные на рис. 5, а ПП в варианте IV на больших ($P_{\text{рад}} = 6,1$ кН) нагрузках (черновые режимы резания).

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 5, а) показывает, что смещение $\Delta = 15$ мкм практически позволяет при наибольшей нагрузке свести к нулю колебательность САР.

При нагрузке $P_{\text{рад}} = 100$ Н колебательность САР в случае смещения $\Delta = 15$ мкм практически устраняется (рис. 5, б).

Таким образом для повышения динамических показателей САР ГСП принимается вариант IV с радиальным смещением шпинделя $\Delta =$

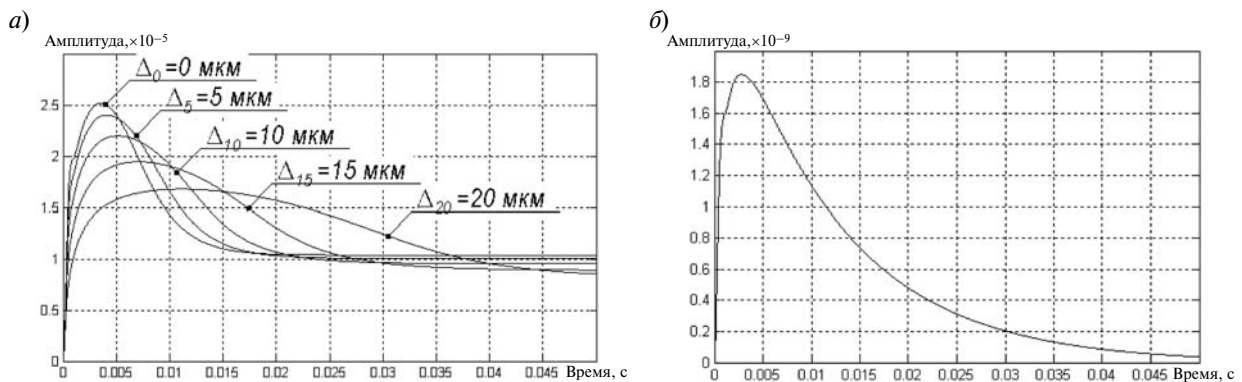


Рис. 5. Переходные процессы при $P_{\text{рад}}$ равном 6,1 кН (а) и 100 Н (б)

= 15 мкм. В дополнение к табл. 2 выполнен анализ статических показателей выбранного варианта ШУ; результаты следующие: $\Delta = 15$ мкм; $C = 1097 \cdot 10^6$ Н/м; $\delta_{\Sigma} = 22,5$ мкм; $\delta_{\Sigma\text{Л}} = 148$.

ШУ с ГСП в варианте IV удовлетворяет условию жесткости ($\delta_{\Sigma} \leq 0,5h_0$); кроме того, при наибольшей нагрузке на максимальном вылете прогиб шпинделя на конце ШУ (радиальная деформация) составляет $\delta_{\Sigma\text{Л}} = 148$ мкм. При этом доля радиальной деформации собственно шпинделя около 125 мкм для всех вариантов.

В соответствии с системой допусков и посадок гладких соединений погрешность обработки, равная $\delta_{\Sigma\text{Л}} = 148$ мкм, для интервалов номинальных размеров соответствует таким квалитетам точности:

- св. 30 до 80 мм — 11 квалитет;
- св. 80 до 250 мм — 10 квалитет;

св. 250 до 500 мм — 9 квалитет.

Для ГСП в варианте IV в соответствии с методикой [6] проведено проектирование мембранного регулятора с сопротивлением типа «сопло — заслонка», в результате которого определены основные его конструктивные параметры: диаметр мембраны $D_{\text{м}} = 45,6$ мм; наружный диаметр сопла $d_{\text{н}} = 12$ мм; диаметр отверстия сопла $d_{\text{вн}} = 2$ мм; толщина диафрагмы $\delta_{\text{м}} = 2,4$ мм; начальный зазор в регуляторе $H_0 = 24$ мкм.

При этом обеспечиваются необходимые значения коэффициента формы статической характеристики — $k_{\text{ф}} = 3$, выполнение условий ламинарности потока жидкости ($(d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})/2H_p \geq 50$) и прочности мембраны ($\sigma \leq [\sigma_{\text{доп}}]$) при изготовлении ее из рессорно-пружинной листовой стали 50С2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопенко, В.А. Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при исследовании схем управления с регулятором [Текст] / В.А. Прокопенко, И.А. Чернов // Теория механизмов и машин. — 2007. — № 1. Т. 5. — С. 45–50.
2. Прокопенко, В.А. Выбор систем управления для гидростатических подшипников по критериям динамического качества [Текст] / В.А. Прокопенко // Новые промышленные технологии. — 2010. — № 1. — С. 47–53.
3. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст] / Н.Н. Иващенко. — М.: Машиностроение, 1978. — 736 с.
4. Пуш, В.Э. Конструирование металлорежущих станков [Текст] / В.Э. Пуш. — М.: Машиностроение, 1977. — 390 с.
5. Привалова, О.В. Анализ динамического качества шпиндельных гидростатических подшипников с RC-коррекцией в различных областях колебательных движений [Текст] / О.В. Привалова, В.А. Прокопенко, Д.Ю. Скубов. — В кн.: Situation and perspective of research and development in chemical mechanical industry. — Krudevac (Югославия): IMK 14 October, 2001. — С. 331–337.
6. Якир, Е.М. Гидростатические направляющие с регуляторами. Расчет и проектирование. Рекомендации [Текст] / Е.М. Якир, Г.А. Левит, Б.Г. Лурье. — М.: ЭНИМС, 1970. — 64 с.

УДК 621.9.014.8: 621.9.015

В.В. Максаров

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЗА СЧЕТ ЛОКАЛЬНОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ

Обработка сложных изделий из труднообрабатываемых материалов сопровождается потерей устойчивости процесса резания, что ведет к возникновению автоколебаний, повышению интенсивности изнашивания режущего инструмента, снижение долговечности исполнительных механизмов станка и в конечном итоге ухудшает качество и точность обработки ответственных изделий [1–3, 8]. Разработка основ рекомендаций по снижению интенсивности автоколебаний в технологических системах механической обработки и соответствующего программно-алгоритмического обеспечения позволяет решить задачу автоматизации и управления процессом лезвийной механической обработки на станках типа CNC [4, 5].

В машиностроении можно выделить широкий класс изделий, автоматизация и управление механической обработкой которых требует особого подхода при решении задач по повышению эффективности процесса резания. К данному классу относятся, прежде всего, изделия из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, обрабатываемые на высокопроизводительном автоматизированном оборудовании. С технологической точки зрения желательно в процессе резания иметь сливную стружку, поскольку она служит показателем устойчивости технологической системы, обеспечивает высокое качество обработанной поверхности и гарантированную стойкость инструмента, что особенно важно при автоматизации этого процесса. В реальных условиях обработки заготовок образование сливной стружки соответствует очень узкому диапазону состояния технологической системы в процессе резания, который не всегда совпадает с рекомендуемыми для обеспечения необходимой производительности режимами резания и стойкостью инструмента. Следует также отметить, что сливная стружка существенно затрудняет эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, является причиной преждевременного

износа и аварий станков и приспособлений, может вызывать травмы обслуживающего персонала, затрудняет процесс комплексной механизации и автоматизации уборки стружки и ее последующей переработки.

Формирование отрезков стружки заданной длины — одна из важнейших задач в области лезвийной обработки. Особую актуальность задача управления процессом стружкодробления приобретает при обработке изделий на автоматических станках, станках типа CNC и использовании манипуляторов. На рис. 1 представлены схемы практической реализации методов создания локальной метастабильности в обрабатываемом материале термическим способом воздействия.

На поверхности заготовки, подлежащей обработке, по специально заданной траектории создается локальная метастабильность материала в области предполагаемого припуска срезаемого материала при воздействии с глубиной h_m и шириной b_m , что приводит к локальным изменениям структуры материала и образованию упруго-диссипативных свойств, отличных от свойств основного материала. Изменение свойств материала в зоне локального воздействия приводит к изменению напряжений σ от деформации ε . По кривым «напряжения — деформации» можно судить, что в исходной структуре материала и в зоне локального воздействия модули упругости E отражают в первом приближении квазиупругие характеристики коэффициентов жесткости c_1 и c_1^1 , которые имеют примерно одинаковый характер поведения и в зоне термического воздействия, и в последующих процессах формирования стружки, что отражают коэффициенты жесткости c_2 и c_2^1 , а также элементы демпфирования β_2 и β_2^1 [4, 5].

При локальном термическом воздействии на материал заготовки происходит изменение механических свойств обрабатываемого материала: предела текучести σ_T , пределов проч-

ности условного σ_E , истинного S_K и относительного δ удлинения, а также коэффициента упрочнения k_n . Это воздействует на технологическую систему и обуславливает периодическое изменение ее параметров.

С использованием метода локального воздействия и на основе четырехконтурной динамической модели при контактном взаимодействии подсистем заготовки и инструмента, отображенной многоэлементной реологической моделью стружкообразования [4, 5], выполнялось исследование поведения технологической системы в процессе механической обработки.

Реологическая модель технологической системы механической обработки учитывает как процесс первичной пластической деформации в зоне срезаемого слоя, так и процессы вторичной деформации и трения при движении стружки по передней поверхности режущего инструмента. Моделирование на основе кусочно-линейной аппроксимации процесса стружкообразования позволило сформировать базу для построения дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства технологической системы механической обработки.

Исходя из этого поведение выбранной динамической четырехконтурной модели в соответствии с принятой реологической моделью стружкообразования удобно представлять в векторно-матричной форме:

$$T\dot{q} + N(q)q = 0, \quad (1)$$

где q — вектор-функция размера $n \times 1$ обобщенных координат системы; T — диагональная матрица размера $n \times n$; $N(q)$ — матрица размера $n \times n$. В рассматриваемой модели $n = 10$; при этом число контуров n соответствует размерности модели.

Система дифференциальных уравнений (1) описывает динамические процессы в технологической системе механической обработки с учетом упругопластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей процесса стружкообразования в зоне локального воздействия. На основе полученной системы уравнений в дальнейшем решаются задачи управления процессом стружкодробления.

Для проведения анализа динамического процесса в технологической системе при обработке

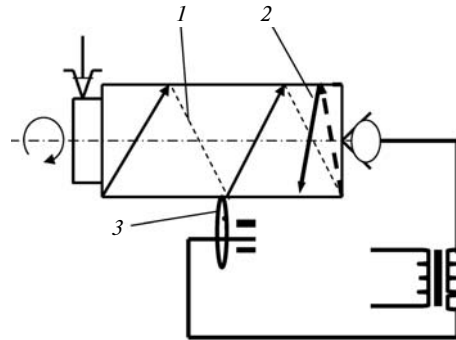


Рис. 1. Схема термического воздействия для создания локальной метастабильности в обрабатываемом материале:

1 — след локального воздействия; 2 — след плоскости резания; 3 — устройство локального воздействия

заготовок с локальным воздействием использовалась динамическая модель (1), в которой функция управления ψ , обеспечивающая введение в систему локального воздействия, реализовывалась уравнением

$$\psi(G_i) = \begin{cases} G_1 & \text{при } mT_{Pm} \leq t < (mT_{Pm} + T_P), \\ & \text{где } T_P = \text{const}, T_{Pm} = \text{const}; \\ G_2 & \text{при } (mT_{Pm} + T_P) \leq t < (m+1)T_{Pm}, \\ & \text{где } T_{Pm} - T_P = T_m = \text{const}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $G_1 \{c_1, c_2, \beta_2\}$ и $G_2 \{c_1^1, c_2^1, \beta_2^1\}$ — параметры состояния, отражающие процесс стружкообразования в исходном материале и в зоне локального изменения свойств материала; T_{Pm} — период локального воздействия; T_P — период резания в исходном материале; T_m — период резания в зоне локального воздействия; m — число локальных воздействий, которое в первом приближении определяется динамическими свойствами технологической системы и длиной витка стружки.

По методике, изложенной в работе [9], осуществлялось моделирование квазиупругих и диссипативных характеристик процесса стружкообразования в исходном материале $G_1 \{c_1, c_2, \beta_2\}$ и в локальной зоне $G_2 \{c_1^1, c_2^1, \beta_2^1\}$.

На элементы разделены выделенные фрагменты пластического деформирования и элемента стружки. Рассчитать перемещение внутренних узлов сетки для исходного материала и для выделенного фрагмента, отражающего

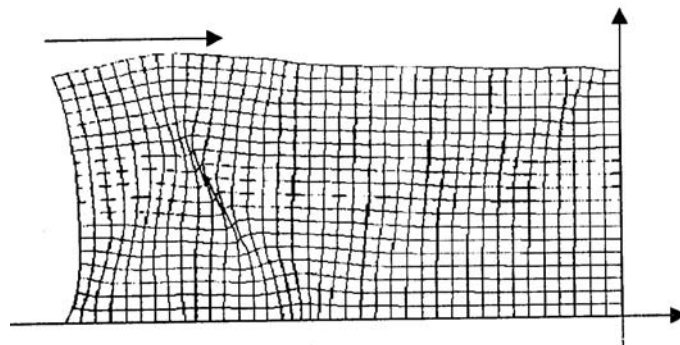


Рис. 2. Фрагмент изменения деформации ε по сечению деформируемого материала при локальном термическом воздействии

локальное термическое воздействие для заданных перемещений, позволил метод конечных разностей на равномерной сетке (рис. 2).

Построить границу области устойчивости в плоскости параметров $b_c - V_s$ при резании с предварительно подготовленной методом термического воздействия поверхностью заготовки (см. рис. 1) позволило решение системы уравнений (1) при реализации условий деформации и фазовых переходов (см. рис. 2), а также функции управления (2) по локальному пластическому воздействию.

Необходимо иметь представление о влиянии неустойчивого процесса резания на стружкодробление при обработке заготовки, подвергнутой локальному термическому воздействию. Это связано с тем, что при токарной обработке в реальных условиях устойчивость технологической системы зависит от многих факторов, и изменение любого из них может привести к такому процессу.

Проанализировав осциллограммы, можно заявить, что автоколебательный процесс не оказывает влияния на устойчивость процесса стружкодробления, а локальное термическое воздействие не приводит к развитию автоколебательного процесса.

Проведены экспериментальные исследования виброперемещения для подсистемы инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности заготовки из материала сталь 45 с локальным термическим воздействием на станке модели 1K62. Использовался специальный измерительный динамический стенд. Результаты подтвердили наличие устойчивого процесса резания и на-

дежного формирования стружкодробления в области неустойчивого процесса резания.

Теоретические и экспериментальные исследования поведения технологической системы станка при лезвийной обработке заготовок с локальным термическим воздействием показали, что асинхронное воздействие переменных составляющих квазиупругих и диссипативных параметров зоны термического воздействия, обусловленное различием структуры и механических свойств в основном металле и в локальной зоне, позволяет обеспечить дробление стружки широкого класса обрабатываемых материалов на отрезки заданной длины, что увеличивает производительность и точность механической обработки. Отклонения теоретически полученной границы области устойчивости (см. рис. 3) от построенной по экспериментальным данным составили 17–23 %. Отделение витков стружки длиной $L_{\text{вит}}$ наблюдается при обработке заготовок с поверхностью, предварительно подготовленной методом локального воздействия. Как результат предложена принципиально новая динамическая модель технологической системы механической обработки с учетом реологических особенностей процесса стружкообразования [9], позволившая исследовать динамические характеристики на основе инновационных особенностей технологии материалов с использованием программной среды LabVIEW как в области устойчивого процесса резания, так и в области автоколебаний (см. рис. 3).

Использование метастабильного свойства материала позволяет предложить новый метод управления процессом механической обработки

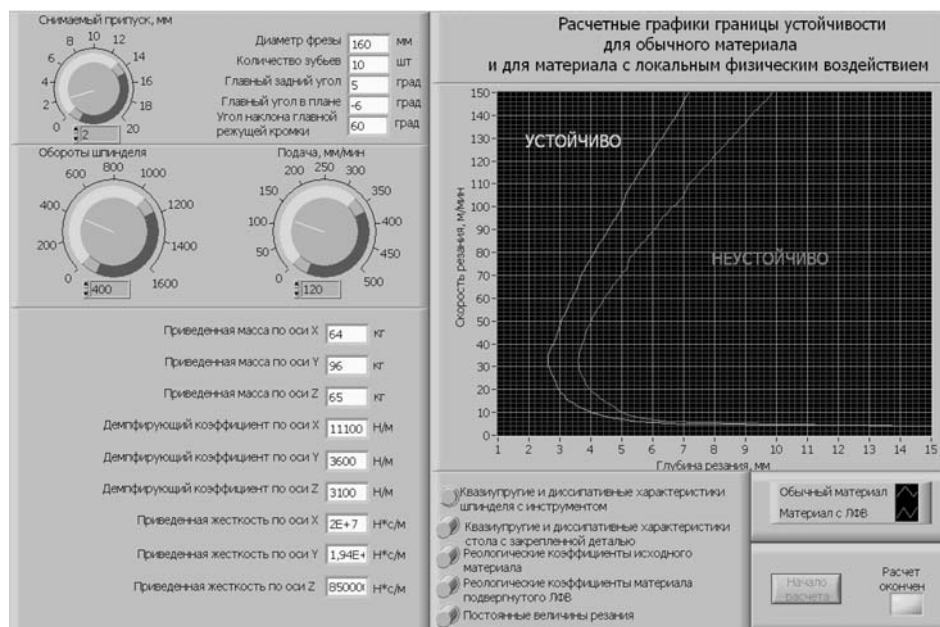


Рис. 3. Расчетные границы области устойчивости технологической системы механической обработки на основе инновационных особенностей технологии материалов с использованием программной среды LabVIEW

лезвийным инструментом на станках с CNC и рекомендации по автоматизации технологического процесса механической обработки на основе управления процессом стружкообразования.

Основные результаты работы:

1. Разработан метод, основанный на локальном воздействии на поверхность материала, которое приводит к изменению кристаллической решетки в локальной зоне — в ней образуются высокоэнергетические конфигурации и возникает повышенная метастабильность структуры. Все это позволяет обеспечить в процессе резания периодическое изменение условий обработки в локальной зоне по сравнению с исходным материалом.

2. Теоретические исследования периодических изменений параметров рассматриваемой системы, вызываемых локальным воздействием с частотой, значительно меньшей (в 50–100 раз) частоты собственных колебаний системы, позволяют обеспечить устойчивость системы при изменении частот локального воздействия и собственных колебаний в пределах технологически возможных диапазонов.

3. Низкочастотное параметрическое локальное физическое воздействие на потенциально

автоколебательную систему с частотой колебаний, значительно превышающей частоту воздействия, можно рассматривать как наложение на систему дополнительных вынужденных колебаний с частотой локального воздействия и амплитудой, равной разнице в величине статических сил резания, обусловленной различием механических свойств металла в рассматриваемых зонах.

4. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что один из эффективных методов, основанных на создании локальной структурной метастабильности на внешней поверхности срезаемого слоя обрабатываемого материала, реализуемый по определенным законам, позволяет надежно управлять процессом резания труднообрабатываемых материалов и обеспечить прогнозирование динамической стабилизации при обработке высокоточных изделий, что в свою очередь открывает возможности дальнейшего совершенствования технологии обработки в широком диапазоне материалов и режимов резания.

* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Максаров, В.В.** Автоматизация и управление процессом стружкообразования при предварительном пластическом воздействии на обрабатываемый материал [Текст] / В.В. Максаров, Ю. Ольт.— СПб: Изд-во СЗТУ, 2008.— 217 с.
2. **Maksarov, V.** Materjalide Loiketeooria ja Loikurid [Текст] / V. Maksarov, J. Olt.— Tartu: Eesti Maaulikool, 2008.— 132 lk.
3. **Olt, J.** Tootearendus ja Toodangu Kvaliteet [Текст] / J. Olt, V. Maksarov. Tartu: Eesti Maaulikool, 2008.— 132 lk.
4. **Максаров, В.В.** Управление процессом многолезвийной механической обработки [Текст] / В.В. Максаров, Ю. Ольт.— СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009.— 161 с.
5. **Maksarov, V.** Physical argumentation of deformation processes potential control while cutting heavily processed material [Текст] / V. Maksarov, J. Olt, T. Laatsit, T. Leemet // 6th International DAAAM Baltic Conference «industrial engineering».— 24–26 April 2008.— Tallinn, Estonia.— S. 263–268.
6. **Maksarov, V.** Methods of preliminary local physical action on the workable surface of the blank [Текст] / V. Maksarov, J. Olt // 7th International Scientific Conference. «Engineering for rural development».— 29–30 May, 2008.— Jelgava, Latvia.
7. **Maksarov, V.** Increase in the stability of technological system with control of the process of the cutting [Текст] / V. Maksarov, J. Olt, T. Leemet // international science conference of material science and manufacturing technology.— 26–27 June 2008.— Prague, Czech Republic.— S. 1–5.
8. **Максаров, В.В.** Управление процессом стружкообразования методом предварительного локального пластического воздействия на обрабатываемую поверхность заготовки [Текст] / В.В. Максаров, Ю. Ольт // Известие вузов. Машиностроение.— 2008, № 6.— С. 45–51.
9. **Maksarov, V.** Analysis of the rheological model of the process of chip formation with metal machining [Текст] / V. Maksarov, J. Olt // Engineering of Agricultural Technologies.— 17–20.09.2008, Kaunas, Lithuania.— S. 249–253.



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.52:504 546.49-121:546.23

С.Н. Бритвин, А.В. Глуховской, А.В. Коршунов

УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕМЕРКУРИЗАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП С ФИЛЬТРАЦИЕЙ РТУТИ НА АДсорбЕНТЕ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА И СЕЛЕНА

Ртуть относится к наиболее токсичным неорганическим ядам, в отношении которых принимаются жесткие меры государственного контроля [1]. Основными техногенными источниками поступления ртути в окружающую среду являются продукты сгорания угля на тепловых электростанциях и разрушенные отработавшие люминесцентные лампы [2]. Большую экологическую опасность представляют потерявшие свою целостность энергосберегающие компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). В среднем каждая КЛЛ содержит около 5 мг металлической ртути [2], и в случае разрушения лампы этого количества достаточно для превышения ПДК паров ртути (300 нг/м^3) в жилом помещении объемом 15000 м^3 . Повсеместное использование КЛЛ в бытовых осветительных приборах при отсутствии должной информированности населения и удобных пунктов утилизации КЛЛ приводит к особенности загрязнения ртутью именно этим путем: большинство КЛЛ попадают в бытовые отходы, а ртуть при разрушении КЛЛ селективно концентрируется в границах населенных пунктов [3].

Правила обращения с ртутьсодержащими осветительными приборами регламентируют порядок сбора и переработки люминесцентных ламп на территории Российской Федерации [1]. Существующие методы очистки лома отработавших люминесцентных ламп от ртути (демеркуризация) могут быть подразделены на две категории [4]: гидрометаллургические методы и термическую десорбцию ртути.

Метод термической десорбции ртути (ТДР) основан на нагреве лампового лома до высокой температуры (до $800\text{--}900^\circ\text{C}$), при этом ртуть

полностью удаляется в виде паров и улавливается в конденсирующих и фильтрующих узлах перерабатывающего оборудования. Демеркуризация происходит в одну стадию с получением свободного от ртути лампового лома, пригодного для дальнейшей безопасной переработки или захоронения. Этим метод ТДР выгодно отличается от гидрометаллургической и сухой низкотемпературной демеркуризации, при которых всегда образуются ртутьсодержащие отходы. Кроме того, метод ТДР решает проблему удаления ртути из твердых амальгам (сплавы ртути с висмутом, свинцом, индием и др.). Амальгамы широко используются как источники паров ртути именно в КЛЛ [5] и отличаются высокими (более 200°C) температурами термического разложения. Проблема демеркуризации амальгамсодержащих КЛЛ не комментируется в российской литературе и судя по результатам анализа литературных источников не имеет технического решения у отечественных производителей демеркуризационного оборудования.

В данной статье впервые рассматривается возможность применения метода ТДР с использованием нового наноструктурированного адсорбента, позволяющего значительно повысить эффективность процесса демеркуризации отходов, содержащих как металлическую ртуть, так и ртуть, входящую в состав амальгам. Метод ТДР с применением разработанного селенсодержащего адсорбента существенно отличается в положительную сторону от применяемых в настоящее время методов демеркуризации с использованием модифицированных активированных углей (МАУ) как по количественным, так и по качественным характеристикам. Сле-

дует отметить, что нанокристаллический адсорбент на основе диоксида титана и селена устойчиво работает при высоких температурах, вплоть до 280 °С, при этом является пожаробезопасным. Это существенно расширяет его возможности, позволяя рассматривать как перспективный материал для поглощения ртути в различных промышленных процессах, генерирующих горячие ртутьсодержащие газообразные отходы.

Необходимый элемент конструкции оборудования, использующего метод ТДР, — модуль поглощения (адсорбции) паров ртути. В качестве адсорбентов ртути в настоящее время используются МАУ [6]. Однако МАУ как адсорбенты ртути имеют технологические недостатки, среди которых наиболее значительны:

низкая адсорбционная емкость по ртути, не превышающая 0,5 вес. % у лучших марок МАУ, импрегнированных серой;

низкая селективность в отношении ртути;

сложность (или невозможность) регенерации ртути из отработанных МАУ, в особенности из МАУ, импрегнированных серой;

сравнительно низкая термическая устойчивость МАУ в окислительной атмосфере.

Низкая адсорбционная емкость МАУ послужила причиной поиска новых типов адсорбентов ртути. Адсорбенты на основе оксидов, импрегнированных нанокристаллическим палладием, [7] являются хорошими поглотителями ртути (емкость до 3 вес. %), однако высокая стоимость палладия препятствует их широкому применению. Один из наиболее эффективных адсорбентов ртути — красный аморфный селен [2], необратимо связывающий пары ртути с образованием стабильного селенида ртути HgSe (тиманнит). Адсорбционная емкость красного

аморфного селена по ртути превышает 15 вес. % [2]. Однако красный аморфный селен — метастабильная модификация селена, при температуре выше 50 °С он легко переходит в серый кристаллический селен, не способный поглощать пары ртути. Этого недостатка лишен новый нанокompозитный адсорбент на основе слоистого диоксида титана и селена [8], получаемый восстановлением селенистой кислоты на слоистом титанате гидразина ЛНТ-9 [9]. Адсорбционная емкость нового нанокompозита по ртути достигает 13 % в весовом исчислении [8]; в то же время адсорбент, в отличие от красного селена, стабилен в воздушной атмосфере до 280 °С. Другие технические преимущества нанокompозита TiO₂/Se перед модифицированными активированными углями сведены в таблицу.

Термическая устойчивость титан-селенового адсорбента позволяет использовать его для фильтрации горячих газов, что легло в основу создания экспериментальной малогабаритной установки по переработке компактных люминесцентных ламп методом высокотемпературной термической десорбции (рис. 1, 2). Основные модули экспериментальной установки (рис. 2): щековой измельчитель ламп 1, муфельная печь 2, медный теплообменник (концевой холодильник) 3, модуль фильтрации 4 и вакуумный насос 5, служащий для прокачки технологического воздуха через систему. Модули установки закреплены на алюминиевой раме 6. Загрузка и выгрузка контейнера с ламповым ломом, регулировка температуры в муфельной печи и фильтрующей системе, а также скорость прокачки технологического воздуха через систему производится с электрического щита управления (рис. 1), что позволяет настраивать режи-

Технические преимущества нанокompозита TiO₂/Se перед модифицированными активированными углями

Свойства адсорбента	МАУ	TiO ₂ /Se
Максимальная сорбционная емкость по Hg, вес. %	0,5	13
Селективная сорбция Hg	нет	да
Максимальная рабочая температура, °С	150	280
Воспламеняемость на воздухе	да	нет
Возможность регенерации ртути	—	да

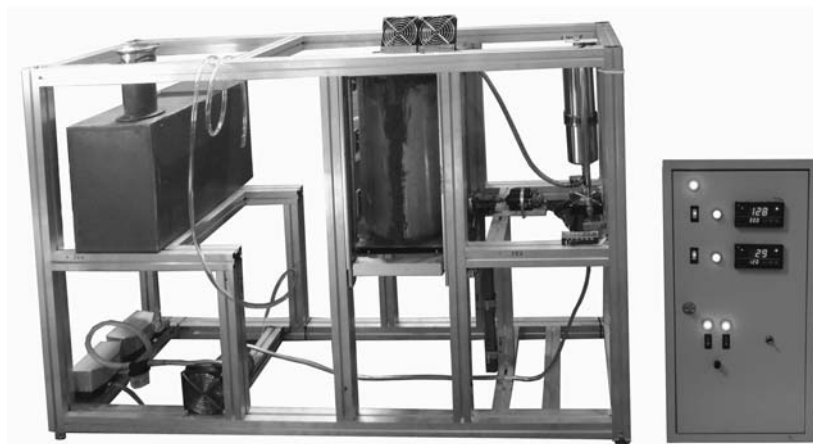


Рис. 1. Общий вид установки по переработке компактных люминесцентных ламп (слева) и электрического щита управления (справа)

мы фильтрации технологического воздуха в пределах технических параметров установки. При разработке экспериментального процесса переработки КЛЛ учитывался тот факт, что компактная люминесцентная лампа — достаточно сложный прибор, состоящий из следующих функциональных частей (рис. 3): пластикового цоколя (материал — полибутилентерефталат); электрической схемы, включающей катушки индуктивности, конденсаторы и др., закрепленные на текстолитовой плате; стеклянной газоразрядной трубки с люминофором.

Люминофор представляет собой микрокристаллический порошок (рис. 4), наносимый на внутреннюю поверхность газоразрядной трубки. Согласно результатам наших исследований КЛЛ торговой сети Санкт-Петербурга состав люминофора от разных производителей существенно различается и может включать: оксид иттрия Y_2O_3 , алюминат бария и магния (BAM) $BaMgAl_{10}O_{17}$, фторапатит $Ca_5(PO_4)_3F$, монацит $CePO_4$, повеллит $CaMoO_4$, борат стронция и бария $(Sr,Ba)B_2O_4$. В качестве допирующих добавок в компоненты люминофора входят лантаноиды,

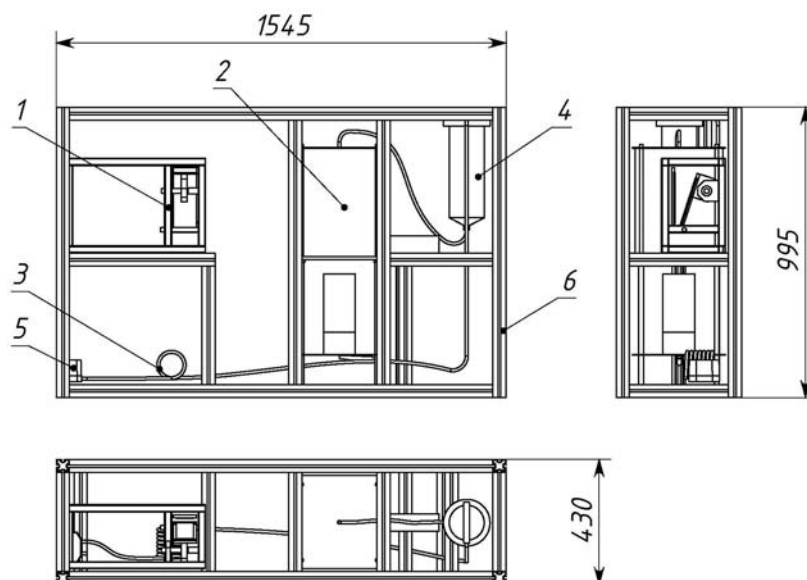


Рис. 2. Чертеж общего вида установки по переработке компактных люминесцентных ламп

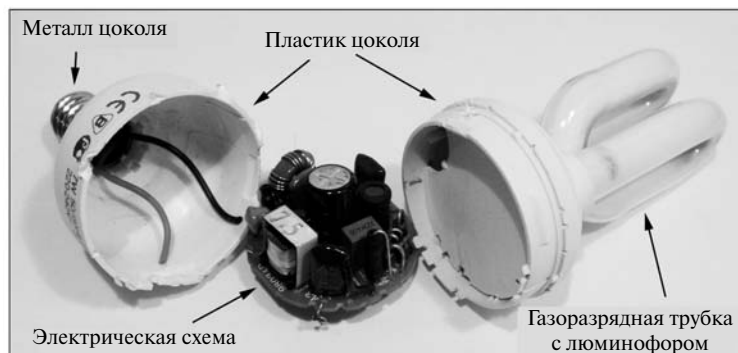


Рис. 3. Компактная люминесцентная лампа в разобранном виде

главным образом европий и тербий. Таким образом, химический состав стандартной КЛЛ представлен более чем двадцатью различными химическими элементами, в том числе токсичными (ртуть, свинец). Полная химическая переработка КЛЛ с выделением всех разнородных по химизму элементов может быть экономически оправдана только в условиях крупного промышленного предприятия. Поэтому разработанный экспериментальный процесс демеркуризации не предусматривал полную химическую переработку КЛЛ, а преследовал две основные цели: 1) полное удаление ртути из лома КЛЛ; 2) демеркуризацию (очистку от ртути) прокачиваемого через лом КЛЛ горячего технологического воздуха. При этом содержание ртути в очищенном ломе КЛЛ не должно превышать 0,1 вес. % (отходы IV класса опасности), а со-

держание паров ртути в технологическом воздухе на выходе из модуля фильтрации должно быть ниже 0,01 мг/м³ (ПДК паров ртути в воздухе производственных помещений). Содержание ртути в технологическом воздухе измерялось с помощью анализатора ртути РА-915М (ЗАО Люмэкс, Санкт-Петербург). Содержание ртути в демеркуризованном ломе ламп измерялось в растворных вытяжках после кислотной обработки лома с помощью приставки РП-91 к прибору РА-915М. Схема процесса демеркуризации общей продолжительностью 60 мин. включает следующие стадии:

Стадия процесса	Время от начала процесса, мин.
Запуск электрических систем установки. Включение системы прокачки технологического воздуха	1
Включение измельчителя (дробилки) приемного узла	2±1
Последовательная загрузка компактных люминесцентных ламп в измельчитель. Получение лампового лома и его выгрузка в контейнер	8±2
Загрузка контейнера с ламповым ломом в муфельную печь	10±2
Доведение температуры муфельной печи до 300 °С	27±3*
Выдерживание лома ламп в муфельной печи при 300 °С	33±3
Доведение температуры муфельной печи до 500 °С	40±3

* Начиная с этой стадии производится измерение концентрации паров ртути в прокачиваемом технологическом воздухе.

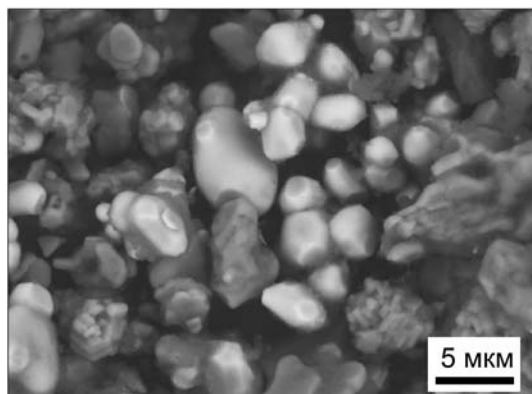


Рис. 4. Микроструктура (РЭМ фото в обратнорассеянных электронах) люминофора КЛЛ Philips (цветовая температура 6500 K).

Светлые округлые зерна — оксид иттрия Y_2O_3 , темные зерна — алюминат бария и магния (BAM) $BaMgAl_{10}O_{17}$, допированный лантаноидами

Выдерживание лома ламп в муфельной печи при 500 °С	45±3
Доведение температуры муфельной печи до 800 °С	55±5
Выдерживание лома ламп муфель- ной печи при 800 °С	
Выгрузка контейнера с очищенным от ртути ламповым ломом из муфельной печи	60±5

Основные технические характеристики экс-
периментальной установки:

Максимальная загрузка КЛЛ	10 шт.
Рабочая температура муфельной печи	до 800 °С
Рабочая температура адсорбента в модуле фильтрации, °С	100–250
Объем адсорбента в модуле фильтрации	300 см ³
Время контакта технологического воздуха с адсорбентом	1, с
Общее время процесса демеркури- зации лома КЛЛ	60, мин.
Концентрация паров ртути в техно- логическом воздухе на выходе из модуля фильтрации	0,002, мг/м ³
Содержание ртути в демеркуризиро- ванном ломе КЛЛ	0,04, %

Температурный режим демеркуризации КЛЛ предусматривает нагрев и выдерживание лома ламп при максимальной температуре 800 °С. Это связано с тем, что при более высокой температуре происходит расплавление стекла КЛЛ, что затрудняет последующую выгрузку демеркуризованного лома из погрузочно-разгрузочного контейнера. Получаемый демеркуризованный лом КЛЛ может отправляться на дальнейшую химическую переработку. Необходимо подчеркнуть, что проведение химической переработки

предварительно демеркуризованного лома КЛЛ, в отличие от исходного лома ламп, не представляет экологической опасности с точки зрения возможного ртутного загрязнения паров воздуха или сточных вод, что само по себе значительно упрощает и удешевляет процесс переработки.

Разработана экспериментальная установка и экспериментальный технологический процесс по очистке лома компактных люминесцентных ламп от ртути. В качестве метода демеркуризации выбрана высокотемпературная термическая десорбция, а в качестве поглотителя паров ртути — новый эффективный нанокристаллический адсорбент на основе диоксида титана и селена.

Концентрация паров ртути в очищенном технологическом воздухе, прокачиваемом через модуль фильтрации установки, составляет 0,002 мг/м³, что в пять раз ниже предельно допустимой концентрации паров ртути (0,01 мг/м³) в воздухе производственных помещений. Содержание ртути в демеркуризованном ломе компактных люминесцентных ламп составляет 0,04 %, что позволяет обращаться с этим ломом как с отходами IV категории опасности или пускать их в дальнейшую, безопасную по ртути, химическую переработку.

Показано, что новый нанокompозитный адсорбент на основе диоксида титана и селена может стать эффективным заменителем активированных углей в установках по демеркуризации ртутьсодержащих отходов, а также в системах очистки горячих промышленных газов от паров ртути.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № 16.515.11.5023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 3 сентября 2010 г. № 681.
2. **Johnson, N.C.** Manchester S., Sarin L., Gao Y., Kulaots I., Hurt R.H. // *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 5772–5778.
3. **Eckelman, M.J.** Anastas P.T., Zimmerman J.B. // *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 8564–8570.
4. **ГОСТ Р 52105–2003.** Классификация и методы переработки ртутьсодержащих отходов [Текст].
5. **Lankhorst M.H.R.,** Keur W., Van Hal H.A.M. // *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, 309, 188–196.
6. **Granite E.J.,** Pennline H.W., Hargis R.A. // *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2000, 39, 1020–1029.
7. **Poulston S.,** Granite E.J., Pennline H.W., Myers C.R., Stanko D.P., Hamilton H., Rowsell L., Smith A.W.J., Ilkenhansa T., Chu W. // *Fuel*, 2007, 86, 2201–2203.
8. WO 2011/116788 A1 (IPC C01G 23/00) Layered Titanates, 2011.
9. **Britvin S.N.,** Lotnyk A., Kienle L., Krivovichev S.V., Depmeier W. // *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133, 9516–9525.

УДК 528.089.2

*Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев,
С.В. Хохряков, А.А. Широков*

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Современные методы измерения геомагнитного поля

Магнитное поле Земли принято разделять на две части: главное поле, обусловленное электрическими токами вихревых течений в проводящем веществе ядра, и аномальное магнитное поле намагниченных горных пород литосферы. Последнее — стационарно, тогда как вектор \vec{B}_m магнитной индукции геомагнитного поля (ГМП) испытывает значительные вековые вариации (ВВ), которые являются предметом изучения магнитометрии. Кроме того, существуют суточные вариации ГМП, обусловленные электрическими токами в ионосфере.

Для изучения пространственно-временной структуры ГМП традиционно используются данные магнитных обсерваторий (МО), повторных станций (ПС), региональных магнитных съемок. Однако не все из них способны выполнять векторные измерения. В значительной степени доступными оказываются лишь модульные данные (измеряется абсолютное значение вектора магнитной индукции). Ввиду недостаточного числа МО (в настоящее время в систему Intermagnet включено около 100 МО) и их неравномерного распределения по земной поверхности (наибольшая плотность — в Европе, очень редкая — в пределах океанов, Африке, Азии, восточной части России) в последние десятилетия магнитные измерения стали выполняться с низколетящих (на высоте 100–300 км) спутников.

Спутниковые измерения ГМП

Первые спутниковые измерения проводились на космических аппаратах (КА) OGO-2 (1965 г.), Космос-49 (1967 г.) и др. Орбиты этих спутников имели большой эксцентриситет (по высотам — 300–1500 км), измерения были модульными.

Новая спутниковая эпоха началась в 2000 году запуском серии низкоорбитальных спутников Orsted, CHAMP, SAC-C (Orsted-2), оснащенных трехкомпонентными феррозондовыми магнитометрами, модульными *OVN*-магнитометрами, системами астроориентации. Орбиты последних двух спутников — круговые (соответственно около 500 и 700 км). Спутниковые данные успешно используются при построении глобальных моделей ГМП (IGRF—International Geomagnetic Reference Field). Однако их использование показало, что по крайней мере в двух областях изучения вековых вариаций спутниковые измерения неудовлетворительны, это:

распределение и дрейф локальных, имеющих размеры до 3 тыс. км, фокусов ВВ;

структура и эволюция джерков, т. е. кратковременных ускорений ВВ.

Для исследования этих проблем спутниковые наблюдения, как и измерения, осуществляемые сетью стационарных МО, в настоящее время не обеспечивают нужной густоты сети наблюдений [3, 4].

Изучение вековых вариаций ГМП по спутниковым данным

Вековые вариации выявляются путем сравнения регулярных, через 5 лет, повторных измерений ГМП по всей Земле [4]. Для обработки данных традиционно используются два метода:

построение карт изопор (изменения значения ГМП между отстоящими на 5 лет периодами) и сравнение этих карт по ряду пятилетних интервалов. При составлении карт в существенной степени используются данные наземной магнитной съемки. Метод позволяет выделить фокусы ВВ, т. е. области, ограниченные замкнутыми изопорами, их зарождение, дрейф и распад. Его применение ограничено в основном недостаточной густотой сети наблюдений;

использование для представления ГМП модели сферического гармонического анализа, выявление временного дрейфа коэффициентов разложения за пятилетний интервал.

Последний метод базируется на представлении геомагнитного потенциала рядом по сферическим полиномам [2]. Эта модель положена в основу деятельности International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Потенциал V в геоцентрических координатах — r , θ , λ — записывается в виде

$$V(r, \theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n \left(g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \right) \times P_n^m \cos \theta,$$

где r — расстояние от центра Земли; θ — дополнение географической широты, то есть полярный угол; λ — долгота; R — стандартный радиус Земли (6371,2 км); $g_n^m(t)$ и $h_n^m(t)$ — коэффициенты Гаусса, зависящие от времени t (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/> — ссылка на таблицу коэффициентов международного эталона для периода 2011–2015 годов (IGRF-11)); P_n^m — нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m .

Примеры результатов, получаемых с помощью описанных выше подходов, представлены на рис. 1, 2 (по данным [1]).

На рисунках представлены изолинии магнитного склонения одного и того же участка земной коры. Видно, что данные, полученные по модели IGRF, не сохраняют информации о локальных особенностях вариации ГМП.

В работе [2] отмечено, что для поддержания и повышения точности навигации по магнитному полю необходимо не реже, чем раз в 10 лет, проводить глобальные магнитные съемки. В промежутках между съемками должны регулярно проводиться измерения абсолютных значений ГМП и его вариаций с помощью сети обсерваторий и мобильных пунктов векового хода (один раз в 2,5–5 лет). Для повышения точности в ключевых точках могут быть установлены наземные станции для выдачи в реальном времени поправок для корректировки склонения.

В данной статье для мониторинга ГМП и его вариаций предлагается использовать распреде-

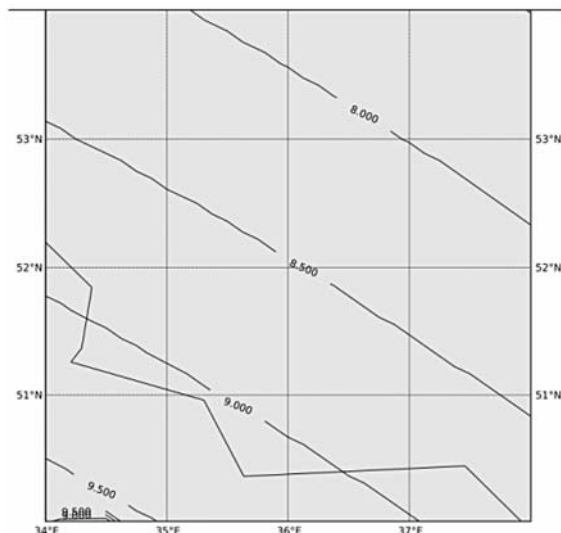


Рис. 1. Изолинии магнитного склонения по модели IGRF

ленную систему сверхмалых спутников на круговых орбитах с радиусами около 500 км и периодом оборота вокруг Земли около 90 минут. Измерения вектора магнитной индукции ГМП, выполняемые с заданной периодичностью, могут быть приведены к условной сферической поверхности с географическими координатами, согласованными с географическими координатами Земли.

Для приведения измерений к условной сферической поверхности орбит положим, что из-

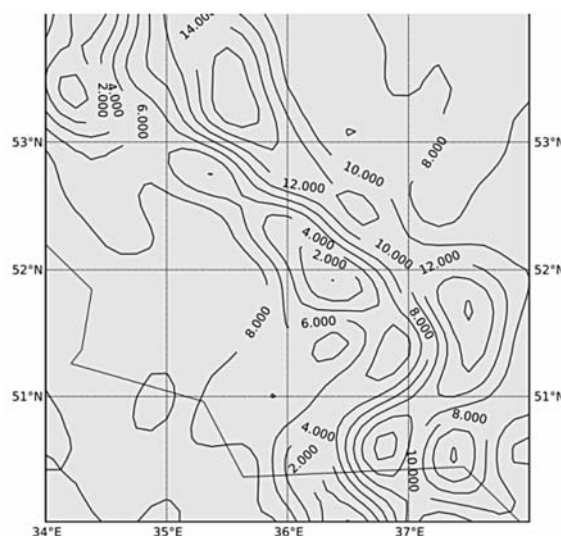


Рис. 2. Изолинии с учетом магнитного поля источников в коре

мерения компонент вектора магнитной индукции $\vec{B} = (B_1, B_2, B_3)$ имеют вид: $\{B_s(r_i, \theta_i, \lambda_i)\}_{i=1}^N$. Далее опустим нижний индекс, полагая, что в формулы может быть подставлена любая из компонент. Предположим также, что

$$B(r_i, \theta_i, \lambda_i) = B(R, \theta_i, \lambda_i) + B'\varepsilon_i = B_i + B'\varepsilon_i,$$

где ошибка ε в радиусе орбиты — случайная величина, не зависящая от координат на сфере, распределена по нормальному закону с нулевым средним и постоянной дисперсией. Учитывая, что как число спутников, так и количество измерений вектора магнитной индукции, приходящееся на характерную площадь поверхности сферы за время наблюдений, велико, такое предположение представляется разумным. В работе [3] отмечено, что влияние погрешностей положения на высотах спутника из-за малости градиентов ГМП невелико. Выберем систему базисных функций $\{\varphi_k(\theta, \lambda)\}_{k=1}^M$, задав на поверхности условной сферы стандартную, но принятую единожды для всей предполагаемой совокупности измерений триангуляцию, так что ее узлы имеют фиксированные значения географических координат. Возможно также использование сетки с прямоугольными на сфере ячейками, стороны которых расположены на линиях постоянной широты и долготы. Будем также предполагать, что базисные функции имеют локальные носители, т. е. каждая базисная функция однозначно связана с одним из узлов сетки, принимает единичное значение в нем и отлична от нуля только в смежных этому узлу ячейках. Аппроксимация рассматриваемой компоненты вектора магнитной индукции на поверхности сферы имеет вид

$$b(\theta, \lambda) = \sum_{k=1}^M b_k \varphi_k(\theta, \lambda).$$

Используя стандартную процедуру метода наименьших квадратов, получим для определения неизвестных b_k систему

$$\sum_{l=1}^M b_l H_{lk} = \psi_k; \quad k = 1, \dots, M.$$

Коэффициенты H_{lk} и ψ_k имеют вид

$$H_{lk} = \sum_{i=1}^N \varphi_k(\theta_i, \lambda_i) \varphi_l(\theta_i, \lambda_i);$$

$$\psi_k = \sum_{i=1}^N B_i \varphi_k(\theta_i, \lambda_i).$$

Ввиду того, что базисные функции имеют локальный характер, суммирование в последних формулах приходится выполнять только по тем точкам, которые лежат внутри ячеек, смежных соответствующему узлу сетки.

Оценим теперь количество космических аппаратов, составляющих распределенную измерительную систему. Очевидно, что размер локальных особенностей ГМП на земной поверхности ограничивается снизу характерным диаметром орбиты распределенной измерительной системы. Пусть характерный радиус орбиты составляет 500 км. Тогда характерный размер поперечника ячейки сетки должен составлять порядка 1–2 градусов. Соответственно триангуляция должна содержать порядка 10000 узловых точек. Для оправдания сделанных предположений относительно распределения ошибки ε необходимо, чтобы на каждую ячейку приходилось не менее нескольких десятков точечных измерений вектора индукции. Таким образом, необходимо выполнить порядка двух миллионов измерений в точках, распределенных равномерно по поверхности стандартной сферы.

Современные векторные феррозондовые магнитометры обеспечивают точность значений компонент до ± 5 нТл и дискретизацию по времени 5 с [3]. Таким образом, для того чтобы выполнить полностью магнитную съемку для всей поверхности Земли, достаточно суточной работы группировки из 20 наноспутников.

Техническая и экономическая сторона предлагаемого подхода в отношении мониторинга факторов околоземного пространства подробно рассмотрена в [1]. По отношению к измерениям ГМП использование распределенной измерительной системы должно обеспечить исследование локальных особенностей вариаций ГМП, что традиционно применяющиеся спутниковые измерительные системы не позволяют. Возможно также, что относительно небольшое время сбора данных, обеспечиваемое системой, делает ее полезной для исследования антропогенного фактора влияния на геомагнитное поле Земли.

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 15 марта 2010г. № 02.740.11.0529 с Минобрнауки России.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов, Н.А. Распределенные сети мониторинга факторов околоземного пространства на базе сверхмалых космических аппаратов [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко, Д.А. Кочкарев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4. — С. 157.
2. Петров, В.Г. Магнитное поле Земли и проблемы его использования для навигации и ориентации [Текст] / В.Г. Петров, Ю.А. Амиантов, Ю.А. Бурцев // Матер. конф. «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований». — 22–26 мая 2012 г., г. Троицк. — МО, ИЗМИ РАН.
3. Ладынин, А.В. Векторные магнитные измерения с феррозондовыми теодолитами [Текст]: Методическое пособие / А.В. Ладынин, А.А. Попова, Н.Н. Семаков. — Новосибирск: НГУ, 2005. — 89 с.
4. Lowes, F.J. The International Geomagnetic Reference Field: a «health» warning [Текст] / F.J. Lowes // IAGA Division V-MOD Geomagnetic field modeling: IGRF proper use. — 2010. — [Электрон. ресурс] <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod>

УДК 519.7:681.51

*В.О. Агеев, Т.Л. Качанова,
Б.Ф. Фомин, О.Б. Фомин*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РЕИНЖИНИРИНГА ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ

Производство металлопродуктов рассматривается как открытая производственная система (ПС). В качестве исходного представления ПС используется эмпирическое описание (ЭО). В ЭО отражаются: все этапы производственного цикла; все доступные регулярному контролю показатели процесса производства товарной продукции; все характерные актуальные состояния ПС. На основе ЭО методами физики открытых систем (ФОС) автоматически генерируется научное знание: о состояниях ПС; об изменчивости ее показателей; о внутрисистемных механизмах, формирующих изменчивость показателей. Полученное знание используется при подготовке реинжиниринга ПС, направленного на устранение, предупреждение или снижение риска возникновения проблем и на повышение качества, безопасности и эффективности производственных процессов.

Подходы и методы ФОС

ФОС — посткибернетическая парадигма системологии [1, 2]. ФОС предложила новый подход, в рамках которого преодолевается сложность открытых систем [3–5]. Научные основания и те-

оретические положения ФОС привели к созданию информационных технологий, обеспечивших: научное понимание и рациональное объяснение системной организации; автоматическую генерацию системного знания; выявление и оформление на основе системного знания внутрисистемных закономерностей [6–9].

Производство знания на базе технологий ФОС осуществляется на двух онтологических уровнях — системном и предметном (рис. 1).

Формирование контекста. В контексте представлены эмпирические и экспертные знания об открытой системе, жизнедеятельность которой тесно сопряжена с исследуемыми проблемами. Формирование контекста связано с полным отображением жизнедеятельности системы: через эмпирические данные мониторинга ее состояний; через данные контроля изменений ее внешнего окружения; через данные, полученные при отслеживании трендов глобальных ограничений.

Системные реконструкции. Технология ФОС, осуществляющая системные реконструкции, создает ЭО, генерирует *информационный ресурс знания*, производит *базовое знание* о системе [6].

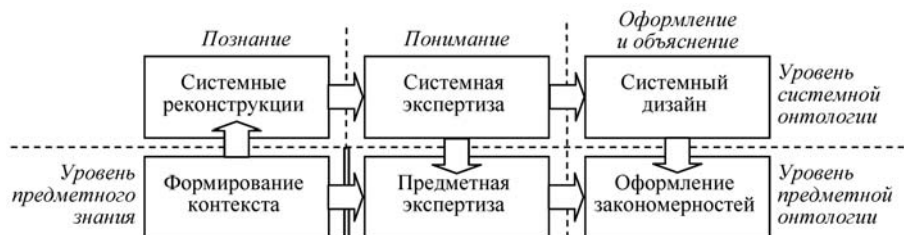


Рис. 1. Технологическая схема производства, понимания, объяснения и оформления системного знания

Базовое знание (*интеллектуальный ресурс знания*) образуют: семейство *системных моделей*, определяющих систему во всех ее качественных определенностях; семейство *моделей взаимодействия*, определяющих систему во всех возможных реальных формах проявления всех ее свойств и качеств.

Системная экспертиза. Технология ФОС, осуществляющая системную экспертизу, выполняет смысловой анализ системы, достигает научного понимания, объяснения и детерминации всех элементов системного знания, проводит квалиметрическое оценивание полученного знания, формирует *когнитивный ресурс знания* о системе и проблемах [5].

Системный дизайн. Технология ФОС, осуществляющая системный дизайн, синтезирует *модели состояний* системы, определяет *эмерджентные свойства* системы, выявляет, описывает и оценивает *механизмы формирования* состояний системы, свойств и уровней значений ее показателей, моделирует *эволюцию состояний* и *поведение показателей* системы, создает *технологический ресурс знания* о системе и проблемах [7].

Предметная экспертиза. Технология ФОС, осуществляющая предметную экспертизу, преобразует знание о состояниях и механизмах системы уровня системной онтологии в унифицированные *когнитивные схемы* предметной онтологии. Когнитивные схемы дают состояниям и механизмам содержательное оформление, направляющее и организующее деятельность экспертов-предметников. Знание о системе становится *когнитивным ресурсом решений* системных проблем [7–9].

Оформление закономерностей. Технология ФОС, осуществляющая оформление закономерностей, работает с системным знанием уровней

системной и предметной онтологий. Она актуализирует ресурсы знания, формирует, организует и предоставляет *технологический ресурс решений* проблем [7].

Исходные данные о системе и системной проблеме

В статье приводится решение задачи аналитической подготовки реинжиниринга металлургического производства на основе системного знания, полученного методами и технологиями ФОС. Объектом реинжиниринга является процесс производства стального листа [7].

Показатели производственного процесса:

Этап процесса	Показатели
Загрузка и расплавление шихты	C_Pl, Mn_Pl, P_Pl, S_Pl, Cr_Pl, Ni_Pl, Cu_Pl, Mo_Pl (по расплавлению), %
Окислительный период	tOk (длительность окислительного периода), мин
Восстановительный период	tBoc (длительность восстановительного периода), мин
	T_v (температура металла перед выпуском), °C
	CaO, SiO ₂ , FeO, Al ₂ O ₃ , MgO (в шлаке), %
	C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, Mo, Ti, Al (в стали), %
Выпуск стали	T_p (температура металла в ковше), °C
Разливка стали	MasSl (масса слитка), т
	tOt, tOp (время отливки: тела слитка; прибыли), мин
	Vacuum (вакуум) (1 — есть; 2 — нет)
Затвердевание стали	tIzl (время выдержки в изложнице), мин

Передача слитков на ковку	tPoc (время посадки в печь), мин tKop (время копежа), мин
Нагрев слитков под ковку	TPech (температура печи при посадке), °C tNagr, tVud (время: нагрева; выдачи), мин
Ковка	tKov (время ковки), мин d (диаметр слитка), мм d_1 (отношение диаметра слитка к толщине брамы), — TMetal (температура металла в конце ковки), °C
Прокатка брамы на лист	Weight (масса), т L1, L2, L3 (длина, ширина, толщина листа), (мм) l_L3 (отношение толщины брамы к толщине листа)
Оценка механических свойств листа	Rpo, Rm (предел текучести, предел прочности), МПа Udl (относительное удлинение), %

ЭО системы. Формат ЭО — таблица наблюдений. Строки таблицы — состояния системы. Столбцы таблицы — показатели, характеризующие состояние, внешнее окружение и глобальные ограничения системы. Каждое состояние системы описывает историю производства какого-то одного стального листа. Количество строк характеризует представительность ЭО, количество столбцов — полноту ЭО.

ЭО содержит 288 строк и 50 столбцов. В ЭО представлены 288 историй производства готовых изделий (весом от 1,1 до 20 т), полученных при прокатке брам (толщиной от 0,45 до 0,95 м), откованных из слитков (массой от 3 до 56 т; диаметром от 0,89 до 1,5 м), выплавленных в 110 плавках. Сдаточными показателями товарного стального листа являются: C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, Mo, Ti, Al — показатели химического состава металла; Rpo, Rm, Udl — показатели механических свойств листа.

Проблема воспроизводимости производственного процесса. Рынок предъявляет определенные требования к сдаточным показателям товарного стального листа, а именно: 1) значения сдаточных показателей каждого стального листа должны принадлежать регламентированным диапазонам; 2) выборочные распределения значений

сдаточных показателей товарной продукции должны отвечать нормальному закону. Все сдаточные показатели в ЭО удовлетворяют первому требованию и не удовлетворяют второму. Значимые отличия выборочных распределений сдаточных показателей от нормального закона свидетельствуют о нарушении воспроизводимости производства. Восстановление воспроизводимости — системная проблема. Для ее решения проводят реинжиниринг производственного процесса, задачами которого на этапе анализа проблемной ситуации являются: 1) выяснение несоответствий фактического функционирования производственного аппарата и действующих регламентов производства; 2) определение множественных внешних и внутренних факторов влияния, интегральным эффектом которых могла стать потеря воспроизводимости; 3) раскрытие, описание, научное понимание и рациональное объяснение множественных механизмов, действующих внутри ПС и детерминирующих значения сдаточных показателей.

Третья задача — наиболее сложная. В случае ее решения реинжиниринг производственного процесса будет основан на научном знании.

Решение

Производство знания о внутрисистемных механизмах формирования изменчивости сдаточных показателей показано на примере показателей механических свойств стального листа (Rpo, Rm, Udl), контролируемых на последнем этапе производственного процесса. Их изменчивость зависит от результатов выполнения всех этапов производственного процесса. Внутрисистемные корреляции этих показателей со всеми другими показателями отображаются через парные связи, вычисленные по данным, представленным в ЭО (рис. 2). На рис. 2 типы стрелок выделяют группы показателей, имеющих значимую статистическую парную связь с Udl, Rm, Rpo; во вложенных блоках указаны показатели, общие для Udl и Rm или для Rm и Rpo.

Информационный ресурс знания. Информационный ресурс создается в результате формирования и паспортизации ЭО системы. Паспортизация связана с сертификацией качества и потенциала ЭО. При сертификации качества оцениваются полнота и представительность ЭО. При сертификации потенциала для каждого по-

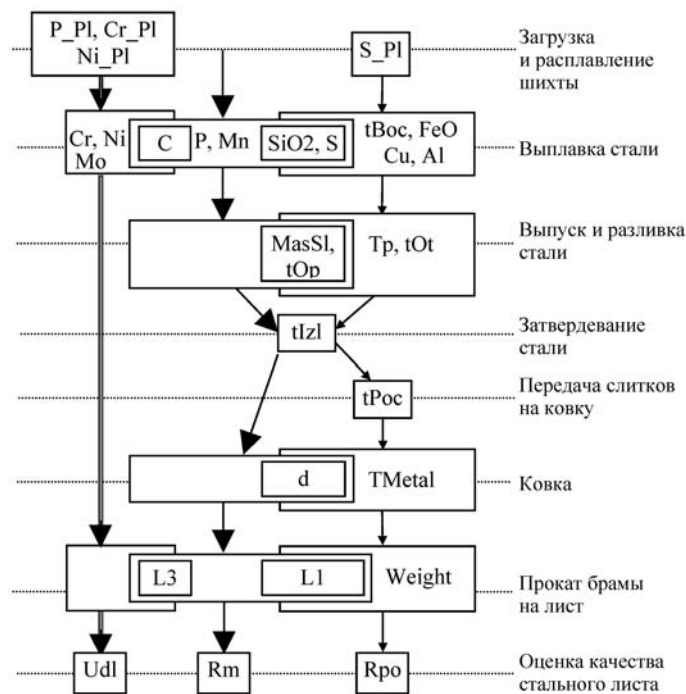


Рис. 2. Схема парных взаимосвязей показателей Rpo, Rm, Udl с другими показателями производственного процесса

казателя определяются: количественные оценки представительности, коррелятивности, осуществленности, системной обусловленности, представительности типичного и особенного, выражения внутрисистемных корреляций, акцентирования существенного; 1-й и 2-й информационные ранги; потенциалы адекватности

1-му и 2-му информационным рангам [5, 7]. В наименованиях классов показателей по 1-му и 2-му информационным рангам приняты обозначения: В — высокий, СР — средний информационный ранг; П — позитивный, НТ — нейтральный потенциалы адекватности информационному рангу (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент сертификата потенциала для сдаточных показателей

Свойство	Показатели*				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Представительность		$Mn > Rpo$	$Si > Ni > Cr > Cu$	$Al > S \sim P > Mo$	$Rm > Udl > C > Ti$
Коррелятивность	$Cu > P > Ni > Al > S$	Mn	$Cr > Mo$	$Si > C$	$Rpo > Rm > Ti > Udl$
Осуществленность	Mn	$P \sim S \sim Cr > C$	$Si > Al > Cu > Ni$	Mo	$Udl > Ti > Rpo > Rm$
1-й информационный ранг	Mn	$P \sim Cr > Cu > Ni > Al$	$S > Si$	Mo	$C > Rpo > Rm > Udl > Ti$

Окончание табл. 1

Свойство	Показатели*				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Системная обусловленность	Cu > Rpo	Ni > Mn > P	Al > S > C	Mo	Cr > Si > Rm > Ti > Udl
Представительность типичного и особенного	Rpo > Rm > Udl > Si > Mn	Ni	P > S > C > Cr	—	Cu > Mo > Al > Ti
Выражение внутрисистемных корреляций	Rm > Udl > Ti	Rpo > Cr ~ Mo > C	S	Si > Ni > P	Cu > Mn > Al
2-й информационный ранг	Rm > Rpo ~ Udl > Si	Cr > C ~ Ni	P ~ S	Mn ~ Cu ~ Mo	Ti > Al
Акцентирование существенного	Rm > Rpo > Udl > C	S	Cr > Cu > Ni	—	Al > P > Mo > Mn
Потенциал адекватности	Класс показателей				
	П/В		П/СР		НТ/В
По 1-му информационному рангу	—		—		P
По 2-му информационному рангу	—		S		Rpo, Rm, Udl, Cr

Показатели механических свойств выделены в табл. 1 жирным шрифтом.

Интеллектуальный ресурс знания. Первым компонентом интеллектуального ресурса является множество *системных моделей*, раскрывающих внутрисистемные механизмы, ответственные за формирование значений сдаточных показателей. Изменчивость 50 показателей ПС

описывают 33 системные модели [7]. В таб. 2 системные модели обозначены именем особой вершины и выделены курсивом. Жирным шрифтом выделена информация о показателях Rpo, Rm, Udl и вхождении этих показателей в системные модели.

Таблица 2

Вхождение сдаточных показателей в системные модели

Сдаточный показатель	Имя модели	Модели, в которых показатель формирует ядро	Модели, в которых показатель играет вспомогательную роль
Cu	<i>Cu</i>	<i>tBoc, CaO, Al2O, MgO, Si, Mn, Ni, Al, d, Weight, Rpo, tKop</i>	<i>P_Pl, S_Pl, tOk, FeO, L3, tPoc, d_l</i>
Ni	<i>Ni</i>	<i>P_Pl, Tp, CaO, Al, TMetal, tPoc</i>	<i>tOk, tBoc, FeO, Al2O, MgO</i>
Rpo	<i>Rpo</i>	<i>S_Pl, tBoc, Cu, Al, TMetal, d_l</i>	<i>d, Weight, tIzl, l_L3</i>
Mn	<i>Mn</i>	<i>CaO, SiO2, Al2O, d, L3</i>	<i>C_Pl, tOk, FeO, MgO, Si, TMetal, Weight, Rm, tPoc, tKop, d_l</i>

Окончание табл. 2

Сдаточный показатель	Имя модели	Модели, в которых показатель формирует ядро	Модели, в которых показатель играет вспомогательную роль
Al	<i>Al</i>	<i>tIzl</i>	<i>P_Pl, S_Pl, Ni_Pl, tOk, tBoc, Tp, CaO, FeO, Al2O, MgO, Si, Ni, Cu, TPech, TMetal, Rpo, d_l</i>
Rm	<i>Rm</i>	<i>L3</i>	—
Si	<i>Si</i>	—	<i>tOk, CaO, Al2O, Mn, Al, tPoc</i>
P	—	<i>P_Pl, S_Pl, Al, tOk, CaO, Al2O, Rm, tPoc, tKop</i>	<i>FeO, MgO, Si, Mn, Ni, L2, L3, tIzl</i>
S	—	<i>tOk, Al2O, Cu, Al, tIzl, Weight, L3, Rm, Rpo</i>	<i>C_Pl, P_Pl, S_Pl, Ni_Pl, Tp, CaO, Ni, d_l</i>
C	—	<i>P_Pl, tBoc, CaO, Mn, Al, Rm</i>	<i>Si, Ni, TPech</i>
Cr	—	<i>tBoc, Al2O, Al, TMetal, tVud</i>	<i>P_Pl, Ni</i>
Mo	—	<i>tBoc, Tp, Mn, Al</i>	<i>P_Pl, tOk, FeO, Ni</i>
Ti	—	<i>CaO</i>	<i>TMetal</i>
Udl	—	—	<i>P_Pl</i>

Показатели Cu, Ni, Rpo, Mn, Al, Rm, Si породили системные модели и тем самым раскрыли свои ведущие системные механизмы. Показатели P, S, C, Cr, Mo, Ti, Udl не создали системных моделей, но вошли в состав ядер многих моделей. Сдаточный показатель Udl фактически не проявил себя как элемент ПС — не породил собственной модели, не вошел в состав ядер системных моделей. Все показатели характеризуются сложностью (количеством механизмов, формирующих их изменчивость) и неопределенностью детерминации значений (табл. 3).

Изменчивость Rpo описывают системные модели *Rpo, S_Pl, tBoc, Cu, Al, TMetal, d_l, d, Weight, tIzl, l_L3*, изменчивость Rm — системные модели *Rm u L3*, изменчивость Udl —

системная модель *P_Pl*. Каждая системная модель представлена ее графическим образом [7] (рис. 3).

Каждая системная модель ПС порождает уникальные эталонные состояния, каждое из которых раскрывает характерное качество системы. Неэталонные формы состояний системы порождаются моделями взаимодействия — *синглетами, дублетами, триплетами* [6]. Эти модели образуют второй компонент интеллектуального ресурса, в составе которого: 212 синглетов; 91 дублет подобия — *SIM*; 79 дублетов переключения — *SWI*; 67 дублетов поглощения — *ABS*; 18 триплетов взаимного влияния — *INT* (табл. 4).

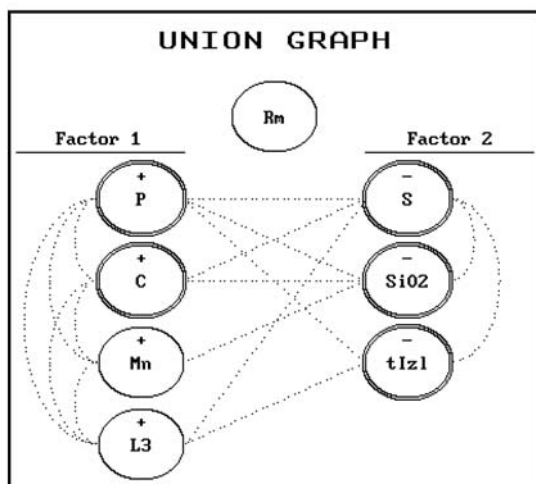
Модели взаимодействия расширяют знание о внутрисистемных механизмах. В эталонной

Таблица 3

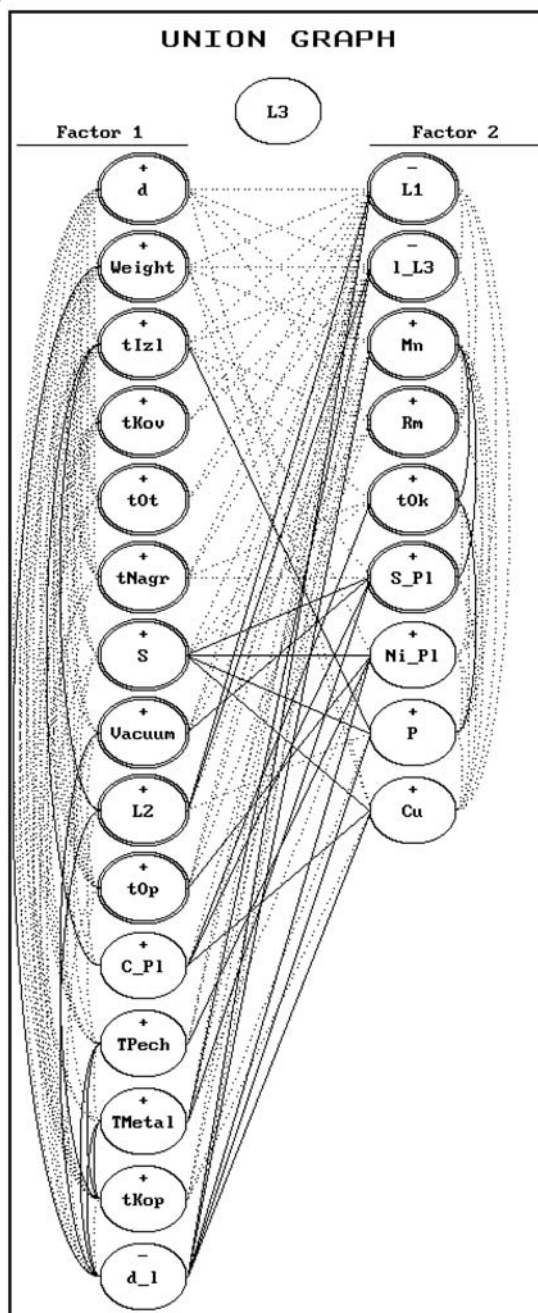
Сложность и неопределенность сдаточных показателей

Сдаточные показатели	Cu	Ni	Rpo	Mn	Al	Rm	Si	P	S	C	Cr	Mo	Ti	Udl
Число формирующих механизмов	20	12	11	17	19	2	7	17	17	9	7	8	2	1
Число неразрешенных противоречий	64	61	2	41	51	3	33	47	42	20	32	25	9	7

a)



б)



в)

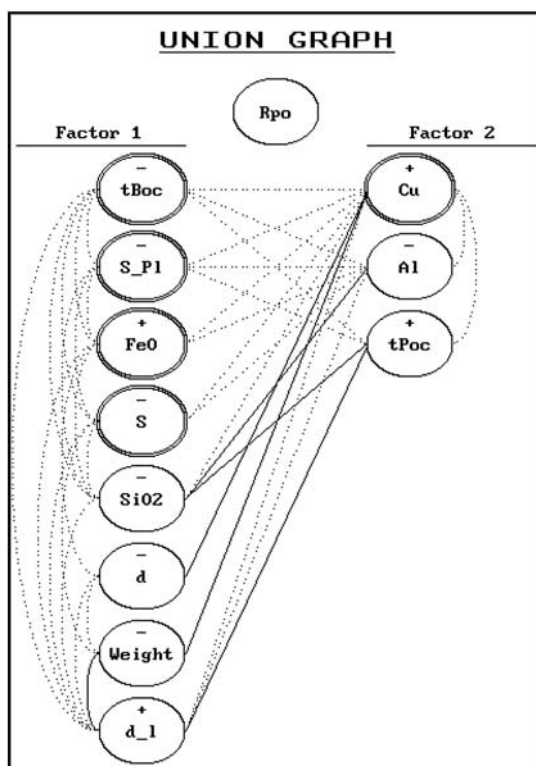


Рис. 3. Системные модели *Rm*, *Rpo* и *L3*:
двойным контуром обведены вершины ядра

Таблица 4

**Вхождение сдаточных показателей
в модели взаимодействия**

Показатель	Модели взаимодействия			
	<i>SIM</i>	<i>SWI</i>	<i>ABS</i>	<i>INT</i>
Cu	9	9	13	0
Ni	7	8	6	0
Rpo	6	12	12	0
Mn	2	4	2	0
Al	11	1	3	0
Rm	0	0	0	4
Si	1	0	0	0
P	7	2	1	0
S	6	6	7	0
C	0	2	1	0
Cr	8	1	1	0
Mo	4	1	0	0
Ti	0	0	0	0
Udl	0	0	0	0

модели система дана в условиях равновесия в одном ее уникальном качестве. Модели взаимодействия проявляют равновесия системы при неравновесных ограничениях.

Когнитивный ресурс знания. Научное понимание и рациональное объяснение интеллектуального ресурса знания выполняется путем: оце-

нивания качества, законченности, пригодности системных моделей; учета влияния моделей взаимодействия; определения качеств *эталонов и идеалов состояний* системы; сопоставления системных моделей с эталонами и идеалами; оценивания достоверности, актуальности, пригодности *эталонных форм представления состояний* системы [5].

Законченность структурной формы системной модели интегрально характеризуют количественные оценки *выраженности смысла* и *завершенности устройства*. Взятые вместе, они определяют *1-й системный ранг* модели. Воплощение системного смысла, раскрытого в системной модели, во множестве актуальных состояний (*кластер данных*) интегрально характеризуют количественные оценки *координированной раздельности* и *опознания состояний*. Взятые вместе, эти оценки задают *2-й системный ранг*.

Проблема воспроизводимости раскрывается: через упорядоченное множество *целевых* системных моделей, имеющих в своем составе сдаточные показатели; через оценки вклада каждой целевой системной модели в объяснение ключевых механизмов формирования изменчивости сдаточных показателей; через количественную оценку целевой системной модели по ее способности к *обособлению* и *фокусированию существенного*; через *1-й целевой системный ранг* целевой модели; через количественную оценку *контрастности выражения*, характеризующую основные признаки эталона локальности — симметризованность, внутреннюю согласованность, самодостаточность системной модели; через оценку *близости целевой системной модели к ее эталону* (табл. 5).

Таблица 5

Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: свойства и ранги моделей

Свойство	Системные модели				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Выраженность смысла	$Al > L3 > >CaO \sim d_l > >Al2 \sim Mn > >tOk \sim tBoc$	$tIzI \sim tKop > >Si \sim TMetal \sim \sim tPoc$	$Ni \sim Weight > >TPech \sim P_Pl \sim \sim Rpo > MgO \sim \sim C_Pl \sim FeO$	$l_L3 > Rm \sim \sim Tp \sim tVud \sim \sim Ni_Pl$	$Cu \sim S_Pl > >d > SiO2$
Завершенность устройства	$Rm > l_L3 > >Cu > d_l > >Rpo > d \sim \sim C_Pl$	$Ni_Pl > >Weight > >P_Pl$	$TMetal > tVud > >tIzI > SiO2 > >tPoc > tOk > >L3 > tKop$	$TPech > Mn > >MgO > S_Pl$	$Al > Tp > Ni > >FeO > Si > >CaO > Al2O > tBoc$

Окончание табл. 5

Свойство	Системные модели				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
1-й системный ранг	$L3 > d_l > tOk \sim \sim TMetal \sim$	$Mn \sim Al \sim \sim C_{Pl} \sim Rm \sim \sim tKop \sim P_{Pl}$	$tPoc > Cu \sim \sim TPech \sim \sim Ni_{Pl} > d \sim \sim MgO \sim tVud \sim \sim CaO$	$Al2O \sim Ni$	$TP \sim tBoc \sim \sim S_{Pl} \sim FeO \sim \sim SiO2 \sim Si$
Координированная раздельность	$Al > L3 > d_l > \sim tBoc > Al2O > \sim TMetal > \sim TPech \sim tPoc$	$tIzl > CaO \sim \sim S_{Pl} > \sim Weight$	$tKop > Mn > \sim tOk > Si > \sim P_{Pl} > Ni > \sim MgO > Ni_{Pl}$	$Rpo > FeO \sim \sim tVud$	$l_{L3} > Rm > \sim TP > Cu > \sim C_{Pl} > d \sim \sim SiO2$
Опознание состояний	$Al > Al2O > \sim CaO > tKop > \sim tBoc > Mn > \sim Rm \sim tPoc$	$Si > FeO > Ni > \sim d_l$	$TP > tOk > \sim TMetal > \sim Rpo > S_{Pl} \sim \sim MgO > tIzl > \sim C_{Pl} > Cu$	$P_{Pl} > l_{L3} > \sim d > tVud$	$SiO2 \sim Ni_{Pl} > \sim L3 > TPech \sim \sim Weight$
2-й системный ранг	$Al > tBoc \sim \sim Al2O > CaO \sim \sim tPoc \sim d_l > \sim tKop > Mn \sim \sim TMetal$	$Si \sim tOk > Ni \sim \sim tIzl \sim S_{Pl}$		$Ni_{Pl} \sim Cu \sim \sim C_{Pl} \sim \sim TPech$	$Weight \sim d > \sim SiO2$
Обособление суще- ственного	$Rpo > Rm > Cu > \sim S_{Pl}$	$TMetal \sim d_l$	$Al \sim tBoc > L3$	$l_{L3} \sim d$	$tIzl \sim Weight > \sim P_{Pl}$
Фокусы существен- ного	$Al > d_l > Rpo > \sim Cu$	S_{Pl}	$TMetal > tBoc > \sim L3 > Rm$	$Weight$	$tIzl > l_{L3} > d > \sim P_{Pl}$
1-й целевой систем- ный ранг	$Rpo > Cu > \sim S_{Pl} \sim d_l$	$Al \sim TMetal$	$Rm \sim tBoc > L3$	$l_{L3} \sim Weight$	$tIzl \sim d > P_{Pl}$
Контрастность выражения	$tVud \sim d_l > \sim TMetal \sim \sim Weight > Rm > \sim Ni_{Pl} \sim l_{L3} > \sim Al \sim L3$	$CaO > tPoc$	$Rpo > tBoc \sim \sim TP \sim P_{Pl} > \sim d > Cu > tKop > \sim Al2O \sim tOk \sim \sim Ni$	$C_{Pl} > FeO$	$MgO > SiO2 > \sim tIzl \sim Mn > \sim Si > TPech > \sim S_{Pl}$
Близость целевой модели к эталону	$d_l > TMetal \sim \sim Weight > Rm > \sim l_{L3} > Al \sim L3$		$Rpo > tBoc \sim \sim P_{Pl} > d > Cu$		$tIzl > S_{Pl}$
Итоговый целевой ранг	d_l, Al, Rm	$Cu, TMetal, L3$	$tBoc, Rpo, S_{Pl}$	$tIzl, P_{Pl}, Weight$	l_{L3}, d

Проблема воспроизводимости ПС далее раскрывается через интегральные количественные оценки качеств *оформленности* и *однородности* системной модели. По каждому из этих свойств определяются классы хороших, средних и плохих моделей (табл. 6).

На основе 1-х системных рангов системных моделей выявляется множество «сильных» моделей (носители *доминирующих механизмов*)

и формируются три класса моделей (П/В, П/СР, НТ/В), обладающих высоким или средним значением 1-го системного ранга и позитивным или нейтральным *потенциалом адекватности 1-му системному рангу*. На основе 2-х системных рангов моделей выявляются множества кластеров данных высокого и среднего качества, а также формируются три класса кластеров (П/В, П/СР, НТ/В), характеризующих *перспективы верифи-*

Таблица 6

Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: качество моделей

Свойства	Класс		
	хороших моделей	средних моделей	плохих моделей
Оформленность	<i>Tr, SiO2, d, C_Pl, l_L3, Cu, Rm, Ni_Pl, tVud, Rpo, d_l</i>	<i>FeO, Ni, L3, CaO, Al, Mn, tPoc, tKop, Si, Al2O, tOk, tIzl, MgO, Weight, S_Pl, TMetal, P_Pl, tBoc</i>	<i>TPech</i>
Однородность	<i>Tr, d, l_L3, Cu, Rpo, Rm, C_Pl, Ni_Pl, SiO2, Ni, tOk, tVud, d_l, tPoc, FeO, tIzl, Mn, Al2O, Si, MgO, CaO, Weight, S_Pl</i>	<i>tBoc, tKop, L3, P_Pl, TPech, Al, TMetal</i>	—

кации эталонных состояний, обладающих позитивным и нейтральным потенциалом адекватности 2-му системному рангу (табл. 7).

Каждая системная модель порождает эталонные модели поведения (стереотипы поведения): *Right*; *Left* (рис. 4). Каждый стереотип *Right* порождает эталонные модели состояний *High/Right* (краткая форма — *HR*); *Low/Right* (*LR*) (рис. 5). Каждый стереотип *Left* порождает эталонные модели состояний *High/Left* (*HL*); *Low/Left* (*LL*).

Эталонные модели состояний описаны через показатели, для которых определены: системные роли; уровни значений; системные значимости. Каждая эталонная модель отображается в кластер данных (набор представителей эталонного состояния в наблюдаемой реальности).

Технологический ресурс знания. История производства каждого стального листа описывает одно актуальное состояние ПС. В ЭО представлены 288 актуальных состояний системы. В технологическом ресурсе каждое актуальное состояние задано формальной моделью — реконструкцией состояния, а ПС в целом — множеством реконструкций всех актуальных состояний системы.

Технологический ресурс аккумулирует системное знание:

о формальных моделях актуальных состояний ПС, имеющих вид *сборок моделей форм воплощения эталонов* системы;

об *общей форме описания* ПС в состояниях, через которую получают рациональное объяснение *правил, ограничения, системные механизмы*, порождающие состояния системы;

о применимости формальных моделей реконструкций состояний ПС для объяснения *системных закономерностей* совместной согласованной изменчивости каждого показателя в каждом актуальном состоянии;

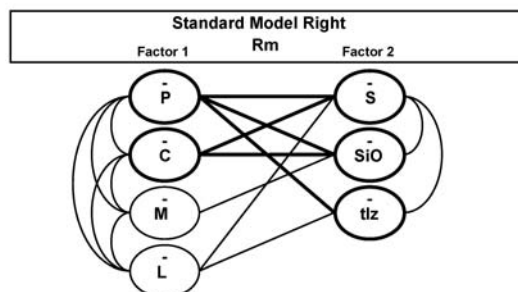
о *системной и предметной значимости* каждого показателя, объясняющих степень сопряжения понятого смысла и эмпирического факта;

о формальном определении каждого показателя через *наборы моделей системных механизмов*, отвечающих за *детерминацию уровня значения* показателя в каждом конкретном состоянии ПС, за выявление *потенциалов подвижности* показателей, за *неустойчивость частных механизмов* в этом состоянии (табл. 8, рис. 6).

Таблица 7

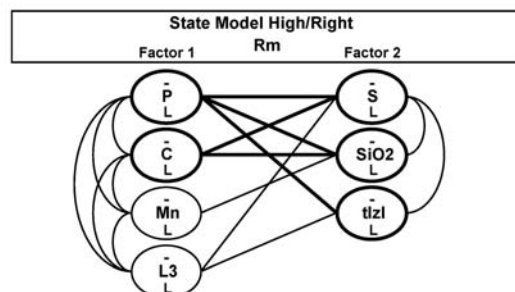
Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: классы моделей

Потенциал	Класс		
	П/В	П/СР	НТ/В
Для моделей	—	<i>C_Pl, Rpo, l_L3</i>	<i>TMetal, tPoc, d_l</i>
Для кластеров	<i>CaO</i>	<i>Si, Mn, Ni, tKop</i>	<i>tBoc, Al2O, Al, tPoc</i>



Значимость вершин фактора 1: $P > C > L3 > Mn$.
Значимость вершин фактора 2: $S > SiO2 > tIzI$.
Вершины ядра обведены жирным контуром.
Подтверждена роль всех вершин ядра

Рис. 4. Стереотип поведения Rm (Right)



Значимость вершин фактора 1: $P \sim C > Mn > L3$.
Значимость вершин фактора 2: $tIzI > S \sim SiO2$.
Вершины ядра обведены жирным контуром.
Подтверждена роль всех вершин ядра

Рис. 5. Эталонная модель Rm (HR)

Таблица 8

Формальное определение уровней значений сдаточных показателей (фрагмент)

Показатель	Актуальное состояние	Значение	Механизмы, формирующие уровень значения	Уровень значения	Надежность уровня
Rm	147585	493.8	$L3 (HL)$	3	Надежный
	148172	510	$L3 (HR)$	10	Допустимый
	148378	530	$Rm (HR), L3 (HR)$	14	Надежный
Rpo	147585	274.5	$Cu (HL), d_l (HR)$	3	Надежный
	148183	310	$S_Pl (HR), tIzI (HR), tBoc (HL)$ $Rpo (HR)$	13	Ненадежный
	148408	315	$Rpo (HL), d (HR), Cu (LL)$	14	Надежный

Когнитивный ресурс решений. Основной компонент когнитивного ресурса решений — когнитивные схемы внутрисистемных механизмов, формирующие качественные определенности системы. Внешними образами качественных определенностей служат системные модели, образующие интеллектуальный ресурс системного знания. Научное понимание системных моделей получено на этапе генерации когнитивного ресурса системного знания. Механизм одной отдельно взятой качественной определенности реконструируется по ее системной модели. Для этого генерируются когнитивные схемы механизмов факторов системной модели и синтезируется единая когнитивная схема механизма двухфакторного взаимодействия. Эту задачу автоматически решает технология предметной экспертизы (рис. 7).

На схеме: вершина d выражает идею фактора; блоки $(d, tIzI)$, $(tOp, tOt, tKov)$, $(Weight, L2)$, $(TMetal, C_Pl)$ связаны *отношением равнознач-*

ности; блоки $(d, tIzI)$ и $(TMetal, C_Pl)$ связаны *отношением несовместности*; элементы ядра связаны *отношением доминирования*; *отношения подчинения* распространяют смысл ядерных элементов на дополнительные вершины фактора. Элементы схемы наполнены конкретно-предметным содержанием (табл. 7).

Конкретно-предметное знание об элементах когнитивной схемы:

Главные элементы

d — процессы ликвации, размеры дендритов и междендритных объемов;

$tIzI$ — время затвердевания металла слитка, измельчение литого зерна, более полное выделение карбидов, нитридов, сульфидов, фосфидов по границам зерен;

tOp — «работа» прибыли, снижение загрязненности металла, увеличение плотности слитка;

tOt — развитие структурной, химической и физической неоднородностей металла слитка;

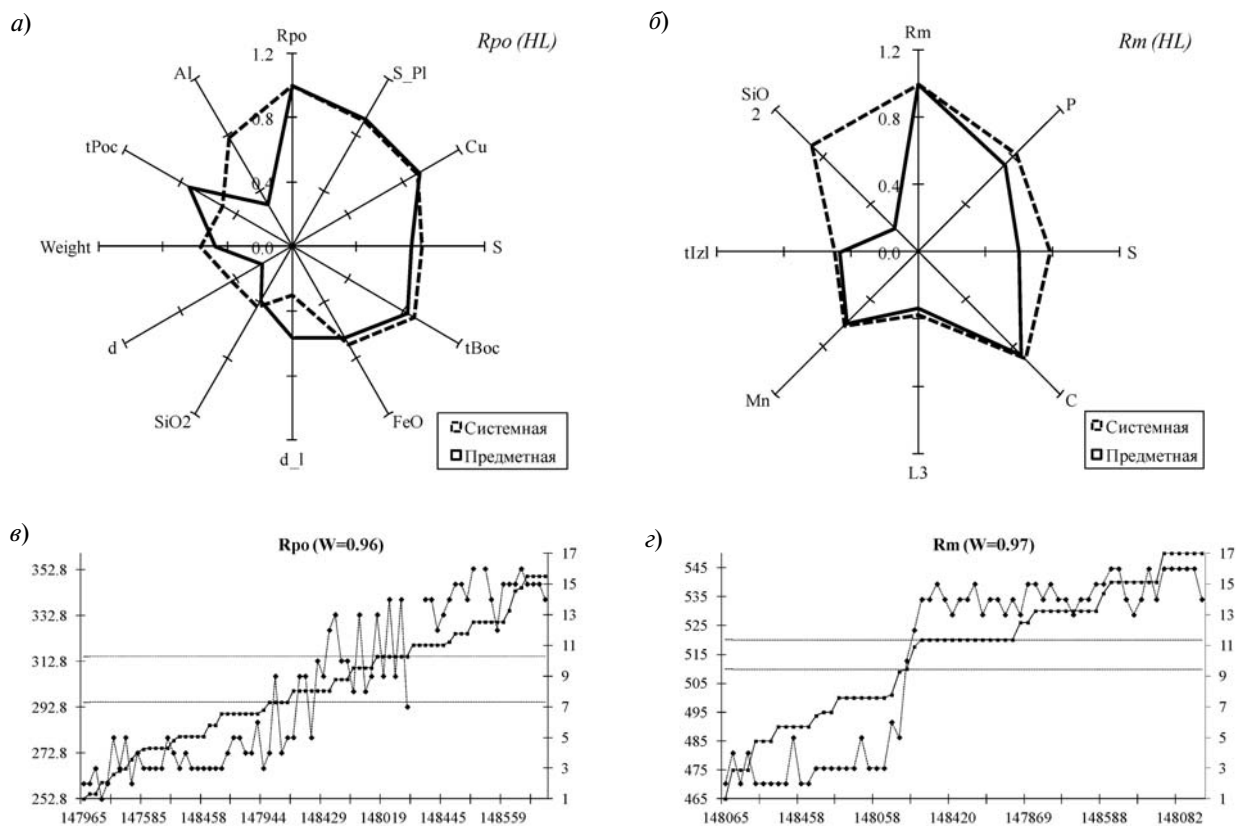


Рис. 6. Элементы технологического ресурса знания:

а — системная и предметная значимость R_{po} ; б — системная и предметная значимость R_m ; в — значения (сплошная линия) и уровни значений (пунктирная линия) R_{po} ; г — значения и уровни значений R_m ; W — значение коэффициента конкордации (оценки качества моделирования значения показателя уровнем его значения)

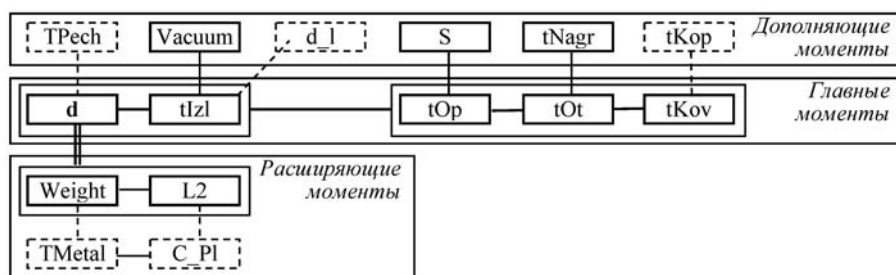


Рис. 7. Когнитивная схема механизма 1-го фактора системной модели L_3 (см. рис. 3)

tKov — разрушение дендритной структуры, формирование структуры кованого металла

Дополняющие элементы

TPech — окисление поверхности металла, выгорание углерода в поверхностных слоях, окисление поверхности трещин и подкорковых дефектов;

Vacuum — содержание водорода, азота и кислорода в металле;

d_1 — измельчение литого зерна и заваривание дефектов;

S — ликвация элементов химсостава, загрязненность металла неметаллическими включениями, продолжительность затвердевания, размеры литого зерна, образование микропористости;

tNagr — фазовая перекристаллизацию, интенсивный рост аустенитного зерна;

tKop — организация производства, размеры слитков

Расширяющие элементы

Weight — ликвация;

L2 — структура зерна;

TMetal — фазовые превращения, разрушение аустенитного зерна при окончательном охлаждении;

C_P1 — росту предела прочности с увеличением содержания углерода в стали

Аналогичным образом строится когнитивная схема фактора 2 модели L3. При построении

когнитивной схемы двухфакторного взаимодействия дополнительно вводятся *отношения консолидации, ассоциации, разделенности, сопряженности*. В когнитивном ресурсе решений представлены когнитивные схемы всех механизмов, отвечающих в системе за формирование ее качественных определенностей.

Технологический ресурс решений. Каждый стальной товарный лист описывается формальной моделью — *реконструкцией состояния ПС*, с которым был связан процесс изготовления этого листа. Реконструкция любого состояния характеризует каждый показатель ПС в данном состоянии набором атрибутов: рангом, уровнем значения, предопределенностью, важностью, подвижностью. Реконструкция состояния задает модель значения показателя в данном состоянии. Технологический ресурс решения исчерпывающим образом характеризует результаты моделирования наблюдаемой изменчивости всех показателей ПС (табл. 9).

Из табл. 9 следует, например, что наблюдаемая изменчивость показателей Rpo, Cu, Ni, P, S моделируется с высоким качеством, тогда как изменчивость Rm, Udl, Ti, Si моделируется с низким качеством. В ЭО имеется 158 актуаль-

Таблица 9

Оценки результатов моделирования значений сданных показателей

Показатель	Количество значений	Доля значений, не охваченных моделями	Число уровней значений		
			неопределенные	возмущенные	надежные
Cu	286	0,03	1	48	228
Ni	286	0,07	6	60	200
Rpo	158	0,03	2	43	108
Mn	286	0,06	0	103	165
Al	282	0,04	0	141	131
Rm	158	0,59	0	18	46
Si	286	0,41	1	75	92
P	286	0,05	2	60	209
S	286	0,03	5	101	171
C	286	0,21	6	85	134
Cr	286	0,22	0	93	131
Mo	281	0,12	0	81	166
Ti	281	0,80	2	33	20
Udl	158	0,77	3	21	12

Таблица 10

Модели механизмов, формирующих значения показателя R_{po} в актуальных состояниях ПС

Актуальное состояние	Классы моделей			Комментарий
	1	3	4	
147585	$Cu (HL)$	$d_l (HR)$	—	Надежный низкий уровень значения R_{po} обеспечен моделью класса 1 и подтвержден моделью класса 3
148183	$R_{po} (HR)$	$\frac{S_{Pl} (HR)}{t_{Boc} (HL)}$	$tIzI (HR)$	Ненадежный высокий уровень значения R_{po} обусловлен моделью класса 4
148408	$d (HR)$ $R_{po} (HL)$	$Cu (LL)$	—	Надежный высокий уровень значения R_{po} обеспечен моделями класса 1; модель класса 3 действует в направлении понижения уровня

ных значений R_{po} . Из них: 108 значений надежно моделируются уровнями значений (см. рис. 6, в); 43 значения моделируются *надежными, допустимыми* или *предельными* уровнями значений в зависимости от характера проявления свойственного этому показателю потенциала изменчивости в данных конкретных актуальных состояниях; два значения по моделям для R_{po} уровнями значений не определяются; для пяти значений R_{po} модели не были получены.

По реконструкциям всех актуальных состояний ПС известны все системные модели, детерминирующие состояния ПС. Множество системных моделей разбивается на пять классов. Классы моделей образуют две группы: классы 1 и 2 описывают механизмы, детерминирующие состояния системы; классы 3, 4 и 5 описывают механизмы, ответственные за изменчивость и подвижность состояний (табл. 10).

В табл. 8 для показателя R_{po} приведены механизмы, формирующие уровни его значений в трех конкретных актуальных состояниях. В табл. 10 эти механизмы, представленные в каждом состоянии соответствующими наборами моделей механизмов, разбиты на классы. Уровень значения R_{po} в каждом состоянии ПС получил рациональное объяснение.

Системное знание о состояниях ПС и внутрисистемных механизмах, определяющих ее

жизнедеятельность, представлено сертифицированными ресурсами знания о системе и ресурсами решения проблемы воспроизводимости производства.

Достигнуто научное понимание механизмов формирования изменчивости сдаточных показателей. Каждый механизм определен в его полноте, завершенности, сложности, способности раскрывать сущность процесса формирования значений сдаточных показателей, его вклад в надежную детерминацию или в изменение значений показателей в определенных производственных условиях и обстоятельствах.

Выявлены критические моменты производственного аппарата, связанные с потерей воспроизводимости: недостаточная наблюдаемость и управляемость производства по сдаточным показателям (см. R_m , Udl , Ti , Si); несовершенство производственных регламентов (несогласованность временных, температурных и массогабаритных параметров); многообразие и сложность внутрисистемных механизмов, определяющих значения сдаточных показателей и конечные свойства товарного стального листа (см. Cu , Al , P , S , Mn).

Полученное системное знание служит основой при разработке эффективных научно обоснованных мероприятий реинжиниринга, обеспечивающих воспроизводимость производства стального листа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fomin, B.F. Physics of Systems is a postcybernetic paradigm of systemology [Текст] / B.F. Fomin, T.L. Kachanova // Proc. the Intern. Sympos. Science 2.0 and Ex-

pansion of Science: «S2ES» in the context of The 14th World-Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: «WMSCI 2010», June 29th– July 2nd,



2010 / Orlando, Florida, USA.— P. 244–249.

2. Качанова, Т.Л. Физика систем— посткибернетическая парадигма системологии [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 3 (121).— С. 29–36.

3. Качанова, Т.Л. Основания системологии феноменального [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999.— 180 с.

4. Качанова, Т.Л. Метатехнология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.— 336 с.

5. Качанова, Т.Л. Введение в язык систем [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Наука, 2009.— 340 с.

6. Качанова Т.Л. Технология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Про-

блемы инновационного развития.— Вып. 2.— СПб.: Политехника, 2003.— 146 с.

7. Качанова, Т.Л. Методы и технологии генерации системного знания [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.— 132 с.

8. Fomin, B.F. Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge [Текст] / B.F. Fomin, T.L. Kachanova // Proc. the 3rd International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: «IMCIC 2012», March 25th – 28th, 2012 /Orlando, Florida, USA.— P. 41–48.

9. Качанова, Т.Л. Физика систем: производство системного знания [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2012.— № 2 (147). Т. 2.— С. 291–299.

УДК 73.29

*Б.С. Григорьев, О.А. Головин,
Е.Д. Викторov, Е.В. Кудряшов*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ДЛЯ СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В России активно развивается скоростное движение на электрифицированном железнодорожном транспорте. В 2009 году на линии Санкт-Петербург — Москва началась эксплуатация электропоездов «Сапсан» со скоростью движения до 250 км/ч. В 2010 году открыто сообщение между Санкт-Петербургом и Хельсинки с применением поездов «Аллегро», развивающих скорость 220 км/ч. К проведению чемпионата мира по футболу 2018 года планируется организовать скоростное движение на целом ряде других направлений, а также строительство выделенных высокоскоростных магистралей (ВСМ), на которых электропоезда будут развивать скорость до 350–400 км/ч. Перед российскими специалистами сегодня стоят задачи разработки элементов инфраструктуры новых скоростных и высокоскоростных линий, в том числе контактной сети.

Основная подсистема контактной сети — контактная подвеска, т. е. висячая система проводов,

предназначенная для передачи электрической энергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу (ЭПС) через скользящий контакт с токоприемником (рис. 1). На магистральных железных дорогах применяется цепная контактная подвеска, в которой контактный провод подвешивается к несущему тросу с помощью струн. Для снижения жесткости подвески около опор могут применяться дополнительные рессорные тросы.

При разработке скоростной контактной подвески необходимо решить проблему обеспечения надежного контакта между токоприемником и контактным проводом. При отрывах токоприемника от контактного провода или при недостаточной силе F_k контактного нажатия возникает электрическая дуга, что приводит к усиленному электрическому износу контактирующих элементов и ухудшает работу тягового оборудования ЭПС. При слишком сильном нажатии увеличивается механический износ

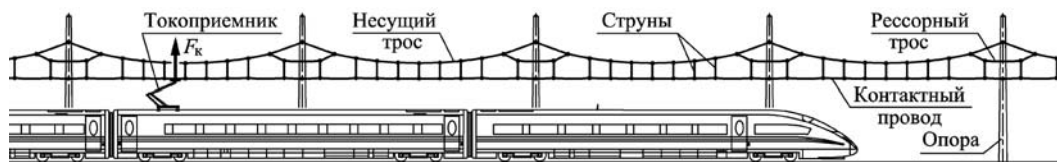


Рис. 1. ЭПС, контактная подвеска и ее основные элементы

контактируемых поверхностей, возникает опасность подъема контактного провода на недопустимую высоту и зацепления токоприемником отдельных элементов конструкции контактной подвески.

С увеличением скорости движения процесс динамического взаимодействия токоприемника и контактной подвески существенно усложняется. Значительную роль начинают играть колебательные и волновые явления в контактной подвеске, приводящие к изменению в широких пределах силы контактного нажатия и, как следствие, резкому ухудшению качества токосъема. Для уменьшения разброса силы F_k требуется совершенствование конструкций контактной подвески и токоприемников, оптимизация их параметров.

Исследования взаимодействия токоприемника и контактной подвески могут выполняться экспериментальными методами либо на основе математического моделирования [1]. В обоих случаях задачу о взаимодействии принято решать в два этапа.

На первом этапе рассматривается статическое приближение. Токоприемник заменяется силой F_k постоянной величины, действующей на контактный провод снизу вверх. Под действием силы F_k контактный провод поднимается на высоту Δh_k , различную в разных точках пролетов. Величину $e = \Delta h_k / F_k$ называют эластичностью контактной подвески в данной точке. Кривая изменения эластичности в пролете — важная характеристика контактной подвески. Для оценки неравномерности эластичности используют величину

$$\delta_e = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где e_{\max} и e_{\min} — соответственно максимальная и минимальная эластичности в пролете. В стандарте международного союза железных дорог [2] определены максимально допустимые значения

δ_e для различных эксплуатационных скоростей движения ЭПС.

На втором этапе решается динамическая задача с учетом инерционных свойств токоприемников и элементов подвески. Основным результатом является зависимость силы контактного нажатия F_k от времени или пространственного положения токоприемника, движущегося с заданной скоростью. Статистический анализ распределения силы контактного нажатия в пределах некоторого участка железной дороги позволяет наиболее объективно судить о качестве токосъема и о возможности эксплуатации рассматриваемых типов контактной подвески и токоприемников при заданной скорости движения.

Экспериментальные исследования на действующих участках железных дорог — чрезвычайно дорогостоящие мероприятия. Поэтому особую актуальность приобретает создание математических моделей взаимодействия токоприемника и контактной подвески и соответствующих компьютерных программ. Построение адекватных моделей, нацеленных на практическое использование разработчиками контактной сети, требует высокой степени детализации взаимодействующих систем и является достаточно сложной задачей. В мире насчитывается несколько подобных моделей и программ, однако все они — интеллектуальная собственность фирм-разработчиков и не доступны для широкого применения другими специалистами.

Компанией «Универсал — контактные сети» (УКС) совместно с кафедрой прикладной математики СПбГПУ разработаны собственные математические модели взаимодействия токоприемников и контактной подвески с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Статическая модель предложена в работе [3]. В качестве конечных элементов для моделирования проводов контактной подвески использованы пространственные элементы предварительно натянутой растяжимой гибкой нити.

Каждый узел такого элемента имеет три степени свободы: продольное, вертикальное и горизонтальное перемещения.

Стандартный процесс сборки матриц жесткости и внешних нагрузок отдельных элементов приводит к системе уравнений вида $\mathbf{RU} = \mathbf{F}$, где \mathbf{R} , \mathbf{U} , \mathbf{F} — соответственно глобальная матрица жесткости, векторы узловых перемещений и сил. Для определения натяжений конечных элементов проводов контактной подвески статическая задача решалась в нелинейной постановке. Алгоритмически решение сводилось к итерационному процессу $\mathbf{R}(\mathbf{U}_{i-1})\mathbf{U}_i = \mathbf{F}_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots$), продолжавшемуся до стабилизации значений перемещений \mathbf{U} и установления с заданной точностью величины натяжения каждого элемента. Построенные так итерации физически соответствуют процессу уравнивания сил в каждом узле системы. На каждой итерации получался новый вектор перемещений узлов системы и уточнялись натяжения элементов. Сходимость процесса зависит от выбора начального приближения и характера прикладываемой нагрузки. При сложной нагрузке предложенный метод комбинировался с поэтапным нагружением.

Еще одной особенностью статического расчета является учет эффекта возможной разгрузки струн. Поскольку струны могут работать только на растяжение, при сжатии какой-либо струны ее матрица жесткости исключается из глобальной матрицы.

В результате моделирования определяется пространственное положение узлов контактной подвески в состоянии статического равновесия и натяжения проводов в пределах отдельных конечных элементов. Для расчета распределения эластичности сила нажатия токоприемника F_k последовательно прикладывается к каждому конечноэлементному узлу контактного провода в расчетном пролете, и решается соответствующая задача статики.

На рис. 2 показана статическая модель анкерного участка контактной подвески и расчетная кривая распределения эластичности в пролете для типовой скоростной подвески КС-200–07, смонтированной на ряде участков магистрали Санкт-Петербург — Москва. Такая подвеска имеет двойной контактный провод 2×БрФ-120 с суммарным натяжением $K = 40$ кН, несущий трос М-120 с натяжением $T = 18$ кН,

рессорные тросы из провода ВЗП-35 с натяжением 3,0 кН и струны из гибких проводов ВЗП-16. Типовой пролет имеет длину 65 м. Контактный провод в середине пролета располагается с заданной стрелой провеса, равной 35 мм. Типовой анкерный участок подвески КС-200–07 состоит из 20–22 пролетов. На рис. 2, а для наглядности показан укороченный участок, включающий 5 пролетов. Эластичность, приведенная на рис. 2, б, рассчитана при силе нажатия токоприемника $F_k = 150$ Н.

В модель контактной подвески включены поворотные консоли и фиксаторы с целью учета их реакций. Адекватность статической модели подтверждена сравнением результатов расчетов эластичности с экспериментальными данными, полученными на участке Калашниково — Лихославль Октябрьской железной дороги в ходе испытаний контактной сети для скоростей движения свыше 200 км/ч. Расхождение расчета и эксперимента составило около 4 % [3].

Для расчета динамики контактной подвески использовалось волновое уравнение, которое после конечноэлементной дискретизации по пространственной переменной принимает вид

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{U}}{dt^2} + \mathbf{RU} = \mathbf{F}. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{U} — вектор перемещений подвески в узлах конечноэлементной сетки; \mathbf{M} — матрица масс; \mathbf{R} — матрица жесткости (полученная в результате решения статической задачи); \mathbf{F} — вектор внешних нагрузок. Перемещения \mathbf{U} полагаются малыми и отсчитываются от равновесного статического положения. Уравнение (2) необходимо дополнить начальными условиями, задав смещение и скорость в узлах конечноэлементной сетки.

Отметим, что вместо уравнения, описывающего колебания натянутой нити, иногда для расчетов динамики подвески используется более сложная модель стержня Эйлера — Бернулли. В работе [4] рассматривались обе эти возможности и было показано, что расхождение результатов становится существенным только для колебаний с высокой частотой, в то время как в спектральном разложении амплитуды колебаний контактного провода доминируют низкочастотные компоненты с частотой менее 50 Гц. Высокочастотные компоненты начинают играть

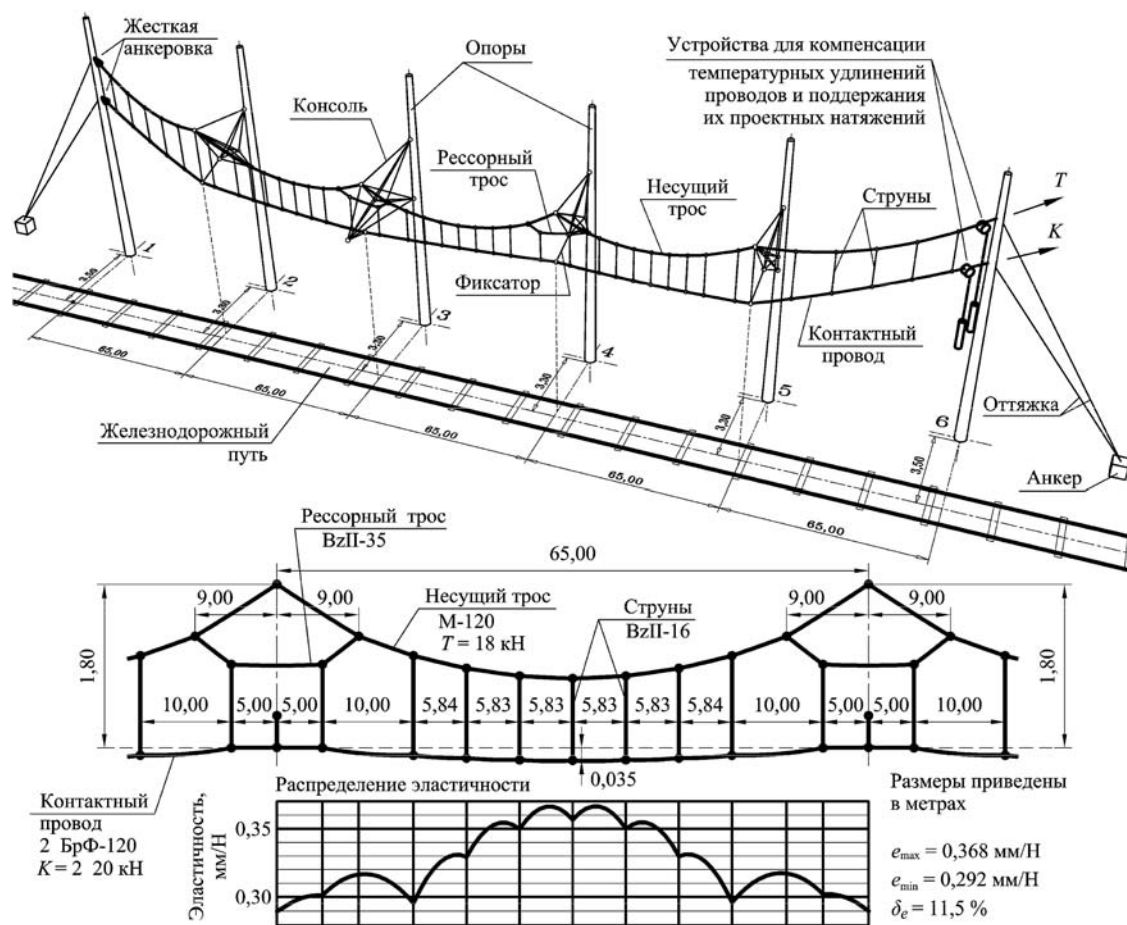


Рис. 2. Статическая модель укороченного анкерного участка контактной подвески (а) и расчетная кривая распределения эластичности в пролете подвески КС-200–07 (б)

существенную роль лишь при приближении скорости токоприемника к критической.

Как уже отмечалось, струны могут работать только на растяжение, поэтому в процессе расчета жесткость любой струны учитывалась только в том случае, если струна оказывалась растянутой (нагруженной). На каждом шаге по времени анализировалось текущее напряженное состояние каждой струны и, если струна оказывалась разгруженной, то ее жесткость исключалась из глобальной матрицы жесткости. С учетом этого фактора уравнение (2) преобразуется к виду

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{U}}{dt^2} + \mathbf{R} \mathbf{U} = -\mathbf{R}_S \mathbf{U}_0 + \mathbf{F}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{R} — текущая матрица жесткости; \mathbf{R}_S — часть ее, связанная с изменением состояния

струн; \mathbf{U}_0 — вектор статических смещений подвески. Можно показать, что произведение $\mathbf{R}_S \mathbf{U}_0$ в правой части представляет собой силы натяжения исключаемых струн в статическом состоянии.

Уравнение (3) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно компонент вектора \mathbf{U} . Для ее решения был применен обобщенный α -метод [5]. С его помощью удается добиться оптимального соотношения между точностью воспроизведения низких частот решения и численного демпфирования на высоких частотах. Последнее свойство представляет особый интерес, так как позволяет подавить вклад нефизических высокочастотных мод решения, которые обычно присутствуют в конечноэлементных моделях. Применяемый в ряде работ метод Ньюмарка

[6] — частный случай данного метода. Отметим, что на каждом шаге по времени приходится решать систему алгебраических уравнений, для чего используется алгоритм на основе разложения Холецкого для разреженных матриц.

Сила F в правой части уравнения (3) определяется как результат взаимодействия между контактным проводом и токоприемником. В нашей работе рассматривались модели токоприемника с сосредоточенными параметрами, состоящие из двух или трех масс, соединенных пружинами и демпферами (рис. 3).

Масса m_1 представляет полз токоприемника, массы m_2 и m_3 — шарнирную раму; F_0 — постоянная сила статического нажатия, приложенная к раме; c_i , d_i ($i = 1, 2, 3$) — приведенные коэффициенты жесткости и демпфирования. В качестве дополнительных факторов в модели токоприемника могут учитываться сухое трение, действие аэродинамических сил, колебания основания. Динамика токоприемника описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, определяющих положение масс.

Для расчета силы взаимодействия контактного провода и токоприемника введем величину $\Delta(t) = v_c(x_p(t), t) - v_p(t)$ — разность между смещениями контактного провода v_c и ползз токоприемника v_p в некоторый фиксированный момент времени, когда горизонтальное положение токоприемника определяется координатой $x_p(t)$. Так как ползз, находясь снизу от провода, не может физически пройти сквозь него, то должно выполняться одностороннее ограничение $\Delta(t) \geq 0$. При этом возможны два случая: или $\Delta(t) = 0$, и тогда возникает сила взаимодействия $F_k > 0$ (касание провода и токоприемника), или $\Delta(t) > 0$, и тогда $F_k = 0$ (касание отсутствует). Сформулированные условия записываются в виде равенства $F_k(t)\Delta(t) = 0$, которое называется условием дополненности.

Точное равенство $\Delta = 0$ в процессе вычислений не реализуется вследствие приближенного представления данных. Если получается $\Delta > 0$, то подвеска и токоприемник не взаимодействуют друг с другом и рассчитываются независимо. Если $\Delta < 0$, то это означает возникновение нефизической ситуации, когда ползз токоприемника проник сквозь провод. В таком случае назначается положительная сила $F_k = -c\Delta$ (c — достаточно большое число), которая моде-

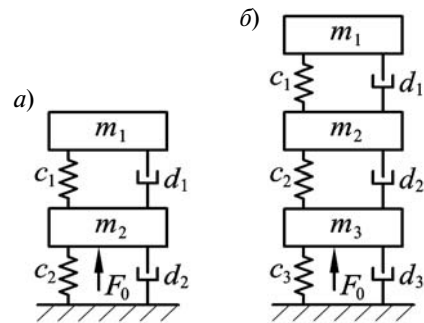


Рис. 3. Модели токоприемника:

а — двухмассовая, б — трехмассовая

лирует воздействие контактного провода на токоприемник, стремясь «исправить» возникшую ситуацию. С физической точки зрения такой подход имитирует жесткость возникающего контакта, с математической — это метод штрафа, а сила F_k — штраф за нарушение ограничения $\Delta(t) \geq 0$.

Сила, возникающая между контактным проводом и токоприемником, приложена в точке нахождения токоприемника в данный момент времени $x_p(t)$. Если точка $x_p(t)$ совпадает с узлом конечноэлементной сетки, то вся сила оказывается сосредоточенной в данной точке. Если точка $x_p(t)$ оказывается между узлами, то в результате применения конечноэлементной процедуры сила перераспределяется между ними. Перемещения контактного провода, напротив, известны только в узлах, для их вычисления в точке $x_p(t)$ применялась линейная интерполяция на элементе, что согласуется с использованным конечноэлементным представлением.

Опишем алгоритм расчета одного шага по времени.

1. Перед расчетом очередного шага проверяем состояние струн и вычисляем первое слагаемое в правой части уравнения (3), одновременно модифицируя глобальную матрицу жесткости.

2. Вычисляем перемещение контактного провода в момент t_n , решая уравнение (3), где в правой части стоит сила F_k , вычисленная на предыдущем временном шаге. (На первом шаге полагаем силу равной статическому нажатию со стороны токоприемника.)

3. Вычисляем перемещения масс токоприемника под действием приложенных к нему сил.

4. Зная смещения контактного провода и по-
лоза токоприемника, вычисляем величину Δ
и новую силу F_k . Если полученная сила $F_k < 0$,
то полагаем $F_k = 0$.

5. Переходим к следующему временному
шагу.

Предложенная математическая модель реа-
лизована в виде программного комплекса на
языке FORTRAN. Время выполнения динами-
ческого расчета на современном персональном
компьютере для полного анкерного участка кон-
тактной подвески при взаимодействии с двумя
токоприемниками, движущимися со скоростью
200 км/ч, составляет около 30 минут (число урав-
нений около 40000, шаг по времени — 1 мс).

Для валидации предложенного метода моде-
лирования было выполнено сравнение результатов
расчета динамического взаимодействия эталон-
ных моделей токоприемника и контактной под-
вески с нормированными данными в соответствии
с европейским стандартом [7]. Эталонная модель
подвески состоит из 10 одинаковых пролетов дли-
ной 60 м; эталонная модель токоприемника —
двухмассовая. Параметры моделей определены
в стандарте. Моделирование выполняется при двух

значениях скорости движения ЭПС, равных
250 и 300 км/ч. Проверка модели осуществляется
на основе анализа значений восьми параметров,
характеризующих процесс взаимодействия токо-
приемника и подвески. Этап валидации модели
считается пройденным только в том случае, если
все параметры укладываются в нормированные
стандартом диапазоны значений.

Результаты моделирования, полученные на
модели УКС — СПбГПУ в сравнении с норми-
руемыми стандартом [7] значениями, представ-
лены в таблице. Как видно, значения всех пара-
метров укладываются в заданные диапазоны.

На рис. 4 приведены практические результа-
ты моделирования динамического взаимодей-
ствия токоприемников электропоезда «Сапсан»
и контактной подвески КС-200–07 при скорости
200 км/ч.

Поезд «Сапсан» имеет два токоприемника,
расположенных на расстоянии 154 м. Модели то-
коприемников приняты трехмассовыми с параме-
трами, заданными по данным фирмы Siemens,
разработчика поезда. В моделях дополнительно
учтены аэродинамические подъемные силы, дей-
ствующие на массы токоприемников m_2 .

**Результаты взаимодействия эталонных моделей токоприемника и контактной подвески
в сравнении с нормируемыми значениями по стандарту EN 50318**

Параметр	Ед. изм.	Значение при скорости ЭПС 250 км/ч		Значение при скорости ЭПС 300 км/ч	
		Норма	Результат	Норма	Результат
Среднее значение контактного нажа- тия, F_m	Н	110–120	116,5	110–120	117,5
Стандартное отклонение, σ	Н	26–31	28,1	32–40	34,9
Статистический максимум контактного нажатия, $F_m + 3\sigma$	Н	190–210	200,8	210–230	222,2
Статистический минимум контактного нажатия, $F_m - 3\sigma$	Н	20–40	32,3	–5–20	12,9
Фактический максимум контактного нажатия, F_{\max}	Н	175–210	177,9	190–225	200,4
Фактический минимум контактного нажатия, F_{\min}	Н	50–75	55,2	30–55	35,6
Максимальное отжатие контактного провода под фиксатором, dH_f	мм	48–55	51,4	55–65	62,1
Процент потери контакта, NQ	%	0	0,0	0	0,0

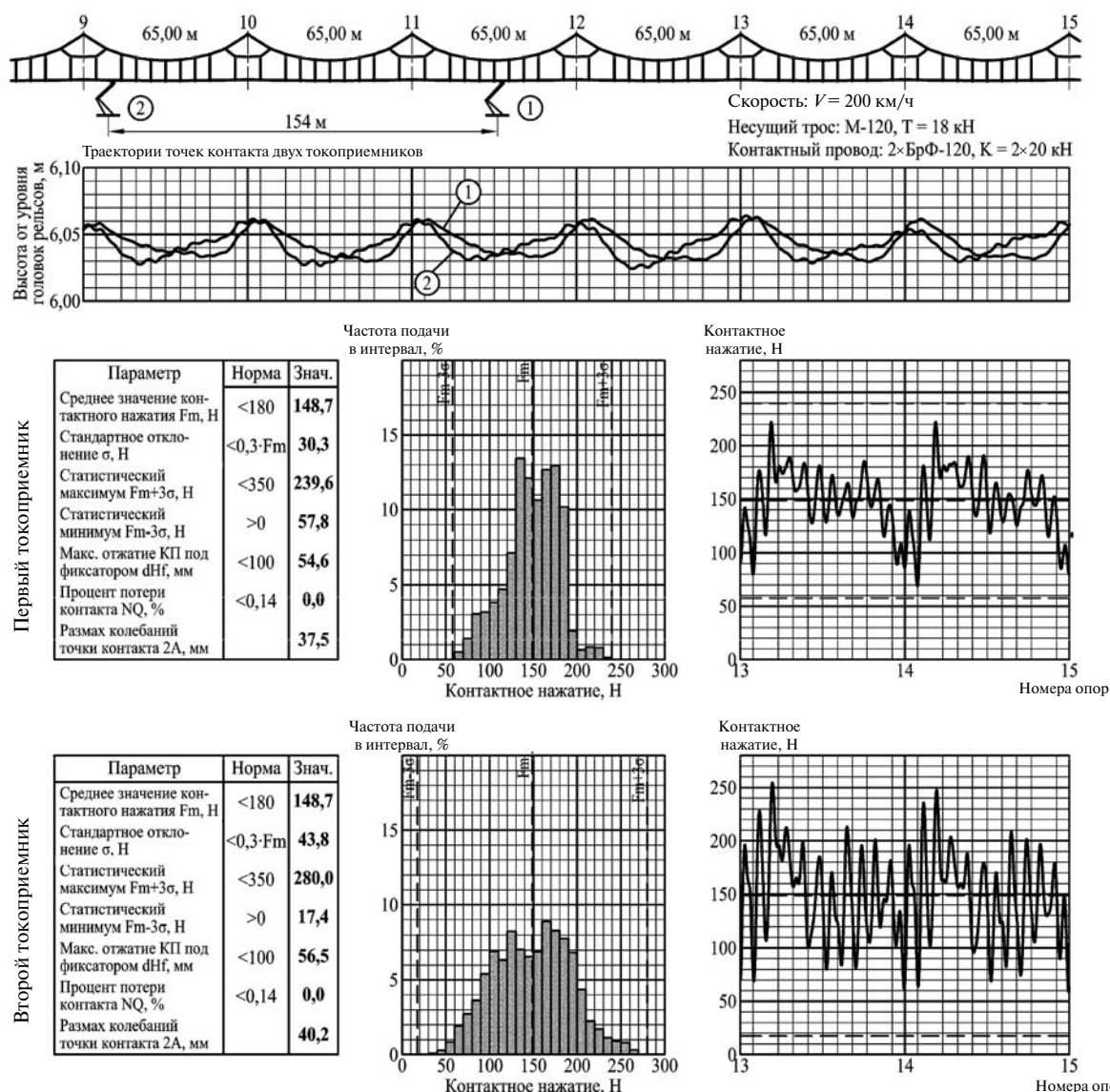


Рис. 4. Результаты расчета динамического взаимодействия двух токоприемников поезда «Сапсан» и контактной подвески КС-200–07 на скорости 200 км/ч

Контактная подвеска моделировалась в виде анкерного участка длиной 1430 м, состоящего из 22 пролетов по 65 м. На рисунке показан фрагмент подвески между опорами 9–15. Представлены результаты моделирования для каждого токоприемника: траектории точек контакта полозов с контактным проводом; кривые изменения контактного нажатия в пролетах подвески; гistogramмы контактного нажатия; таблицы значений основных интегральных параметров, характеризующих качество токосъема, в сравнении с нормируемыми значениями по стандартам международного союза железных дорог [2, 8].

Как видно из таблиц, представленных на рис. 4, для обоих токоприемников обеспечивается удовлетворительное качество токосъема: все параметры соответствуют нормируемым значениям. Однако исследования на разработанной модели показывают, что качество токосъема может быть дополнительно улучшено за счет незначительных конструктивных усовершенствований контактной подвески КС-200–07. Выбор более рациональных значений таких параметров, как натяжение рессорного троса, стрела провеса контактного провода и некоторые другие, обеспечивает уменьшение

стандартного отклонения контактного нажатия σ более чем на 20 % по сравнению с базовым вариантом для обоих токоприемников. Внедрение этих усовершенствований позволит замедлить изнашивание контактного провода и контактных пластин токоприемников в процессе эксплуатации.

В настоящее время разработанная математическая модель и программный комплекс применяются компанией «Универсал — контактные сети» в процессе проектирования контактной сети для скоростей движения до 350–400 км/ч с учетом перспективного применения на российских высокоскоростных магистралях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kiessling, F.** Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance [Текст] / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider.— Second Edition.— Wiley, John & Sons, 2009.— 994 p.
2. **UIC 799—1.** Characteristics of direct-current overhead contact systems for lines worked at speeds of over 160 km/h and up to 250 km/h [Текст] / Translation International Union of Railways (UIC).— 2002.
3. **Кудряшов, Е.В.** Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Кудряшов.— 05.22.07— СПб., 2010.— 187 с.
4. **Poetch, G.** Pantograph/Catenary Dynamics and Control [Текст] / G. Poetch, J. Evans, R. Meisinger [et al.] // Vehicle System Dynamics.— 1997. № 28 (2–3).— P. 159–195.
5. **Chung, J.** A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method [Текст] / J. Chung, G. Hulbert // ASME Journal of Applied Mechanics.— 1993. № 60.— P. 371–375.
6. **Rauter, F.-G.** Contact Model for the Pantograph-Catenary Interaction [Текст] / F.-G. Rauter, J. Pombo, J. Ambrosio [et al.] // Journal of System Design and Dynamics.— 2007. Vol. 1, № 3.— P. 447–457.
7. **European Standard EN 50318:2002.** Railway applications— Current collection systems— Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line [Текст] / CELENEC.— 2002.
8. **UIC 794—1.** Pantograph/overhead line interaction for DC-electrified railway lines [Текст] / Translation International Union of Railways (UIC).— 2001.

УДК 621.92

Н.В. Никитков, П.А. Дорофеев

ВЫЯВЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО ФАКТОРА, ВЫЗЫВАЮЩЕГО ТРЕЩИНЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ШЛИФУЕМЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

В современных машинах и механизмах часто ответственные детали делают из керамики, композитов, твердого сплава, природных минералов с микротвердостью поверхности заготовок $HV = 10–30$ ГПа. Механическая обработка заготовок деталей производится преимущественно алмазным инструментом. Обеспечение точности размеров и взаимного положения поверхностей у деталей осуществляется за счет оборудования, оснащения и квалификации рабочего. Качество поверхностного слоя материала заготовок зависит от параметров инструмента и режимов

обработки. Микротрещины на поверхности [1–7], сколы краев по периметру заготовок [1–7] возникают по причине термического и механического воздействия алмазных зерен на поверхность заготовок. Достаточно сложно прогнозировать, какой из этих двух факторов — главный при образовании микротрещин и выколов на поверхности и у краев заготовок.

Ниже приведены результаты исследований по выявлению доминирующего фактора образования микротрещин и сколов краев при алмазном шлифовании заготовок из керамики.

Цель исследований: путем сопоставления различных процессов шлифования установить главный фактор (термический или силовой) образования поверхностных трещин на заготовках из керамики.

Методика исследований. Обрабатываемые заготовки наклеивались термопластичным клеем на поверхность сменных столов (рис. 1) станков моделей СПШП-1 (рис. 2, а) и 3111 (рис. 2, б). Снятие заготовок производилось после нагрева стола до 90 °С. Стол с заготовками устанавливали на торец вертикального высокоточного шпинделя станка. Частота вращения шпинделя стола равна 30–400 мин⁻¹. Инструментальный шпиндель станков вращался с частотой 3000–18000 мин⁻¹. Станки имеют возможность работать с постоянной силой $P_y = 0–300$ Н прижима алмазного круга к поверхности заготовок или вертикальной подачей инструмента в материал заготовок — $S_B = 0,01–0,5$ мм/мин. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовали воду с антикоррозийными присадками. Применяли алмазные круги формы 12А2 с углом 45° характеристик АС6 80/63 М1–100. Круги правили путем шлифования мягких абразивных брусков из электрокорунда зернистостью, равной зернистости алмазных кругов. С целью выявления доминирующей причины трещинообразования материала в поверхностном слое заготовок на поверхность заготовок действовали так: только термическим, только силовым, а также совместно силовым и термическим факторами.



Рис. 1. Оснастка и керамические заготовки, наклеенные на сменные столы станка

Изготавливали сферические микрошлифы для определения глубины микротрещин под бо-роздами от зерен круга или под оптическими следами — траекториями движения зерен по поверхности заготовок.

Ниже приведены результаты исследований образования трещин в поверхностном слое материала заготовок в процессе алмазного шлифования при разных условиях обработки.

Действие на поверхность заготовок только термического фактора [1, 2]. Полированную поверхность заготовок на круглом сменном столе станка «шлифовали» кругом с площадками износа на вершинах зерен. Зерна не могли внедриться и резать керамику. Они скользили по поверхности заготовок при постоянной силе прижима круга, равной $P_y = 150$ Н.

При этом давление на контактной поверхности зерен равно



Рис. 2. Оборудование для исследований: лабораторный станок модели СПШП-1 (а), производственный шлифовальный станок модели 3111 (б)

$$\sigma_3 = P_y / (\Delta S_{\text{ед}} N_n), \quad (1)$$

где $\Delta S_{\text{ед}}$ — средняя арифметическая площадь площадки износа одного зерна, определяемая в пяти полях зрения ($\times 64$) микроскопа МБС-2;

$$N_n = N_{\text{лн}} S_n / S_{\text{кр}},$$

где $N_{\text{л}}$ — количество площадок износа на зернах круга; $S_{\text{кр}}$ — площадь режущей поверхности круга; N_n — количество площадок износа на номинальной площади S_n контакта круга с поверхностью заготовок. Например, притупленный круг АС6 80/63 М1–100 имеет $\Delta S_{\text{ед}} = 375 \text{ мкм}^2$ и $N_{\text{л}} = 875$ шт. площадок. При $S_n / S_{\text{кр}} = 0,7$ получается $N_n = 0,7 \cdot 875 = 612$ шт. шлифующих зерен в контакте. Следовательно, фактическое давление при силе $P_y = 150 \text{ Н}$ равно $\sigma_3 = 150 / (375 \times 10^{-12} \cdot 612) = 0,65 \text{ ГПа}$.

На столе станка СПШП-1 наклеены заготовки в виде кольца (см. рис. 1) с наружным и внутренним радиусами, равными соответственно 130 и 50 мм. К неподвижной поверхности заготовок из титаносодержащей керамики круг прижимали силой 150 Н. Круг вращался со скоростью 15 или 90 м/с в течение 3 с. СОЖ отсутствовала. Для этих скоростей давления $\sigma_{\text{пл}}$, при которых оплавляется керамика на контактной поверхности зерен, рассчитанные по формуле

$$\sigma_{\text{пл}} = \lambda_m T_{\text{пл}} / (4b_m f V r_0), \quad (2)$$

(здесь λ_m и b_m — коэффициенты тепло- и температуропроводности шлифуемого материала; $T_{\text{пл}} = T_{\text{сп}} / (0,827 - 0,97)$ — температура начального плавления поверхностного слоя у различных керамик; τ — время действия источника тепла; f — коэффициент трения; b_m — доля тепла, переходящая в материал заготовки; V — скорость скольжения; r_0 — радиус пятна контакта) равны 13,3 и 7,2 ГПа.

Критические давления σ при скоростях шлифования 15 и 90 м/с, при которых на площадках износа зерен микротвердость алмаза снижается с примерно 95 до значения 30 ГПа, близкого к микротвердости материала заготовок, равны 1,45 и 0,24 ГПа. На полированной поверхности керамики образуются яркие блестящие следы от зерен (рис. 3). Профилографирование поперек следов показало, что поверхность ровная, без выступов и впадин. На сферических шлифах (рис.3) видно, что слой материала под следами не имеет трещин. При скорости 90 м/с факти-

ческое давление было в 2,7 раза больше давления, при котором снижается твердость алмазов, но в 11 раз меньше, чем требуется для оплавления контактирующих с зерном точек поверхности заготовок. После 3 с скольжения зерен по поверхности заготовок были вновь измерены величины $\Delta S_{\text{ед}}$ и $N_{\text{л}}$. Они увеличились и стали равными соответственно 470 мкм^2 и 890 шт. Расчетные значения плотности потока $W_p = (0,9 - 0,95) W_{\text{рп}}$, не вызывающие образования трещин в поверхности керамики, скорости нагрева $\partial T / \partial t$ и температурного градиента $\partial T / \partial y$ при времени действия источника $\tau = 2(\Delta S_{\text{ед}} / \pi)^{0,5} (1/V)$ и скоростях 15 и 90 м/с соответственно равны: 0, 21 $\cdot 10^9$ и 0,64 $\cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$; 0,0273 $\cdot 10^9$ и 0,236 $\cdot 10^9 \text{ К/с}$; 0,0636 $\cdot 10^9$ и 0,224 $\cdot 10^9 \text{ К/м}$. Глубина прогрева до температуры спекания $T_{\text{сп}}$ равна 0,17 и 0,07 мкм .

В следующем опыте на стол станка были наклеены в форме кольца заготовки из титаносодержащей керамики, 22ХС, нитрида кремния Si_3N_4 , кермета, композита. Ширина кольца равна $R_{\text{зн}} - R_{\text{зв}} = 80 \text{ мм}$. Заготовки прошлифованы и отполированы. Вышеописанный опыт повторили. На всех заготовках, шлифованных при скорости 90 м/с, трещин не обнаружили.

Силовое и термическое действие зерен круга на шлифуемую поверхность [3, 7]. Притупленный круг, вращающийся со скоростью 90 м/с, вводили в зазор между заготовками так, чтобы площадки износа зерен были ниже уровня полированной поверхности. При повороте стола с заготовками рукой зерна круга наносили отдельные риски на их поверхности. При этом под рисками глубиной 1 мкм обнаружены трещины глубиной до 7 мкм (рис. 3, в). Описанные выше опыты повторили при расходе СОЖ-воды, равном 6 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Получили аналогичные результаты.

Следовательно, тепловой поток от сил трения зерен о материал не вызывает разрушения полированной поверхности. Увеличение плотности потока за счет варьирования режимов шлифования не приводит к образованию трещин при скольжении зерен по полированной поверхности керамических заготовок, так как происходит интенсивное изнашивание контактной поверхности алмазов и снижение давления. Образование трещиноватого слоя происходит только при внедрении зерен в заготовки на глубину большую, чем предельная упругая деформация материала.

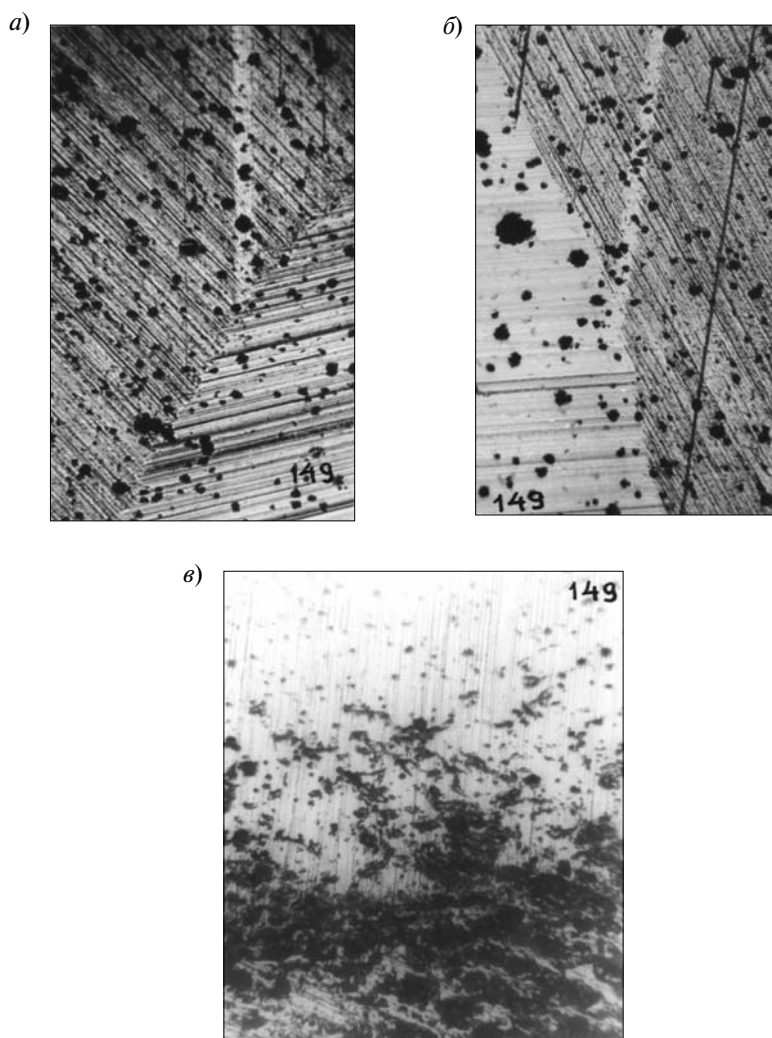


Рис. 3. Отсутствие повреждений под следами (а, б) зерен на полированной поверхности заготовок. Микротрещины (в) под бороздами от зерен круга глубиной 7 мкм. $\times 160$

Действие на поверхность заготовок только силового или одновременно силового и термического факторов [3]. Сопоставляли обработку титаносодержащей керамики с $HV = 20$ ГПа (на микрошлифах этой керамики лучше различимы микротрещины) при скоростях круга, равных 0,002, 15 и 90 м/с. Для измерения фактической глубины внедрения зерен кругов в заготовку на керамике были прорезаны пазы, куда вклеены алюминиевые проволочки — свидетели. Поверхность заготовок шлифовали кругом АС6 80/63 М1–100 с износом зерен, равным 10 мкм, при постоянной силе $P = 90$ Н, радиусах

установки заготовок на столе станка $R_{\text{зн}} = 130$ и $R_{\text{зв}} = 50$ мм. Скорость 0,002 м/с обеспечивали поворотом круга вручную на длину дуги 8–10 мм за 4–5 с. При скорости 15 и 90 м/с режущую поверхность круга подводили с зазором ~ 5 мкм к поверхности вращающихся заготовок и опускали на 1–2 с, затем поднимали. Плотность теплового потока на площадках износа зерен вычисляли по формуле $W_p = b_k f \sigma_3 V$ для скоростей 0,002, 15 и 90 м/с. Фактические давления оценивали по зависимости (1) исходя из эмпирических значений наибольших глубин внедрения зерен в материал заготовок. Для указанных

выше скоростей получили давления, равные соответственно 0,26; 0,11; 0,03 ГПа, и плотности потоков W_p — $1,25 \cdot 10^4$; $0,04 \cdot 10^9$; $0,065 \cdot 10^9$ Вт/м². Из сопоставления плотностей потоков следует, что при скорости 0,002 тепловой поток в 5200 раз, а при 15 — в 1,63 раза меньше, чем при 90 м/с. Следовательно, шлифование со скоростью 0,002 м/с можно приближенно считать только силовым процессом, а при 90 м/с — процессом одновременного действия силового и термического факторов. При обработке профиллограмм поперечных сечений шлифовочных рисков и анализа микротрещин на сферических шлифах получено следующее (рис. 4, а, б, в): глубина самых глубоких рисков, сформированных на скорости 0,002 м/с в 1,4 раза больше, чем при 15 м/с, и в 1,75 раза больше, чем на 90 м/с, при прочих равных условиях. Глубины трещин под самыми глубокими рисками при скоростях 0,002 и 15 м/с различаются на 13 %, но в 3,4 раза больше, чем при 90 м/с (см. рис. 4, а). У рисков, образованных шлифованием на скорости 90 м/с, края и дно более гладкие, а на скорости 0,002 м/с — со сколами и вырывами материала.

На сферических шлифах внешне трещины, полученные на разных скоростях, выглядят практически одинаково, но глубина их различная. Физически трещины представляют собою раздавленные силой резания и разориентированные кристаллы керамики (выглядят на микрофото черными). Из анализа профиллограмм борозд следует, что при малой скорости шлифования зерна внедряются в материал глубже (при прочих одинаковых условиях шлифования). В полированную поверхность вклеивали в пазы керамики проволочки из алюминия. Борозды наносились при шлифовании на поверхность керамики и на проволочки. Глубина шлифовочных рисков из-за хрупкого разрушения керамики в 3–3,5 раза больше, чем на металле. Глубина рисков и трещиноватого поверхностного слоя при низкой скорости (практически силовом процессе) больше, чем при высокой скорости — силовом и термическом процессах. Увеличение плотности теплового потока в 5200 раз с ростом скорости от 0,002 до 90 м/с не приводит к росту глубины трещин. Это свидетельствует о том, что скорость шлифования через термический фактор не влияет на глубину трещин. Итак, в механизме образования

трещин доминирующее значение имеют сила и время ее действия.

Единичное и циклическое действие на поверхность заготовок силового и термического факторов одновременно [4, 5]. Было подготовлено несколько пар сменных столов (см. рис. 1) с полированной поверхностью заготовок, наклеенных в три-пять рядов, из следующих материалов: титаносодержащей керамики, форстерита, 22ХС, нитрида кремния — Si_3N_4 , кермета. Циклическое действие зерен круга на поверхность заготовок осуществлялось путем съема припуска z , равного 40–50 мкм, острым кругом АС6 80/63 М1–100 при его скорости 90 м/с, а заготовок — 3 м/с и силе $P_y = 180$ Н. Число циклов воздействия на любую точку поверхности заготовок равно $N_{ц} = L_z/\lambda = 1200$, где L_z — путь, пройденный точкой заготовки по поверхности инструмента за время $\tau = z/I$, (I — интенсивность съема материала, мм/с; λ — средний шаг между разрушающими зернами).

Единичное действие зерен круга на поверхность заготовок осуществлялось при обработке другого сменного стола. Алмазным кругом с теми же режимами произвели шлифование в течение 1–2 с по методу (поворот стола рукой), описанному выше. При этом на поверхности заготовок образовались отдельные риски с большим шагом.

После изготовления сферических шлифов на единичных рисках и на шероховатой шлифованной поверхности установлено с погрешностью до 11 % равенство наибольших средних глубин l трещиноватого слоя у заготовок из одинаковых материалов. Глубины трещин, зафиксированные в различных местах единичных рисков и шлифованной поверхности, распределены нормально и имеют рассеивание результатов $\pm 3\sigma_3 \leq 0,183 l$.

Чем больше микротвердость HV и модуль упругости E материала, тем меньше глубина трещин и значение $3\sigma_3$.

Создавая технологию изготовления деталей из керамики, технолог должен учитывать, что на качество изделий и производительность процесса влияет следующее:

глубины трещиноватого слоя на поверхности шлифованных заготовок для конкретной керамики при единичном и при циклическом воздействии одновременно силового и термического факторов.

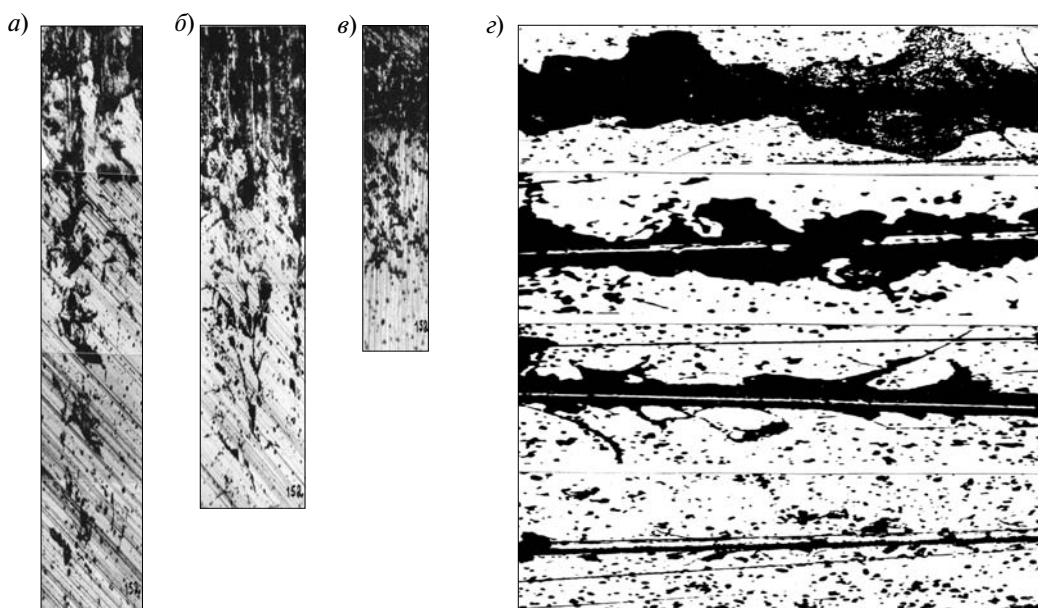


Рис. 4. Глубина трещиноватого слоя при шлифовании на скоростях 0,002, 15, 90 м/с материала заготовки (соответственно а, б, в). Борозды (г) от резания единичным зерном ($r_3 = 14$ мкм) титаносодержащей керамики при силе P_y , равной соответственно 0,5; 0,3; 0,2; 0,05 Н ($\times 160$). На берегах борозд видны сколы краев и криволинейные трещины

ческого факторов от действия зерен круга на поверхность с погрешностью 11 % равны;

в механизме образования трещин доминирующее значение имеет сила и время ее действия, но не тепловое воздействие от трения зерна по поверхности материала заготовок;

глубины рисок и трещиноватого поверхностного слоя при низкой скорости (практически

силовом процессе) больше, чем при высокой, т. е. при силовом и термическом процессе;

присутствие или отсутствие СОЖ-воды не влияет на глубину трещин на прошлифованной поверхности;

глубина трещин, размеры выколов и сколов (рис. 4, г) по берегам борозд зависят от силы и прочностных свойств материала керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов, В.С. Особенности процессов деформации и разрушения поликристаллической оксидной керамики при температурах до 1600 °С [Текст] / В.С. Бакунов, Е.С. Лукин, Э.П. Сысоев // Стекло и керамика. — 2011. № 11. — С. 11–16.

2. Немец, И.И. Оценка термостойкости керамических материалов [Текст] / И.И. Немец, В.Б. Златковский // Стекло и керамика. — 1988. № 3. — С. 20–22.

3. Кузин, В.В. Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин [Текст] / В.В. Кузин [и др.] // Вестник машиностроения. — 2010. № 11. — С. 50–53.

4. Прохоров, Е.М. Термическое разрушение ал-

мазов марки АСР [Текст] / Е.М. Прохоров, А.М. Комаров // Алмазы. — 1972. № 10. — С. 1–4.

5. Гогоци, Г.А. Прямое определение сопротивления керамики разрушению по методу скалывания / Г.А. Гогоци [и др.] // Заводская лаборатория. — 2007. Т. 73, № 3. — С. 49–53.

6. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.

7. Никитков, Н.В. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики [Текст] / Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1984. — 131 с.

МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ДВИЖЕНИЕ КОЛЕСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

Известен ряд методов комплексной оценки эксплуатационных свойств транспортных колесных и гусеничных машин. Методы различаются степенью объективности, универсальности, широтой охвата частных показателей эффективности работы машины и другими особенностями. Применительно к транспортной машине (ТМ) наиболее важными составляющими энергетического баланса являются затраты на передвижение, связанные с особенностями устройства и работы узлов и агрегатов шасси, в частности — движителя [1]. Так, предложенная в работе [1] методика оценки энергозатрат на передвижение гусеничной ТМ в принципе универсальна и может быть применена к колесным транспортным средствам. При этом неизбежны пересмотр базы используемых критериев и разработка математических моделей для их определения.

К частным вопросам при рассмотрении энергетического баланса машины, движущейся по деформируемому основанию, относится оценка распределения нормальных давлений на опорной поверхности движителя и глубины колеобразования. Применительно к гусеничной машине решение этих вопросов предлагается в [2]. Однако математические модели взаимодействия с грунтом гусеницы и многоопорной колесной ходовой системы существенно различны. В то же время общие положения, касающиеся последовательности расчета и основных связей между величинами [2], представляются универсальными.

Энергия, которая требуется на передвижение ТМ за счет взаимодействия ее колес с опорной поверхностью, расходуется на создание тяги при преодолении уклонов и грунтов с низкой несущей способностью, покрытие внутренних потерь в силовых приводах, механизмах и шарнирах, вертикальное и горизонтальное прессования деформируемого опорного основания, буксование или юз.

Рассмотрим подробнее перечисленные составляющие энергетического баланса.

Энергозатраты на создание тяги. Схема сил, действующая на ТМ при движении на подъем, приведена на рис. 1. Уравнение мощностного баланса может быть записано в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^m M_{ki} \omega_i - \dot{x} \delta_0 M \ddot{x} - \dot{x} \sum_{i=1}^n P_{fi} - \dot{x} G \sin \alpha = 0. \quad (1)$$

Здесь n — число колес; m — число ведущих колес; i — текущий номер колеса; M_{ki} — крутящий момент, приложенный к i -му колесу; ω_i — угловая скорость вращения i -го колеса; \dot{x} — скорость перемещения центра масс; δ_0 — коэффициент учета вращающихся масс; $M = G/g$ — масса машины (G — вес машины, g — ускорение свободного падения); \ddot{x} — продольное ускорение; $P_{fi} = f_i N_i$ — сила сопротивления качению i -го колеса (f_i — коэффициент сопротивления движению i -го колеса, N_i — нормальная реакция опорной поверхности, приложенная к i -му колесу); α — угол продольного наклона опорной поверхности; $\delta_0 M \ddot{x} \equiv P_j$ — сила инерции.

Схема действующих сил (см. рис. 1.) относительно N_i является статически неопределенной задачей, поэтому найти в явном виде значения этих реакций через параметры ТМ не представляется возможным. Однако при равномерном движении машины они могут быть определены следующим образом.

Составим уравнения сил, действующих на ТМ, в проекции на вертикальную ось и уравнения моментов относительно поперечной оси, проходящей через центр масс [3]:

$$\sum_{i=1}^n N_i = G \cos \alpha \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^n N_i l_i = GH \sin \alpha,$$

где $N_i = c_i (z_{\text{CT}} \pm \varphi_{\text{CT}} l_i)$ — усилие в подвеске i -го колеса; H — высота расположения центра тяжести; c_i — жесткость подвески i -го колеса; z_{CT} — перемещение центра масс в направлении

вертикальной оси от вывешенного до статического положения; $\varphi_{ст}$ — угол наклона подрессоренной части в статическом положении или при равномерном прямолинейном ее движении; l_i — проекция на продольную ось расстояния от центра тяжести до оси i -го колеса ($l_i > 0$, если колесо расположено впереди от центра тяжести и $l_i < 0$ — если сзади него).

Решение полученной системы уравнений относительно $z_{ст}$ и $\varphi_{ст}$ дает следующие соотношения для определения статических усилий в подвеске i -го колеса [3]:

$$\varphi_{ст} = \frac{\left(H \sin \alpha \sum_{i=1}^n c_i - \cos \alpha \sum_{i=1}^n c_i l_i \right) G}{\left(\sum_{i=1}^n c_i l_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n c_i l_i \right) \sum_{i=1}^n c_i l_i^2}$$

и

$$z_{ст} = \frac{\varphi_{ст} \sum_{i=1}^n c_i l_i + G \cos \alpha}{\sum_{i=1}^n c_i}.$$

Умножим и разделим первое слагаемое уравнения (1) на скорость перемещения центра масс \dot{x} и радиус колеса r_k . После необходимых преобразований получим

$$\dot{x} \frac{\sum_{i=1}^m P_{ki} V_{окр i}}{\dot{x}} - \dot{x} \delta_0 M \ddot{x} - \dot{x} \sum_{i=1}^n P_{fi} - \dot{x} G \sin \alpha = 0,$$

где $P_{ki} = M_{ki}/r_k$ — тяговое усилие, создаваемое i -м колесом; $V_{окр i}$ — окружная скорость i -го колеса.

Отношение $V_{окр i}/\dot{x}$ может быть представлено через коэффициент буксования S в виде $V_{окр i}/\dot{x} = 1/(1-S_i)$.

Подставляя полученное соотношение в последнее уравнение, получим

$$\dot{x} \sum_{i=1}^m P_{ki} \frac{1}{1-S} = \dot{x} \delta_0 M \ddot{x} + \dot{x} \sum_{i=1}^n P_{fi} + \dot{x} G \sin \alpha. \quad (2)$$

Уравнение (2) можно считать обобщенным критерием оценки энергозатрат при движении ТМ по опорной поверхности, включая и него-
горизонтальные участки. При этом левая часть уравнения определяет суммарные энергозатра-

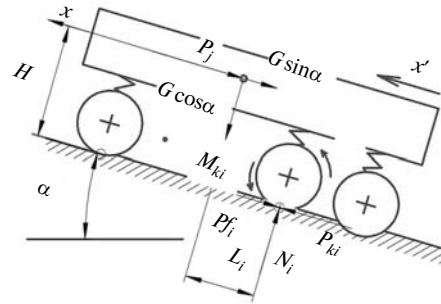


Рис. 1. Схема сил, действующих на планетоход при движении на подъем по деформируемому опорному основанию

ты, а правая содержит две составляющие суммарных затрат — динамическую и «статическую». Таким образом, уравнение (2) позволяет оценить энергозатраты на движение как в установившемся режиме с постоянной скоростью, так и в режимах разгона до максимальной скорости или торможения.

Анализ уравнения (2) позволяет сделать следующие выводы. Один из них относится к адаптации тягового привода к условиям эксплуатации, а второй — к структуре энергозатрат.

При увеличении внешних сил сопротивления движению, которые присутствуют в левой части уравнения, тяговый привод начинает приспосабливаться к возросшему сопротивлению через буксование увеличением тягового усилия (левая часть уравнения (2)).

Моделируемые таким образом энергетические затраты учитывают только расход энергии на преодоление сил сопротивления качению, подъему и инерции. Затраты энергии, которые идут на преодоление сил сопротивления в трансмиссии и на буксование, в уравнении (2) не присутствуют. Находящаяся в знаменателе левой части уравнения величина $(1-S)$ к этим затратам не относится.

Учитывая, что потери в трансмиссии могут быть введены через ее КПД, потери на буксование выразим с помощью КПД движителя. Тогда обобщенный критерий для расчета энергозатрат ТМ может быть представлен либо правой, либо левой частью уравнения (2). С точки зрения «прозрачности» энергозатрат и их структуры правая часть — более содержательна. Поэтому обобщенный критерий оценки энергозатрат при разгоне ТМ до скорости \dot{x} представим в следующем виде:

$$N_3 = \frac{\dot{x} \left(\delta_0 M \ddot{x} + \sum_{i=1}^n P_{fi} + G \sin \alpha \right)}{2\eta_{тр} \eta_{дв}}, \quad (3)$$

где $\eta_{тр}$ — КПД трансмиссии, $\eta_{дв} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{1-S_i}$ — КПД двигателя.

В общем случае при расчете энергозатрат с учетом динамики кроме уравнения (3) необходимо располагать математической моделью, с помощью которой моделируется динамика ТМ при взаимодействии двигателя с опорной поверхностью.

Рассмотрим частный случай. Предположим, что $f_1 = f_2 = \dots = f_i = \dots = f_n \equiv f$. Тогда уравнение (3) преобразуется к виду

$$N_3 = \frac{\dot{x} (\delta_0 M \ddot{x} + Gf \cos \alpha + G \sin \alpha)}{2\eta_{тр} \eta_{дв}}.$$

При определении энергозатрат движение следует разбить на два этапа.

Продолжительность первого этапа определяется временем, в течение которого выполняется условие $\sum_{i=1}^m P_{ki} \leq P_\phi$, где P_ϕ — сила тяги по сцеплению.

Продолжительность второго этапа длится до момента времени, при котором скорость движения ТМ достигает максимального значения. Обозначим скорость движения в этот момент времени через V_{\max} . Дальнейшее движение ТМ будет происходить с этой скоростью как постоянной, равной V_{\max} , а расчет энергозатрат упрощается:

$$N_3 = \frac{V_{\max} G (f \cos \alpha + \sin \alpha)}{\eta_{тр} \eta_{дв}}.$$

Первый этап. Сила инерции, входящая в формулу расчета энергозатрат N_3 , может быть определена из уравнения движения, которое следует из (2), то есть

$$\delta_0 M \ddot{x} = \sum_{i=1}^m P_{ki} - \sum_{i=1}^n P_{fi} - G \sin \alpha. \quad (4)$$

С учетом ограничения силы тяги по сцеплению ($P_{ki} \leq \phi N_i$, где ϕ — коэффициент сцепления колеса с грунтом) получим

$$\delta_0 M \ddot{x} = \sum_{i=1}^m \phi_i N_i - \sum_{i=1}^n P_{fi} - G \sin \alpha.$$

Упростив последнее уравнение за счет допущений $\phi_1 = \phi_2 = \dots = \phi_i = \dots = \phi_n \equiv \phi$ и $f_1 = f_2 = \dots = f_i = \dots = f_n \equiv f$, получим

$$\ddot{x} = \frac{1}{\delta_0 M} (K_\phi G \phi_c \cos \alpha - Gf \cos \alpha - G \sin \alpha). \quad (5)$$

Здесь $K_\phi = G_{сц}/G$ — коэффициент сцепного веса; $G_{сц}$ — сцепной вес (часть веса ТМ, приходящаяся на ведущие колеса).

Уравнение (5) должно удовлетворять начальным условиям $x(0) = 0$ и $\dot{x}(0) = 0$.

Для полноприводных машин $K_\phi = 1$.

После сокращения уравнения (5) на массу M получим $\ddot{x} = K_X$, где

$$K_X = \frac{g}{\delta_0} (K_\phi \phi_c \cos \alpha - f \cos \alpha - \sin \alpha).$$

Если в тяговом приводе применен электродвигатель постоянного тока, то уравнение (5) остается справедливым до тех пор, пока скорость ТМ $\dot{x}(t)$ удовлетворяет условию $\dot{x}(t) \leq \dot{X}_{сц}$, где

$$\dot{X}_{сц} = \left(\frac{m P_{k0} - P_\phi}{m C_k} \right) r_k^2.$$

В свою очередь, $P_{k0} = \frac{\eta_{тр} i_{тр} M_{д0}}{r_k}$, $C_k = \eta_{тр} C_{д} i_{тр}^2$.

Здесь $i_{тр}$ — передаточное отношение трансмиссии; $P_\phi = K_\phi \phi_c G \cos \alpha$ — сила тяги по сцеплению; $M_{д0}$ и $C_{д}$ — параметры электродвигателя.

С учетом начальных условий решение уравнения (5) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = K_X; \\ \dot{x}(t) = K_X t; \\ x(t) = 0,5 K_X t^2. \end{cases}$$

Отсюда найдем промежуток времени (обозначим его через $t_{сц}$), в течении которого полученные соотношения остаются справедливыми, то есть $t_{сц} = \dot{X}_{сц} / K_X$.

Второй этап. Найдем максимальную скорость, которую может развить ТМ с заданными параметрами в заданных условиях эксплуатации. При $t > t_{сц}$ в уравнение (4) следует подставлять силу тяги, которую развивает электромеханический привод. В теории подвижности транспорт-

ных средств такую силу тяги принято называть силой тяги по двигателю и обозначать как P_d . Для электромеханического привода эта сила может быть представлена в виде

$$P_d = mP_{k0} - m \frac{C_k}{r_k} \dot{x}.$$

Учитывая, что $\sum_{i=1}^m P_{ki} = P_d$, из уравнения (4) получим

$$\delta_0 M \ddot{x} - mP_{k0} + m \frac{C_k}{r_k} \dot{x} + Gf \cos \alpha + G \sin \alpha = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) удовлетворяет следующим начальным условиям: $x(t_2) = 0$, $\dot{x}(t_2) = \dot{X}_{\text{сц}}$ при $t = t_{\text{сц}}$, где $t_2 = t - t_{\text{сц}}$.

Решение уравнения (6) имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = \frac{d}{a^2} e^{-at} - \frac{\dot{X}_{\text{сц}}}{a} e^{-at}; \\ \dot{x}(t) = \frac{d}{a} (e^{-at} - 1) + \dot{X}_{\text{сц}} e^{-at}; \\ x(t) = \frac{d}{a} \left[\frac{1}{a} (e^{-at} - 1) + t \right] + \frac{\dot{X}_{\text{сц}}}{a} [1 - e^{-at}], \end{cases}$$

где $a = \frac{mC_d i_{\text{тр}}^2 \eta_{\text{тр}}}{\delta_0 M r_k^2}$;

$$d = \frac{mM_{\text{дв}} i_{\text{тр}} \eta_{\text{тр}}}{\delta_0 M r_k} - \frac{g}{\delta_0} (f \cos \alpha + \sin \alpha).$$

Из полученных решений видно, что при $at > 4$ показательная функция стремится к нулю. Тогда при $t > 4/a$ из последнего соотношения найдем

$$V_{\text{max}} = \dot{x}(t_2) = \frac{d}{a}; \quad x(t_2) = -\frac{d}{a^2} + \frac{d}{a}t + \frac{X_{\text{сц}}}{a};$$

$$\ddot{x}(t_2) \approx 0.$$

Таким образом, получены все необходимые данные для расчета энергопотребления по критерию (3) за исключением коэффициента буксования. Выше указывалось, что определение этого коэффициента может быть проведено с использованием математической модели, которая позволяет моделировать «более тонко» взаимодействие движителя с опорной поверхностью.

Опыт эксплуатации наземных транспортных средств, а также космических аппаратов (таких,

как «Луноход-1 и -2» и «LRV») показывает, что при преодолении уклонов или движении по грунтам с низкой несущей способностью минимальное значение коэффициента буксования может изменяться в пределах от 5 до 15 %. Поэтому при оценке энергозатрат следует воспользоваться усредненным значением коэффициента буксования, например равным 10 %.

В качестве примера ТМ рассмотрим планетоход с колесной формулой 4×4. Для расчета примем следующие параметры: $L = 1,7$ м; $l_1 = l_2 = 0,85$ м; $H = 0,85$ м; $M = 785$ кг; $\eta_{\text{тр}} = 0,85$; $i_{\text{тр}} = 216$; $M_{\text{д0}} = 1,37$ Нм; $C_d = 0,00624$ Нм·с; $g = 1,63$ м/с²; $\delta_0 = 2,5$; $f_1 = f_2 = f = 0,15$; $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_c = 0,8$; $\alpha = 20^\circ$.

Приведенные здесь значения для $M_{\text{д0}}$ и C_d относятся к тяговому приводу одного колеса.

Подставляя необходимые данные в приведенные выше формулы, получим следующие значения параметров.

Первый этап.

$K_X = \ddot{x}(t) = 0,173$ м/с² = const; $\dot{X}_{\text{сц}} = 0,194$ м/с; $t_{\text{сц}} = 1,12$ с; $x(t_{\text{сц}}) = 0,108$ м.

$N_j = 121$ Вт, из них ~ 35 % составляют энергозатраты на преодоление сил инерции.

Второй этап.

$a = 8,08$ м/с; $d = 1,736$ м/с²; $V_{\text{max}} = 0,22$ м/с; $t_2 = 0,495$ с; $x(t_2) = 0,104$ м.

На втором этапе продольное ускорение изменялось от 0,173 м/с² до нуля. Поэтому при расчете энергозатрат принято среднее ускорение, равное 0,0865 м/с², а средняя скорость при разгоне — 0,207 м/с.

$N_j = 119$ Вт, из них ~ 18 % составляют энергозатраты на преодоление сил инерции.

На этапе установившегося движения энергозатраты составляют 177 Вт; в них динамическая составляющая равна нулю.

Таким образом, суммарные энергозатраты на этапе разгона составили примерно 240 Вт.

Оценка энергозатрат на вертикальное прессование опорного основания. На рис. 2 представлена схема взаимодействия i -го колеса с опорным основанием при движении ТМ по поверхности с низкой несущей способностью. При оценке энергозатрат будем предполагать, что колесо движется с буксованием и образованием колеи, глубину которой в первом приближении можно определить из соотношения (8). Принимая

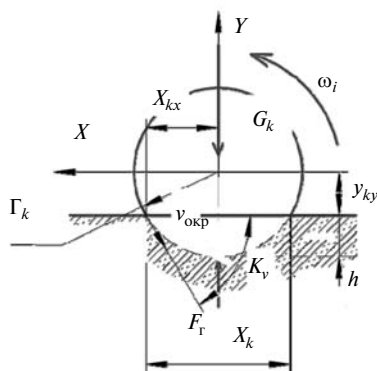


Рис. 2. Схема сил взаимодействия колеса с опорной поверхностью при движении по деформируемым грунтам

в этом уравнении параметр $\mu = 1$ и умножая его на площадь пятна контакта, которое образуется под i -м колесом, получим

$$F_r = qS_k = C_r S_k h, \quad (7)$$

где q — реакция в грунте при его деформации; $S_k = b_k x_k$ — площадь пятна контакта, образованная i -м колесом; h — глубина колеи; C_r — коэффициент осадки; b_k — ширина колеса; x_k — длина пятна контакта.

Из рис. 2 видно, что x_k можно найти из соотношения $x_k = 2\sqrt{r_k h - h^2}$.

Пренебрегая в этом соотношении величиной h^2 в виду ее малости, преобразуем (7) к виду

$$F_r = 2C_r b_k h \sqrt{2hr_k}.$$

Принимая $F_r = G_k$ (часть веса ТМ, приходящая на i -е колесо), из последнего уравнения получим следующее соотношение для определения глубины колеи:

$$h = \left(\frac{G_k}{2C_r b_k \sqrt{2r_k}} \right)^{2/3}. \quad (8)$$

С учетом (8) оценка энергозатрат $E_{пр}$ на прессование грунта при движении по грунтам с низкой несущей способностью может быть определена по следующему критерию:

$$E_{пр} = \sum_{i=1}^n M_{ki} g V_{окр i} K_{Vi} (1 - S_i), \text{ Вт}, \quad (9)$$

где $M_{ki} = G_{ki} / g$ — часть массы ТМ, приведенная к i -му колесу; $V_{окр i} = \omega_i r_k$ — окружная скорость

i -го колеса; $K_{Vi} = \frac{X_{KX}}{\sqrt{r_k^2 - X_{KX}^2}}$ — угол наклона ка-

сательной к окружности в точке А (см. рис. 2); ω_i — угловая скорость вращения i -го колеса.

Анализ выражения (9) позволяет установить соотношения между энергозатратами на прессование грунта, глубиной колеи и нагрузкой на колеса, скоростью движения ТМ, а также величиной буксования.

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Предложены критерии, позволяющие оценить уровень энергозатрат на создание тягового усилия и прессование грунта колесной транспортной машиной с учетом буксования; сформулирована методика расчета значений рассматриваемых параметров. Основные положения проиллюстрированы примерами расчетов.

2. С увеличением массы, глубины колеи и окружной скорости энергозатраты на прессование грунта возрастают прямо пропорционально этим величинам.

3. Зависимость энергозатрат от буксования проявляется в обратной пропорциональности коэффициенту буксования, и в предельном случае ($S = 1$) энергия на прессование грунта не затрачивается. В этой ситуации вся энергия, подводимая к колесу, расходуется только на «фрезерование» грунта. Поэтому полезной работы движитель не совершает, а энергетические ресурсы, которые затрачиваются на «фрезерование» грунта, учитываются критерием (3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добрецов, Р.Ю. Анализ энергозатрат в шасси гусеничной машины с учетом особенностей работы движителя [Текст] / Р.Ю. Добрецов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 140 с.
- Авотин, Е.В. Методика расчета нормальных давлений на опорной поверхности гусеницы транс-

портной машины [Текст] / Е.В. Авотин, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. — 2011. №3. — С. 103–108.

3. Авотин, Е.В. Динамика планетохода [Текст] / Е.В. Авотин, И.С. Болховитинов, А.Л. Кемурджиан [и др.]. — М.: Наука, 1979. — 440 с.



АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБОДА ТОРМОЗНОГО БАРАБАНА

Энергетический баланс транспортного средства при торможении

Для решения задачи определения средних температур необходимо располагать данными о коэффициентах [1], определяющих распределение подводимого тепла в тормозном механизме, и о температуре окружающей среды.

Воспользуемся основными зависимостями для расчета энергетической нагруженности тормозных механизмов, которые приведены ниже [2].

Уравнение энергетического баланса заторможенного автомобиля:

$$\Delta T_k = Q_{гп} + A_i + A_{\phi}, \quad (1)$$

где T_k — уменьшение кинетической энергии автомобиля при торможении, Дж; A_i — суммарная работа сил трения в двигателе и трансмиссии, сил сопротивления движению, Дж; $Q_{гп}$ — энергия, преобразуемая тормозными механизмами в тепло при однократном торможении (суммарная работа сил трения в тормозных механизмах), Дж; A_{ϕ} — работа сил трения скольжения в контакте шин с дорогой, Дж;

$$A_i = A'_t + A_W; \quad (2)$$

A'_t — работа сил трения в двигателе на режиме принудительного холостого хода и агрегатах трансмиссии, Дж; A_W — работа сил сопротивления воздуха, соответственно, Дж.

После подстановки уравнение энергетического баланса заторможенного автомобиля имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{m_a}{2} (v_n^2 - v_k^2) = \\ = Q_{гп} + J_{\Sigma} \varepsilon_k \delta_{вр} + k F v_a^2 S + m_a g \varphi S, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_a — полная масса автомобиля, кг; v_n — начальная скорость автомобиля, м/с; v_k — конечная скорость автомобиля, м/с; J_{Σ} — суммарный

момент инерции, кг·м²; τ — время торможения, с; ε_k — угловое ускорение колеса, с⁻²; $\delta_{вр}$ — коэффициент учета инерции вращающихся масс; S — тормозной путь, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; k — коэффициент сопротивления воздуха, Н с²/м⁴; F — площадь лобового сечения автомобиля, м²; φ — коэффициент сцепления.

Определим энергию, преобразуемую в тепло всеми тормозными механизмами автомобиля, в случае однократного торможения на горизонтальной дороге:

$$\begin{aligned} Q_{гп} = \frac{m_a}{2} j \frac{(v_n + v_k)}{2} \tau - \frac{J_{\Sigma} j \delta_{вр}}{r_k} - k F v_a^3 \tau - \\ - m_a g \varphi v_a \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Количество теплоты, генерируемой на рабочих поверхностях пар трения тормозного механизма распределяется между тормозным барабаном и фрикционными накладками в пропорции, соответствующей коэффициенту распределения тепловых потоков σ . То есть количество теплоты, поглощаемое тормозным барабаном будет равно

$$\begin{aligned} Q_{\delta} = \sigma (1 - \gamma) \times \\ \times \left(\frac{m_a}{2} j \frac{(v_n + v_k)}{2} \tau - \frac{J_{\Sigma} \delta_{вр} j}{r_k} - \right. \\ \left. - k F v_a^3 \tau - m_a g \varphi v_a \tau \right) = \Delta U \tau, \end{aligned} \quad (5)$$

где j — среднее замедление автомобиля, создаваемое суммарным сопротивлением его движению, м/с²; r_k — радиус качения колеса, м; γ — коэффициент распределения тормозных сил между осями автомобиля; ΔU — тепловой поток, Дж/с.

Тогда количество теплоты, поглощаемое тормозной колодкой и фрикционными накладками, будет равно

$$Q_k = (1 - \sigma)(1 - \gamma) \times$$

$$\times \left(\frac{m_a}{2} j \frac{(v_n + v_k)}{2} \tau - \frac{J_{\Sigma} \delta_{вр} j}{r_k} - k F v_a^3 \tau - m_a g \varphi v_a \tau \right) = \Delta U' \tau. \quad (6)$$

Как известно, при повышении объемной температуры на открытых поверхностях происходит теплообмен с окружающим воздухом путем конвекции. Для определения количества теплоты [3], отводимой от поверхности обода тормозного барабана площадью $F_{об}^k$, следует воспользоваться законом Ньютона — Рихмана:

$$Q_k = \alpha (T_{об} - T_{пов}) F_{об}^k d\tau, \quad (7)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/Км²; $T_{об}$ — температура обода тормозного барабана, К; $T_{пов}$ — температура поверхности тормозного барабана, К.

К боковой стенке теплота отводится посредством кондуктивного теплообмена. Согласно закону Фурье [3] количество теплоты, отводимое от боковой поверхности обода тормозного барабана площадью $F_{бс}^{\lambda}$ к боковой стенке длиной h , находится по формуле

$$Q_{бс} = \frac{\lambda d (T_{об} - T_{бс}) F_{бс}^{\lambda} d\tau}{dh}, \quad (8)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала тормозного барабана, Вт/Км; $T_{бс}$ — температура боковой стенки тормозного барабана, К.

При наличии лучевого теплообмена на некоторой части поверхности барабанно-колодочного тормоза S_{σ} для нахождения граничных условий третьего рода применим закон Стефана — Больцмана [5]:

$$Q^{\pi} = \sigma_{СБ} \varepsilon (T^4 - T_{пов}^4) F_{об}^{\sigma} d\tau, \quad (9)$$

где $\sigma_{СБ}$ — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/м² К⁴; ε — степень черноты; T — температура абсолютно черного тела, К; $F_{об}^{\sigma}$ — площадь поверхности лучистого теплообмена, м².

Количество теплоты, аккумулируемое ободом тормозного барабана (боковой стенкой), определяется с помощью зависимости

$$Q_{об(бс)} = m_{об(бс)} c_{об(бс)} dT_{об(бс)}, \quad (10)$$

где $m_{об(бс)}$ — масса обода тормозного барабана (боковой стенки), кг; $c_{об(бс)}$ — теплоемкость ма-

териала обода тормозного барабана (боковой стенки), Дж/кг К.

Тепловой поток, воспринимаемый тормозным барабаном, равен

$$Q_{\delta} = Q_{бс} + Q_{об} + Q_k + Q_{л}. \quad (11)$$

Чтобы решить уравнения математической модели приближенными аналитическим или численным методами, необходимо их преобразовать таким образом, чтобы незначительно повлиять на точность оценки теплового состояния барабанного тормоза и одновременно упростить процесс нахождения его параметров. Следует подробнее рассмотреть случай тепловой нагрузки тормозного барабана, поскольку он сопровождается нагревом высокой интенсивности.

На рис. 1 показаны тепловые потоки, сопровождающие работу тормозного барабана. Тепловой поток q_A вследствие трения при торможении подводится к рабочей поверхности и аккумулируется в объеме тормозного барабана. Часть теплового потока отводится конвекцией q_{α} и излучением q_{σ} в окружающую среду.

Уравнения (4)–(10) и принятые допущения помогут при рассмотрении аналитическим методом математической модели тепловых процессов, имеющих место в парах трения барабанно-колодочных тормозов.

Аналитический метод определения средних температур рабочих поверхностей обода барабана

При использовании математической модели тепловых процессов в барабанном тормозе пренебрегаем лучевым теплообменом, считая, что его влияние незначительно. Подставив (7)–(8) и (10) в (11), получили следующую зависимость для тормозного барабана:

$$\Delta U d\tau = m_{бс} c d(T_{бс} - T_0) + m_{об} c d(T_{об} - T_0) - \alpha ((T_{об} - T_0) - (T_{пов} - T_0)) F_{бс} d\tau. \quad (12)$$

Тепловой баланс для боковой стенки описывается с помощью закона Фурье:

$$\lambda \frac{d \left(\frac{(T_{бс} - T_0)}{dh} \right)}{dh} V_{бс} = m_{бс} c \frac{d(T_{бс} - T_0)}{d\tau}. \quad (13)$$

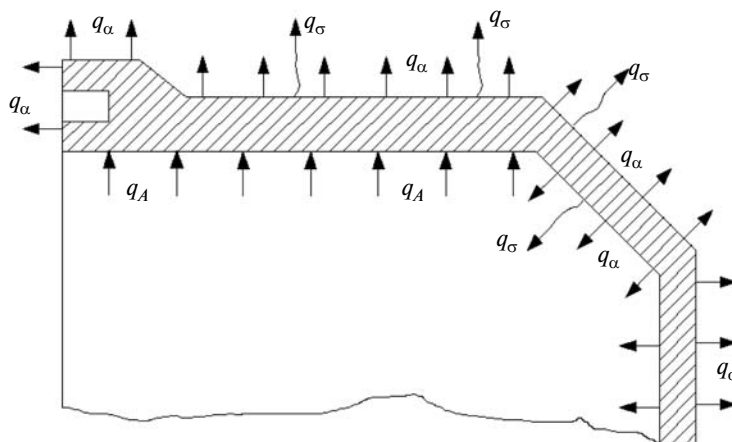


Рис. 1. Тепловые процессы в тормозном барабане:
 q_A — подводимый тепловой поток; q_α — тепловой поток, отводимый конвекцией; q_σ — тепловой поток, отводимый излучением

После замены в (13) дифференциала $\frac{d(T_{6c} - T_0)}{dh}$ на $\frac{\Delta(T_{6c} - T_0)}{h}$ и вынесения h из под дифференциала можно получить следующее:

$$\lambda \frac{d(T_{06} - T_{6c} - T_0 + T_0)}{d\tau} V_{6c} = m_{6c} c \frac{d(T_{6c} - T_0)}{d\tau}, \quad (14)$$

где V_{6c} — объем боковой стенки, m^3 .

Уравнение (15) не имеет решения. Для нахождения приближенного решения следует записать

$$d(T_{06} - T_{6c} - T_0 + T_0) = d(T_{06} - T_0) - d(T_{6c} - T_0);$$

$$d(T_{06} - T_0) = \Delta(T_{06} - T_0);$$

$$d(T_{6c} - T_0) = \Delta(T_{6c} - T_0).$$

Поскольку осуществленные преобразования снижают точность результата, целесообразно ввести коэффициент уточнения ψ , с помощью которого характер искомой зависимости согласуется с результатами эксперимента и математического моделирования. После упрощения получаем

$$\frac{\psi h d h}{(\Delta(T_{06} - T_0) - \Delta(T_{6c} - T_0)) \lambda V_{6c}} =$$

$$= \frac{d\tau}{\Delta(T_{6c} - T_0) m_{6c} c}. \quad (15)$$

После интегрирования равенства получаем

$$\frac{\tau}{\Delta(T_{6c} - T_0) m_{6c} c} = \frac{\psi h^2}{2\lambda V_{6c} (\Delta(T_{06} - T_0) - \Delta(T_{6c} - T_0))} + C_1. \quad (16)$$

Начальными условиями являются $\tau = 0$, $h = 0$. Поэтому $C_1 = 0$. В результате равенство приобрело вид

$$\Delta(T_{6c} - T_0) = \frac{\Delta(T_{06} - T_0)}{\left(1 + \frac{\psi h^2 \rho c}{2\tau \lambda}\right)}, \quad (17)$$

где ρ — плотность материала боковой стенки тормозного барабана, $кг/м^3$.

Преобразовав полученное выражение (17) к дифференциальному виду и подставив его в уравнение теплового баланса (12), имеем

$$\Delta U d\tau = \frac{m_{6c} c \Delta(T_{06} - T_0)}{\left(1 + \frac{\psi h^2 \rho c}{2\tau \lambda}\right)} + m_{06} c d(T_{06} - T_0) - \alpha((T_{06} - T_0) - (T_{пов} - T_0)) F_6 d\tau. \quad (18)$$

После перегруппировки составляющих из (18) получаем

$$\frac{d(T_{об} - T_0)}{\Delta U - \alpha(\Delta(T_{об} - T_0) - \Delta(T_{пов} - T_0))F_6} = \frac{d\tau}{\left(\frac{m_{6c}c}{\left(\frac{\psi h^2 \rho c}{2\lambda\tau} + 1 \right)} + m_{об}c \right)}. \quad (19)$$

Проинтегрировав обе части этого равенства, получим

$$\frac{\ln(\Delta U - \alpha F_6(T_{об} - T_0) + \alpha F_6(T_{пов} - T_0))}{-\alpha F_6} = \frac{\psi h^2 \rho m_{6c}}{2\lambda(m_{6c} + m_{об})^2} \times \ln(2\lambda c \tau(m_{6c} + m_{об}) + m_{об} \psi h^2 \rho c^2) +$$

$$+ \frac{\tau}{(m_{6c} + m_{об})c} + \frac{\psi h^2 \rho m_{об}}{2\lambda(m_{6c} + m_{об})^2} + C_2. \quad (20)$$

Для нахождения C_2 следует задаться начальным условием (при $\tau = 0$, $T_{об} = T_0$). Тогда, подставив его в выражение (20), получаем

$$C_2 = \frac{\ln(\Delta U + \alpha F_6(T_{пов} - T_0))}{-\alpha F_6} - \frac{\psi h^2 \rho m_{6c}}{2\lambda(m_{об} + m_{6c})^2} \times \ln(m_{об} c^2 \psi h^2 \rho) - \frac{\psi h^2 \rho m_{об}}{2\lambda(m_{об} + m_{6c})^2}. \quad (21)$$

После подстановки значения C_2 окончательно записываем уравнение теплового баланса в виде

$$\ln\left(1 - \frac{\alpha F_6(T_{об} - T_0)}{\Delta U + \alpha F_6(T_{пов} - T_0)}\right) = \frac{\psi h^2 \rho m_{6c}}{2\lambda(m_{6c} + m_{об})^2} \times$$

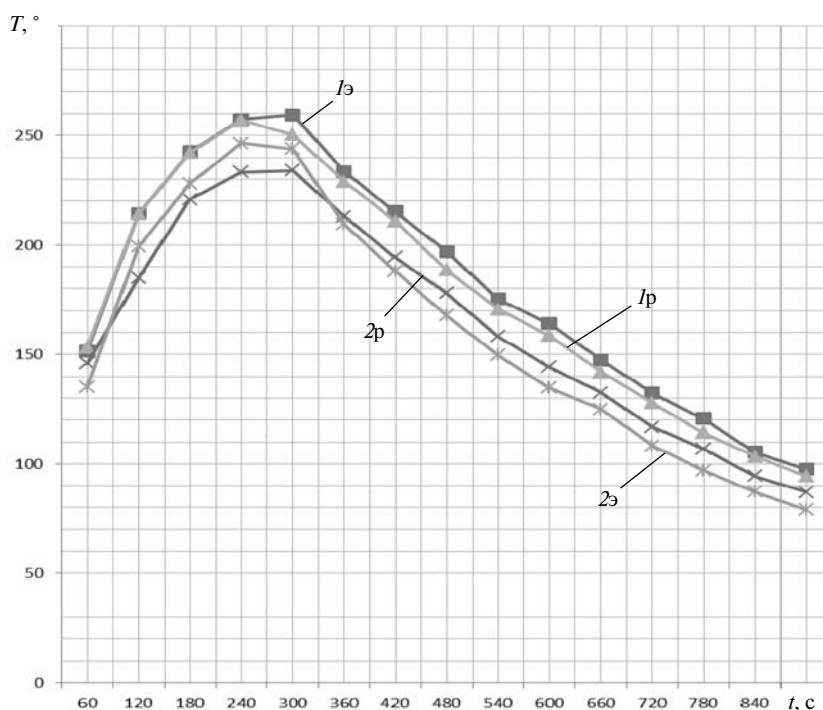


Рис. 2. Закономерности изменения во времени температур деталей барабанно-колодочного тормоза автотранспортного средства МАЗ 551605–371 при нагревании (0–300 °C) и вынужденном охлаждении (300–900 °C): Iэ — на поверхности трения (экспериментальный метод); Iр — на поверхности трения (расчетный метод); 2э — на наружной поверхности обода (экспериментальный метод); 2р — на наружной поверхности обода (расчетный метод)

$$\times \ln \left(\frac{2\lambda\tau(m_{6c} + m_{об})}{m_{об}c\psi h^2\rho} + 1 \right) + \frac{\tau}{(m_{6c} + m_{об})c}. \quad (22)$$

Преобразуем уравнение, умножив обе части на $-\alpha F_6$:

$$1 - \frac{\alpha F_6(T_{об} - T_0)}{\Delta U + \alpha F_6(T_{пов} - T_0)} = e^{\frac{-\alpha F_6\psi h^2\rho m_{6c}}{2\lambda(m_{6c} + m_{об})^2}} \left(\frac{2\lambda\tau(m_{6c} + m_{об})}{m_{об}c\psi h^2\rho} + 1 \right) - e^{\frac{\alpha F_6\tau}{(m_{6c} + m_{об})c}}. \quad (23)$$

Таким образом окончательная зависимость имеет следующий вид

$$T_{об} = \left(1 - e^{\frac{-\alpha F_6\psi h^2\rho m_{6c}}{2\lambda(m_{6c} + m_{об})^2}} \left(1 + \frac{2\lambda\tau(m_{6c} + m_{об})}{m_{об}c\psi h^2\rho} \right) + e^{\frac{\alpha F_6\tau}{(m_{6c} + m_{об})c}} \right) \times (\Delta U + \alpha F_6(T_{пов} - T_0)) / \alpha F_6 + T_0. \quad (24)$$

Для подтверждения аналитического метода определения средних рабочих поверхностей обода барабана по формуле (24) были проведены экспериментальные испытания, при которых

производились единичные торможения: на участке 1,0 км автотранспортное средство двигалось со скоростью 60 км/ч, и производилось его притормаживание до скорости 30 км/ч с замедлением 3,0 м/с². Для оценки температур применялись хромель-капельные термопары с диаметром проволоки 0,4 мм. В качестве автотранспортного средства подкатегории М₂, был выбран реальный грузовой автомобиль марки МАЗ 551605–371.

Проведенные дорожные испытания серийного тормозного механизма автотранспортного средства МАЗ 551605–371 показали, что после окончания процесса торможения на поверхностях пары трения тормозного механизма сохраняется квазистабильное тепловое состояние (рис. 2).

Это состояние, получившее наименование термостабилизационного, негативно отражается на фрикционных свойствах пар трения (возникают термические напряжения в металлическом фрикционном элементе, деструктивные процессы в неметаллическом фрикционном элементе).

Сравнив экспериментальные данные и значения по расчетной зависимости (24), можно сделать вывод о том, что полученная формула в действительности может быть применима для определения аналитическим методом средних температур рабочих поверхностей обода барабана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрик, А.А. Барабанно-колодочные тормозные устройства. Том 1 [Текст] / А.А. Петрик, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко. — Краснодар: Изд-во Кубанск. государств. технолог. ун-та, 2006. — 263 с.

2. Вахламов, В.К. Конструкция, расчет и эксплуатационные свойства автомобилей [Текст]: Учебное пособие для студентов вузов / В.К. Вахламов. — М.: Академпресс, 2009. — 560 с.

3. Кудинов, А.А. Тепломассообмен [Текст]: Учебное пособие / А.А. Кудинов. — М.: Инфа-М, 2012. — 375 с.

4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. — М.: Высш. школа, 1967. — 599 с.

5. Ерохин, В.Г. Основы термодинамики и теплотехники [Текст] / В.Г. Ерохин. — М.: Либроком, 2009. — 552 с.

УДК 629.12.011.1.001.24:539.43

Р.В. Гучинский, С.В. Петинов

РАЗРАБОТКА УЗЛА КОНСТРУКЦИИ СУДНА С УЧЕТОМ УСЛОВИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Общие положения

Деление длинных надстроек и рубок на отдельные блоки (с целью уменьшения их участия в изгибной деформации корпуса и снижения веса

надстроек и рубок) применяется в судостроении более ста лет. Разрезы и скользящие или расширительные соединения этих блоков — неотъемлемая часть конструкции надстроек и рубок.

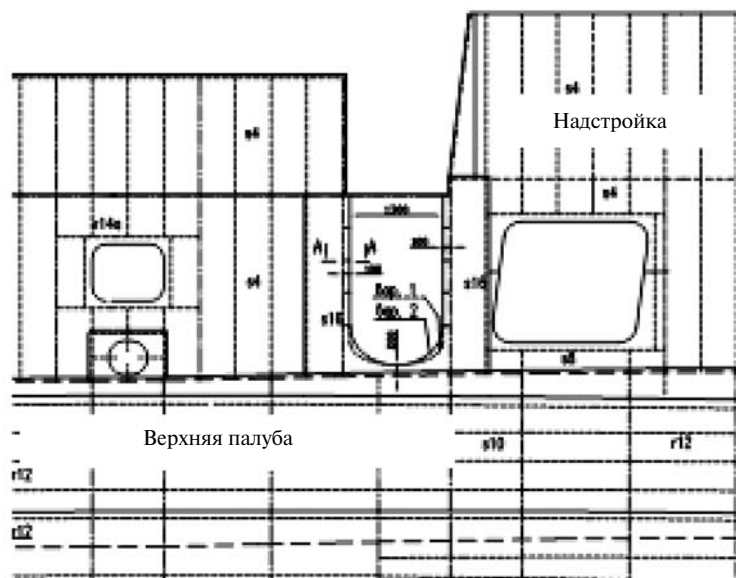


Рис. 1. Корпус и надстройка в районе разреза надстройки и расширительного соединения. Показаны варианты формы нижней части выреза

Между тем давно известно, что разрезы вносят высокие местные напряжения в области их окончания и оказываются фактором ненадежности конструкции [9, 10]. Высказывалось предположение, что в катастрофе «Титаника» заметную роль сыграло разрушение, развившееся от расширительного соединения рубки [2].

Несмотря на столь долгую историю и усилия инженеров-проектировщиков и исследователей, убедительного решения проблемы надежности конструкции расширительных (скользящих) соединений у их окончания возле палубы корпуса не найдено. К этой конструкции предъявляются противоречивые требования: надо одновременно обеспечить податливость и непроницаемость соединения, добиться радикального уменьшения повышенных напряжений у окончания разреза. Подобная проблема возникла недавно при проектировании судна с длинной надстройкой, которая (согласно сложившейся практике и требованиям к уменьшению веса конструкции) должна разделяться на сравнительно короткие участки. Прочность этих участков должна обеспечиваться преимущественно при действии местных поперечных и инерционных нагрузок [9, 10].

Принятые в проекте судна конструкция скользящего (расширительного) соединения

стенки надстройки, размеры и конфигурация компонентов вызвали сомнения в отношении прочности при переменном нагружении, усталости. Существенно для надежности конструкции то, что стенки надстройки продолжают обшивку борта (рис. 1), в силу чего при возникновении трещины у окончания выреза возможно ее распространение в основные связи корпуса. Эти сомнения, высокие требования к надежности конструкции соединения, специфика расчетных оценок усталости конструкций послужили основанием для выполнения нашей работы.

Подходящей для анализа сопротивления переменному нагружению может быть техника расчетов усталости, принятая норвежским Бюро Веритас [3]. Во внимание приняты также рекомендации Бюро по расчетам усталости конструкций морских сооружений [4].

Методологии анализа усталости сварных конструкций в документах Бюро DNV, как и в материалах МАКО*, Международного института сварки (IIW) [5] и др., построены на одних принципах. Правила [3] предусматривают две возможности расчетов усталости судовых конструкций: 1) упрощенный анализ усталости; 2) расчет, основанный

* Международная Ассоциация Классификационных обществ (IACS)

на возможно полном представлении о нагрузках, динамических реакциях конструкции и оценке напряженности на протяжении всего эксплуатационного периода. В первом случае упрощение относится к определению волновых нагрузок: эти нагрузки, изгибающие моменты, перерезывающие силы, гидродинамические давления и инерционные усилия рассчитываются по формулам, рекомендованным правилами. Эти формулы характеризуют компоненты внешних воздействий определенной вероятностной мерой (обеспеченностью), что позволяет рассчитать «долговременное распределение» вероятности номинальных напряжений, соответствующих учитываемым видам деформации корпуса.

В более полном расчете внешние воздействия, параметры долговременного распределения напряжений рассчитываются в формате спектрального метода статистической динамики. Для этого необходимы применение специализированных программ динамической калибровки корпуса и подробная информация о «волновом климате» в районах плавания корабля и времени нахождения в конкретных волновых условиях. Несмотря на достоинства более совершенного научного подхода к расчету внешних сил, вследствие ряда естественных неопределенностей при использовании этого подхода (приближенность модели определения внешних сил, неопределенность условий плавания, климатических условий) сравнительно простая схема сохраняет практическую ценность, обеспечивает приемлемую достоверность оценок ресурса.

В обеих версиях расчета напряженность конструкции и узлов корпуса определяется с помощью метода конечных элементов. К технике моделирования (представление конструкции в виде эквивалентной конечно-элементной модели) и точности расчета напряжений предъявляются одинаковые требования. Точно так же в обеих версиях используются одни и те же данные о сопротивлении материала при усталости (расчетные $S-N$ кривые).

В связи с ограниченной информацией о районах плавания, интенсивности использования, изменениях климатических условий на протяжении жизненного цикла судна, отсутствующими данными о динамических характеристиках принята схема упрощенного анализа усталости.

Расчеты ресурса конструкции стенки надстройки

Порядок расчета усталости конструкций следующий. Рассчитываются номинальные напряжения в корпусе судна в месте расположения анализируемого узла при общем изгибе — в верхней палубе, если узел расположен вне области интенсивных гидродинамических нагрузок, давлений. Трехмерный характер волнения требует учитывать помимо напряжений от изгиба в вертикальной плоскости, также и напряжения при изгибе в горизонтальной плоскости [3, 6, 7]. Соответствующие изгибающие моменты (по Правилам МАКО и DNV) определяются следующими зависимостями:

размахом изгибающего момента при изгибе в вертикальной плоскости, изменением момента от положения на вершине волны до положения на подошве волны [3, 6]

$$\Delta M_v = 0,30k_v BL^2 C_w (C_b + 0,257), \text{ кНм}, \quad (1)$$

где k_v — эмпирический коэффициент, учитывающий влияние скорости хода в условиях расчетного волнения; $C_w = 10,75 - (3 - 0,01L)^{1,5}$ — эффективная высота волны, которая характеризуется обеспеченностью $Q = 10^{-8}$; C_b — коэффициент общей полноты;

изгибающим моментом (амплитудой) в горизонтальной плоскости для средней части длины корпуса судна («миделя»)

$$M_h = 0,44L^{2,25} (d + 0,30B) C_b, \text{ кНм}, \quad (2)$$

где d — осадка.

Номинальные напряжения, размахи, отвечающие этим моментам следующие: напряжения при изгибе в вертикальной плоскости — $S_v = \Delta M_v / W_{\min}$, где W_{\min} — момент сопротивления верхней палубы (без надстройки), напряжения изгиба в горизонтальной плоскости $S_h = 2M_h / W_h$, где W_h — момент сопротивления корпуса при изгибе в горизонтальной плоскости. Поскольку оба вида деформации корпуса отличаются случайными значениями фазы, рассчитывается эквивалентное номинальное напряжение (для соединения борта и палубы) по формуле

$$S_{eq} = S_v (1 + (S_h / S_v)^2 + 2\rho_{vh} (S_h / S_v))^{1/2}, \quad (3)$$

в которой $\rho_{vh} = 0,1$ — среднее значение коэффициента корреляции деформаций изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскостях [3, 6].

Долговременное распределение напряжений (оцениваемое для всего эксплуатационного периода) описывается двухпараметрической аппроксимацией («законом») Вейбулла [3, 6]:

$$Q(S > S_1) = \exp(-(S_1 / a_S)^k), \quad (4)$$

где a_S, k — соответственно параметры масштаба и формы распределения.

Расчет напряженности корпуса или «представительного» блока, включая анализируемые детали, выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для моделирования поля напряжений у деталей применяется соответственно мелкая сетка конечных элементов, позволяющая находить местные напряжения, необходимые для оценок ресурса (рис. 2).

Расчетные кривые усталости согласно Правилам [3] характеризуют сопротивление «нормальных» сталей (умеренной прочности) и сталей повышенной прочности («high strength», буквально — высокопрочных сталей). Обычно такое объединение распространяется преимущественно на сварные соединения. Расчетные кривые аппроксимированы в обычной форме степенной зависимости

$$\lg N = \lg C - m \lg S, \quad (5)$$

описывающей два участка кривой: один — в диапазоне $4 \leq \lg N \leq 7$, а второй — в диапазоне $\lg N \geq 7$; последний характеризует падение сопротивления ниже предела усталости вследствие нерегулярного характера эксплуатационного нагружения. Параметры аппроксимации приведены в табл. 1 для «основного» металла и металла сварного соединения.

В правилах указывается, что если сварное соединение параллельно «потoku» напряжений, то напряжения, рассчитанные для узла, могут быть уменьшены в зависимости от качества выполнения сварного соединения. Так, для соединений фланца и стенки, выполненных ручной или автоматической сваркой с полным проплавлением, редуцированный коэффициент может быть равным 0,9. При необходимости можно добиться повышения сопротивления соединений путем их механической обработки, в основном в области weld toe, сплавления, места перехода от основного к наплавленному металлу. Правда, эта возможность не имеет убедительного обоснования, когда рассматриваются соединения, ориентированные вдоль «потoku» напряжений.

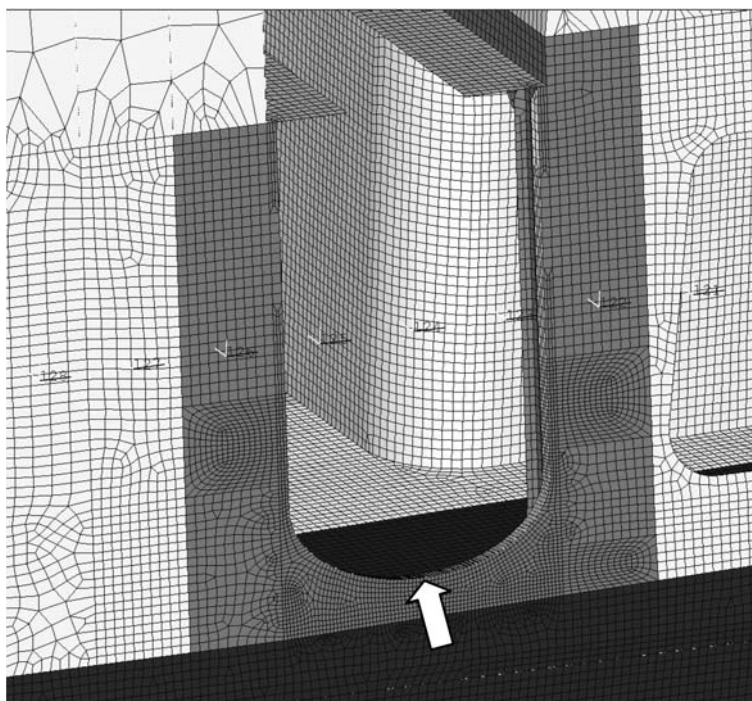


Рис. 2. КЭ-модель участка надстройки у разреза скользящего соединения. Стрелка показывает «критическую» область

Таблица 1

Параметры расчетных S - N кривых* [3]

S - N кривая	Материал	$N \leq 10^7$		$N \geq 10^7$	
		$\lg C$	m	$\lg C$	m
I	Сварное соединение	12,164	3,0	15,606	5,0
III	Основной металл	15,117	4,0	17,146	5,0
IV	Основной металл**	12,436	3,0	—	—

*Воздушная среда, катодная защита от коррозии

** В коррозионной среде; параметры отнесены ко всему диапазону N

Правило суммирования повреждений при нерегулярном нагружении (действие волновых нагрузок и возможные комбинации с нагрузками на тихой воде) дается в форме обычного суммирования повреждений от циклических фрагментов:

$$D = \sum_i n_i / N_i = C^{-1} \sum_i n_i (S_i)^m \leq \eta, \quad (6)$$

где C, m — параметры аппроксимации кривой усталости; η — относительное время нахождения судна в море.

Для этого долговременное распределение напряжений (двухпараметрическая аппроксимация Вейбулла) $Q(S > S_1) = \exp(-(S_1 / a_S)^k)$ представляется в виде композиции циклических фрагментов с числом n_i циклов наработок (по В.В. Болотину, [1]) при размахе напряжений S_i .

С помощью программы метода конечных элементов для выбранного узла рассчитываются коэффициенты концентрации напряжений: K_t^v —

при изгибе в вертикальной плоскости, K_t^h — при изгибе в горизонтальной плоскости. После этого рассчитываются местные напряжения для места ожидаемого развития процесса повреждения, S_v^{\max} и S_h^{\max} , а затем в зависимости от расположения узла — статистически эквивалентное максимальное напряжение с учетом (3):

$$S_{eq}^{\max} = S_v^{\max} (1 + (S_h^{\max} / S_v^{\max})^2 + 2\rho_{vh} (S_h^{\max} / S_v^{\max}))^{1/2}. \quad (7)$$

Результаты расчета максимальных напряжений для вариантов формы выреза в стенке надстройки приведены в табл. 2.

Параметр масштаба распределения Вейбулла статистически эквивалентного максимального напряжения — $a_S = S_{eq}^{\max} / (-\ln Q)^{1/k}$, а входящий в это выражение параметр формы распределения — $k = 2,21 - 0,54 \lg L = 1,081$; L — расчетная длина корабля [3].

Таблица 2

Максимальные нормальные напряжения (размахи) в стенке надстройки у нижней кромки выреза, МПа

Вариант геометрии узла	S_v^{\max} , МПа	S_h^{\max} , МПа	S_{eq}^{\max} , МПа
2	539,06	171,20	581,64
3	498,95	—	538,31
4	432,75	150,00	466,94
5	472,84	—	510,19
6	430,60	—	464,62

Параметр масштаба распределения Вейбулла для амплитуд эквивалентного номинального напряжения — $a_{eq} = S_{eq} / (\ln N^*)^{1/k} = 127,3/14,246 = 8,936$ МПа. Размах максимального эквивалентного напряжения (вариант 2): $S_{eq} = S_v(1 + (S_h / S_v)^2 + 0,2(S_h / S_v))^{1/2} = 581,64$ МПа.

Параметр масштаба распределения Вейбулла для размахов эквивалентного максимального напряжения — $a_{eq} = S_{eq} / (\ln N^*)^{1/k} = 581,64/14,246 = 40,829$ МПа; коэффициент концентрации эквивалентных напряжений — $K_{eq} = 581,64/254,6 = 2,284$.

Правила [3, 4, 7, 12 и др.] рекомендуют для расчетов ресурса деталей конструкции использовать линейное суммирование повреждений в «стандартной» форме: $D = \sum_i n_i / N_i \leq \eta$. Для применения этой формы требуется долговременное распределение напряжений в анализируемом узле конструкции — $Q = \exp(-(S / a_s)^k)$ — преобразовать к блочному виду с числом «ступеней» эквивалентного циклического нагружения не менее 20 [3]. Между тем в правилах нет описания процедуры такого преобразования. Поэтому целесообразно рассмотреть возможную версию преобразования. Это важно также для расчетов подрастания трещин усталости, которые предполагаются при оценках остаточного ресурса, времени безопасной эксплуатации конструкций с обнаруженными трещинами.

Определим параметры распределения эквивалентных местных напряжений для варианта 2 (рис. 1) конструкции. Параметр формы распределения — $k = 1,081$. Найдем параметр масштаба. Максимальное местное напряжение в основании выреза в этом варианте — $S_{max}^{eq} = 581$ МПа; тогда $a_{eq} = \Delta \sigma_{eq} / (\ln N^*)^{1/k} = 581,64/14,246 = 40,829 \approx 40,83$ МПа.

Для определения пределов ступеней напряжений в блочной форме найдем размах напряжения, отвечающий «излому» кривой усталости: $S_0 = (C_1 / N_0)^{1/m_1}$. $C_1 = 1,309 \cdot 10^{15}$; $m_1 = 4$; $N_0 = 10^7$. И тогда $S_0 = (C_1 / N_0)^{1/m_1} = 100(1,309)^{1/4} \approx 107$ МПа.

Примем, отступая от рекомендации [3], что число ступеней напряжения в блоке равно 7. Эти ступени: 28–107, 107–186, 186–265, 265–344, 344–423, 423–502 и 502–581 МПа.

Рассчитаем относительное эквивалентное число циклов нагружения (вероятность) для каждой ступени блока:

$$p_i = n_i / N^* = \int_{S_{min}}^{S_{max}} p(S) dS = \frac{k}{a_s^k} \int_{S_{min}}^{S_{max}} S^{k-1} \exp(-(S / a_s)^k) dS, \quad (8)$$

где S_{min} и S_{max} — напряжения нижней и верхней границ ступеней блока; $N^* = 4,7 \cdot 10^7$ циклов.

Для каждой ступени блока рассчитывается частное повреждение

$$d_i = (N^* / C a_s^k) \int_{S_{min}}^{S_{max}} S^{m+k-1} \exp(-(S / a_s)^k) dS. \quad (9)$$

Соответственно этим значениям повреждения рассчитывается эквивалентное напряжение для каждой ступени:

$$d_i = n_i / N_i = n_i S_i^m / C; \quad S_i^{eq} = (d_i C / n_i)^{1/m}. \quad (10)$$

Затем рассчитывается суммарное повреждение в «стандартной» блочной форме (6):

$$D = \sum_i n_i / N_i = \frac{1}{C} \sum_i n_i S_{i,eq}^m = \frac{N^* S_{0,eq}^m}{C} \sum_i p_i \bar{S}_{i,eq}^m, \quad (11)$$

где $\bar{S}_{i,eq}^m = S_{i,eq}^m / S_{0,eq}^m$, а напряжение $S_{0,eq}$ выбирается в качестве измерителя масштаба из ряда найденных по формуле (10) для классов (ступеней) напряжений.

Результаты расчетов характеристик эквивалентного блока приведены в табл. 3.

По этим результатам рассчитывается в блочной форме повреждение. В начале за измеритель масштаба напряжений принимается максимальное эквивалентное напряжение — $S_{0,eq} = 532,1$ МПа. Затем рассчитывается суммарное повреждение

$$D = \frac{N^* S_{0,eq}^m}{C} \sum_i p_i \bar{S}_{i,eq}^m = 1,468.$$

Для сопоставления рассчитаем накопленное повреждение по зависимости, в которой используется непрерывное распределение напряжений, с учетом двух участков кривой усталости (при $S_{max} = 581,0$ МПа, $S_0 = 107$ и $S_{min} = 28$ МПа):

Таблица 3

Расчет параметров блока нагружения

S класс	n_i	p_i	d_i	S_{eq}
28–107	$2,140 \cdot 10^7$	0,455	0,231	68,52
107–186	$2,492 \cdot 10^6$	0,053	0,680	137,5
186–265	$2,480 \cdot 10^5$	$5,270 \cdot 10^{-3}$	0,398	214,1
265–344	$2,257 \cdot 10^4$	$4,802 \cdot 10^{-4}$	0,125	291,8
344–423	$1,935 \cdot 10^3$	$4,120 \cdot 10^{-5}$	0,028	371,0
423–502	158	$3,370 \cdot 10^{-6}$	0,0049	448,9
502–581	12	$2,650 \cdot 10^{-7}$	0,000735	532,1

$$D = (N^* k / a_s^k) \left(C_1^{-1} \int_{S_0}^{S_{\max}} S^{m_1+k-1} \exp(-(S/a_s)^k) dS + \right. \\ \left. + C_2^{-1} \int_{S_{\min}}^{S_0} S^{m_2+k-1} \exp(-(S/a_s)^k) dS \right) = 1,467. \quad (12)$$

Как видим, замена непрерывного распределения довольно грубой, состоящей из 7 ступеней блочной схемой (11) привела к вполне точной оценке повреждения. Вместе с тем результаты расчетов показывают, что принятый вариант конструкции (радиус скругления нижней части выреза соединения) неприемлем, так как не обеспечивает требование к ресурсу конструкции.

В данной конструкции узла уменьшить местные напряжения, а следовательно, добиться увеличения долговечности можно путем изменения пропорций нижней, полуэллиптической части выреза. Увеличивая незначительно, на 8 %, длину выреза (и большую полуось эллипса) и уменьшая примерно на 30 % высоту криволинейной части (малую полуось эллипса), можно коэффициент концентрации эквивалентных напряжений $K_t^{eq} = 2,28$ уменьшить до значения $K_t^{eq} = 1,85$. В результате изменения геометрии выреза максимальное местное напряжение уменьшается в этом варианте до значения $S_{\max}^{eq} = 467$ МПа, а параметр масштаба распределения напряжений становится равным $a_{eq} = S_{\max}^{eq} / (\ln N^*)^{1/k} \approx 32,80$ МПа.

Для расчета ресурса (в форме оценки накопленного повреждения) воспользуемся рассмотренной выше процедурой. Число ступеней эк-

вивалентного блока также примем равным 7 с «шагом» 60 МПа в диапазоне 47–467 МПа, причем в пределах первого шага (47–107 МПа) следует использовать параметры $C_2 = 1,399 \cdot 10^{17}$, $m_2 = 5$.

В пределах остальных ступеней блока (107–467 МПа) $C_1 = 1,309 \cdot 10^{15}$, $m_1 = 4$.

Результаты расчетов характеристик эквивалентного блока приведены в табл. 4.

По данным табл. 4 рассчитывается в блочной форме повреждение. В начале за измеритель масштаба напряжений принимается максимальное эквивалентное напряжение $S_{0,eq} = 432,7$ МПа. Затем рассчитывается суммарное повреждение

$$D = \frac{N^* S_{0,eq}^m}{C} \sum_i p_i \bar{S}_{i,eq}^m = 0,578.$$

Для сопоставления рассчитаем накопленное повреждение по зависимости, в которой используется непрерывное распределение напряжений, с учетом двух участков кривой усталости (при $S_{\max} = 467,0$ МПа, $S_0 = 107$ и $S_{\min} = 47$ МПа):

$$D = (N^* k / a_s^k) \times \\ \times \left(C_1^{-1} \int_{S_0}^{S_{\max}} S^{m_1+k-1} \exp(-(S/a_s)^k) dS + \right. \\ \left. + C_2^{-1} \int_{S_{\min}}^{S_0} S^{m_2+k-1} \exp(-(S/a_s)^k) dS \right) = 0,581.$$

Как и в предыдущем расчете, замена непрерывного распределения блочной схемой, состоящей из 7 ступеней, привела к вполне точной оценке повреждения.

Таблица 4

Расчет параметров блока нагружения

S класс	n_i	p_i	d_i	S_{eq}
47–107	$9,452 \cdot 10^6$	0,201	0,157	74,70
107–167	$1,156 \cdot 10^6$	0,025	0,251	129,8
167–227	$1,267 \cdot 10^5$	$2,695 \cdot 10^{-3}$	0,122	188,4
227–287	$1,295 \cdot 10^4$	$2,756 \cdot 10^{-4}$	0,037	247,3
287–47	$1,258 \cdot 10^3$	$2,677 \cdot 10^{-5}$	0,008576	307,4
347–407	117	$2,496 \cdot 10^{-6}$	0,001626	367,2
407–467	10	$2,249 \cdot 10^{-7}$	0,0002678	432,7

Принципиально важно, что в результате изменения геометрии нижней части выреза в стенке надстройки ресурс конструкции может быть обеспечен с запасом.

Оценка ресурса узла с помощью деформационного метода

Выше отмечено, что преобразование непрерывной функции распределения напряжений в эквивалентную по усталостному повреждению блочную схему, гистограмму, может потребоваться при оценках ресурса с помощью деформационного метода. В частности, это необходимо, когда местные упругопластические деформации в циклах нагружения рассчитываются с помощью методики, основанной на применении формулы Нейбера [8] или с помощью МКЭ. При этом использовать зависимость вида (12) затруднительно, так как принятие деформации в качестве переменной потребовало бы определять долговременное распределение локальных деформаций нелинейным преобразованием распределения номинальных напряжений.

Выполним оценки ресурса вариантов узла с помощью деформационного метода (Strain-Life). В расчете примем, что сварное соединение пластины обшивки надстройки и фланца, благодаря тщательной механической обработке и контролю, а также «поток» внутренних усилий вдоль соединения, имеет сопротивление примерно такое, как и «основной» металл [3]. Предел усталости стали (типа 10ХСНД) соответственно принят равным $\sigma_{-1} \approx 140$ МПа.

Критерий усталости (зависимость долговечности от размаха упругопластической деформации)

принят в упрощенной форме с поправками для учета эффектов микропластической деформации и нерегулярного характера нагружения [10]:

$$\Delta \varepsilon = C N^{-\alpha} + 2\delta \sigma_{-1} K_t / E K_f. \quad (13)$$

Соответственно долговечность при циклическом нагружении равна

$$N(\Delta \varepsilon) = (C E / \sigma_{-1})^{1/\alpha} (E \Delta \varepsilon / \sigma_{-1} - 2\delta K_t / K_f)^{-1/\alpha}. \quad (14)$$

Параметры критерия (13): $C = 0,400$, $\alpha = 0,653$ [10]; δ — эмпирическая поправка к пределу усталости, отражающая роль нерегулярного нагружения; согласно [10 и др.] $\delta = 0,55–0,8$; в расчете принято $\delta = 0,6$; K_t — теоретический коэффициент концентрации напряжений; K_f — эффективный коэффициент концентрации.

Последний можно ориентировочно оценить по эмпирической формуле Петерсона [9]: $K_f = 1 + (K_t - 1) / (1 + g / r)$, где r — радиус скругления у концентратора; g — «структурный параметр», примерно отвечающий углублению начальной трещины усталости. Согласно Петерсону, этот параметр примерно равен $g = 0,38(350 / \sigma_b)^{1,16}$, где $\sigma_b = 630$ МПа — предел прочности стали. Поскольку в нашем примере «поток» напряжений направлен вдоль соединения, пологого скругления кромки стенки надстройки, эффективный коэффициент концентрации мало отличается от теоретического. Поэтому примем $K_f = 1 + (K_t - 1) / 1,01$.

Местные упругопластические деформации $\Delta \varepsilon$ в каждом из эквивалентных циклических

режимов нагружения определим с помощью формулы Нейбера [8]:

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon = (K_t\Delta\sigma_{eq}^{nom})^2 / E, \quad (15)$$

где $\Delta\sigma$ и $\Delta\varepsilon$ — размахи напряжения и деформации в области концентрации напряжений при упругопластическом деформировании материала; $\Delta\sigma_{eq}^{nom}$ — номинальное напряжение в каждой из «ступеней» эквивалентной гистограммы, рассчитанное, как и в предыдущем разделе; E — модуль упругости материала.

Для определения $\Delta\varepsilon$ с помощью (15) воспользуемся экспериментально определенной обобщенной циклической кривой для рассматриваемой стали [10]; фрагмент этой кривой описывают следующие данные:

Деформация, $\Delta\varepsilon$	Размах напряжения, МПа
0,0005	105,0
0,0010	210,0
0,0015	315,0
0,0020	415,7
0,0025	485,3
0,0030	535,7
0,0035	585,0
0,0040	631,0
0,0045	668,6
0,0050	702,8
0,0055	730,7
0,0060	756,4
0,0065	778,9
0,0070	797,3
0,0075	816,4

По этим данным соответственно значениям размаха деформации рассчитывается произведение $\Delta\sigma\Delta\varepsilon$, подбирается подходящее значение правой части (15) и определяется искомое значение $\Delta\varepsilon$. Заметим, что произведения $K_t\Delta\sigma_{eq}^{nom}$ в формуле (15), определяющие «упругие» максимальные местные напряжения, можно заменить величинами S_{eq} , приведенными в табл. 4. Суммирование повреждений выполняется в стандартной форме с учетом критерия (14):

$$D = \sum_i n_i / N_i = N^* (\sigma_{-1} / CE)^{1/\alpha} \times \sum_i p_i (E\Delta\varepsilon_i / \sigma_{-1} - 2\delta K_t / K_f)^{1/\alpha}. \quad (16)$$

Результаты расчета для вариантов формы нижней части выреза в стенке надстройки приведены в табл. 5.

Как видим, расчет по деформационному методу дает оценки повреждения (ресурса), близ-

Таблица 5

Оценки меры повреждения для узла конструкции (изгиба корпуса в горизонтальной плоскости)

Вариант	$\Delta\sigma_{eq}^{max}$, МПа	D (мера повреждения)
2	581,64	1,396
3	538,31	1,011
4	466,94 (471,96)	0,300 (0,331)
5	510,19	0,651
6	464,62	0,287

кие к полученным стандартным методом с помощью S - N кривых, в частности для вариантов 4 и 6 геометрии детали. «Оптимистический» характер оценок деформационным методом можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами. С одной стороны, стандартный подход с применением S - N кривых предполагает упругую деформацию материала в области концентрации напряжений, что выражается в консервативной оценке меры повреждения. С другой стороны, при расчете деформационным методом принято сравнительно высокое сопротивление стали циклическому нагружению на основании вполне резонных допущений, заимствованных в правилах [3].

Выполненные в работе оценки долговечности узла конструкции судна в районе разреза стенки надстройки у скользящего соединения позволяют обоснованно выбрать целесообразный вариант конструктивного оформления согласно требованиям к ресурсу.

Предложенная методика, позволяющая приводить долговременное распределение напряжений к блочной схеме эквивалентных последовательностей циклического нагружения (что требуют правила расчета усталости сварных конструкций, в частности судов и морских сооружений) обеспечивает высокую точность оценок ресурса. При этом оказывается возможным существенно сократить число эквивалентных циклических последовательностей по сравнению с тем, как требуют правила (см. например, [3–4]).

Вообще, замена непрерывного долговременного распределения напряжений эквивалентной

блочной формой, состоящей из последовательностей циклического нагружения, в расчетах усталости с применением в качестве критерия разрушения $S-N$ кривых не нужна.

Такая замена может потребоваться при расчетах усталости в формате «Strain-Life», по деформационному методу, когда затруднительно характеризовать непрерывной функцией напряжений упругопластические деформации в области кон-

центрации напряжений. Такой же прием необходим в соответствии с современными правилами при оценках остаточного ресурса конструкций с обнаруженными трещинами усталости.

Авторы выражают признательность А.В. Ридигеру за помощь в разработке конечно-элементных расчетных моделей конструкции надстройки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-08-00943а

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Болотин, В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1984.
2. **Deitz, D.** How did the Titanic sink? [Текст] / D. Deitz. — «Mechanical Engineering». — ASME, 1998
3. DNV Fatigue Assessment of Ship Structures [Текст] / Classification Notes № 30.7. Det Norske Veritas. — Hovik. — Norway, 2010.
4. DNV Fatigue Assessment of Offshore Steel Structures [Текст] / Recommended Practice (RP-C203). — Det Norske Veritas. — Hovik. — Norway, 2006.
5. **Hobbacher, A.** Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components [Текст] / A. Hobbacher. — Int. Institute of Welding. — IIW-Doc. XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07. — Cambridge: Abington, 2007
6. **Короткин, Я.И.** Волновые нагрузки корпуса судна [Текст] / Я.И. Короткин, О.Н. Рабинович, Д.М. Ростовцев. — Л.: Судостроение, 1987.
7. **Mansour, A.** Assessment of Reliability of Existing Ship Structures [Текст] / A. Mansour, P. Wirsching [et al.]. — SSC-398, Ship Structure Committee. — Washington, USA, 1997
8. **Neuber, H.** Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Non-Linear Stress-Strain Law [Текст] / H. Neuber. — Trans. ASME, Journal of Appl. Mech. — 1961. Vol. 28.
9. **Peterson, R.E.** Stress Concentration Factors [Текст] / R.E. Peterson. — A Handbook. J. Wiley & Sons, Hoboken. — N J, USA, 1989.
10. **Petinov, S.V.** Fatigue Analysis of Ship Structures [Текст] / S.V. Petinov. — Backbone Publishing Co., Fair Lawn. — N J, USA, 2003.
11. **Сиверс, Н.Л.** Проектирование судовых надстроек [Текст] / Н.Л. Сиверс. — Л.: Судостроение, 1966.
12. **Sielski, R.A.** Aluminum Marine Structure Design and Fabrication Guide [Текст] / R.A. Sielski. — USCG Project 1448. — Washington, USA, 2007.

УДК 655.523

В.И. Маслов, М.И. Седлер

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ

Важным аспектом издательской деятельности — привлечение инвесторов, повышение привлекательности издательств научных журналов для авторов и рецензентов.

Для повышения качества редакционно-издательского процесса создается автоматизированная система с онлайн-интерфейсом, обеспечивающая управление процессами регистрации авторов, рецензентов, взаимодействия авторов с техническим секретарем редакции и членов редколлегии с рецензентами через технического секретаря в про-

цессе рецензирования. В состав системы входит база данных, в таблицах которой хранятся сведения об авторах, рецензентах, статьях, и программные модули для автоматизации следующих процессов:

регистрации и последующей авторизации на сервере издательства авторов и рецензентов;

отправки на сервер файлов, сопровождающих редакционный процесс (тексты статей, рецензии, ответы авторов рецензентам и т. д.);

просмотра авторами статусов статей в процессе их подготовки к публикации;

взаимодействия технического секретаря с авторами, членами редколлегии и рецензентами в процессе подготовки статей к публикации; учета присланных материалов;

сбора, обработки и предоставления наукометрической статистики.

В процессе исследования были изучены сайты научных журналов, имеющих высокий импакт-фактор, на предмет наличия автоматизированной системы регистрации авторов и подготовки статей к публикации. Было установлено, что российские и иностранные журналы используют в процессе подготовки статей к публикации автоматизированные системы управления, разработчиками которых являются иностранные компании — это системы AllenTrack™, Bench>Press™, EdiKitSM, ESPERE, Manuscript Central™, Rapid Review™, Sciforum.net, GNU EPrints и др.

Так, например, российский журнал «Успехи химии» использует автоматизированную систему Manuscript Processing System, обеспечивающую авторам возможность выслать статью в электронном виде и проследить текущее состояние статей, в публикации которых они принимают участие.

Институт физики «The American Institute of Physics» (AIP) (США) — одно из крупнейших издательств литературы в области физических исследований. Он организует выпуск более 15 научных журналов. Сайт AIP (<http://www.aip.org>) достаточно сложен: имеет разветвленную структуру с большим количеством внешних ссылок, с постоянным обновлением новостей, с использованием файлов мультимедиа. Для каждого журнала созданы отдельные электронные страницы, перейдя на которые пользователь может ознакомиться с правилами публикаций, зарегистрироваться, чтобы отправить свою работу, воспользоваться поиском, просмотреть архив. Основными достоинствами иностранного ресурса являются формирование списка самых популярных статей за месяц, возможность отображения рисунков, таблиц, мультимедиа, а также расширенный поиск статей и дополнительной информации о журнале и редакционной коллегии. На сайте Американского института физики можно проверить, готова ли работа к публикации. Для этого необходимо воспользоваться ресурсом проверки статуса готовности рукописи. Автору предлагается ввести имя и персональный код.

Институт физики «The Institute of Physics» (Лондон, Великобритания) — научная организация, объединяющая около 40000 физиков. База данных журнала содержит более 350000 статей. Деятельность института направлена на продвижение исследований в области физики. Сайт Института физики (<http://www.iop.org>) содержит множество разнообразных постоянно обновляющихся страниц: новости, основные события в области физики, информация для студентов, членов организаций, авторов статей. По внешней ссылке возможен переход на сайт издательства института.

К основным достоинствам сайта можно отнести:

эффективную систему быстрого поиска по статьям, по дате, автору, журналу;

функцию My IOPscience, предоставляющую дополнительные возможности для зарегистрированных пользователей (управление списками своих статей, сохранение истории и настройка поиска, отправка запросов на оповещения, уведомления о появлении новых статей, просмотр статей, загружавшихся пользователем за последние 3 месяца и др.);

наличие сервисов для авторов и рецензентов. Авторам и рецензентам предлагается пройти регистрацию на сайте, после которой создастся страница «Личный кабинет», через которую реализуется связь с редакцией (отправка статей, их изменение и дополнение, отслеживание процесса подготовки к публикации);

гарантию безопасности и конфиденциальности пользователям.

Определяющим фактором в принятии решения о необходимости разработки автоматизированной системы стало отсутствие подобных сервисов у большинства российских научных журналов. Автоматизированные системы управления процессами подготовки статей к публикации, разработанные иностранными компаниями, — дорогостоящие, требующие адаптации к существующим редакционным процессам.

Текст неопубликованной статьи, личные данные авторов и предполагаемых рецензентов — конфиденциальная информация. При разработке автоматизированной системы должны быть выполнены требования пункта 4 статьи 16 Федерального закона об информации, информационных технологиях и о защите информации от 8 июля 2006 года. Согласно положениям закона «обладатель информации (оператор информации

онной системы) в случаях, установленных законодательством Российской Федерации, обязан обеспечить предотвращение несанкционированного доступа и постоянный контроль уровня защищенности информации».

Автоматизация редакционной деятельности позволит эффективнее управлять процессом подготовки материалов к публикации. Создание и внедрение автоматизированной системы обеспечит повышение качества управления процессами подготовки научных статей, внесет существенный вклад в развитие тематических журналов, позволит систематизировать накопленный материал.

На первом этапе разработки были изучены существующие процессы редакционно-издательской деятельности и создана блок-схема работы автоматизированной системы, представленная на рис. 1. Результаты исследования опубликованы в сборнике материалов научно-практической конференции XL недели науки СПбГПУ.

На втором этапе были рассмотрены внутриредакционные процессы подготовки научных статей к публикации. Их алгоритм представлен на рис. 2.

Далее было осуществлено функциональное моделирование IDEF(0) процессов редакционной деятельности с использованием средства Vrwip.

Процесс регистрации автора

Работа автоматизированной системы начинается с регистрации автора. Если автор хочет отправить статью в журнал, он регистрируется в системе, заполняет форму, в которой указывает свои персональные данные, логин и пароль. Вся информация из текстовых полей формы регистрации автоматически попадает в соответствующие поля новой записи таблицы базы данных, номер которой присваивается автору в качестве ID. После просмотра, автоматической проверки и (при необходимости) уточнения введенных данных техническим секретарем редакции он либо регистрирует автора, либо отказывает ему в регистрации. Для авторов предусмотрены функции просмотра истории статусов отправленных статей и изменения пароля доступа к своей странице.

IDEF(0)-модель процесса регистрации автора представлена на рис. 3.

Процесс авторизации пользователя и регистрации статьи

Следующий этап — авторизация пользователя с помощью кода аутентификации, загрузка статьи на сервер и ее регистрация. Автор вводит логин и пароль, после чего отправляется запрос на про-



Рис. 1. Блок-схема разрабатываемой системы

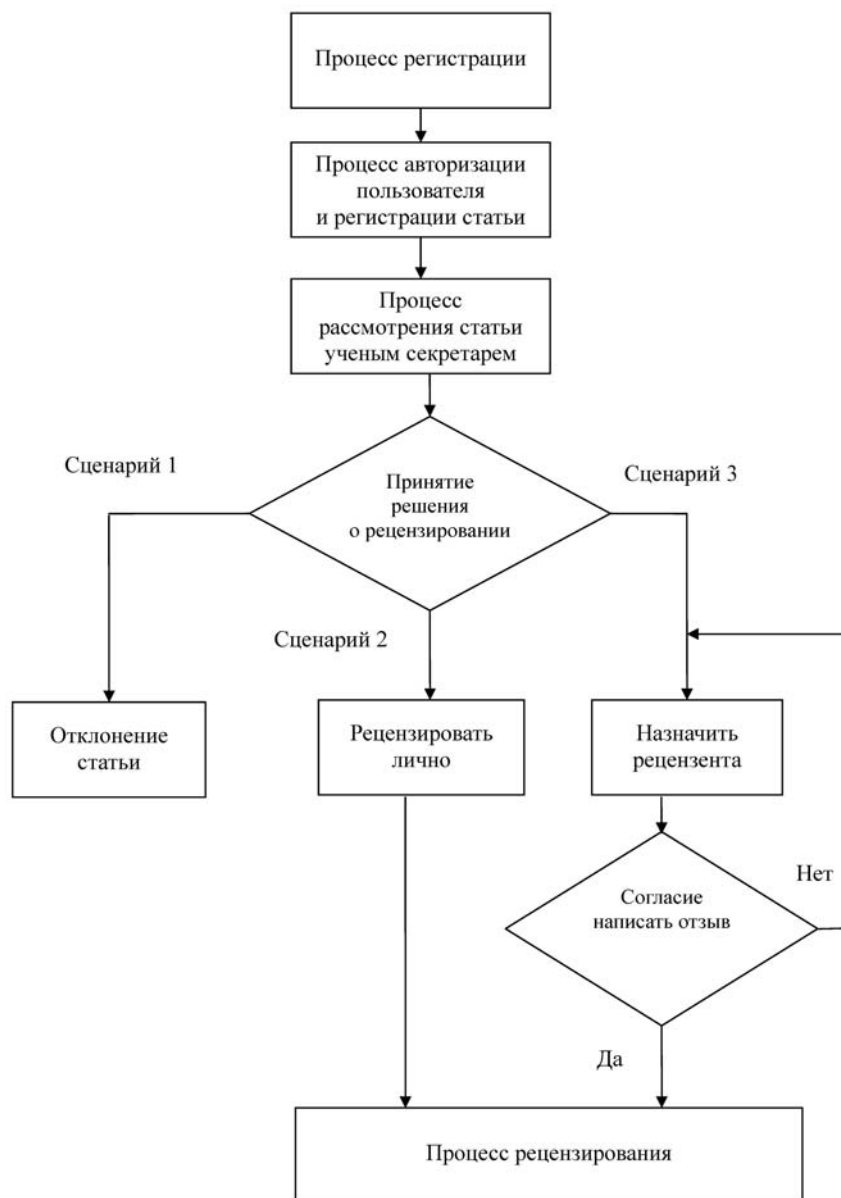


Рис. 2. Внутриредакционные процессы подготовки научных статей к публикации

верку данных. Если ошибок нет, система разрешает автору доступ к личному кабинету, в котором он может загрузить файл со статьей на сервер, указав в специальной форме ее тему, тип и др. При этом поступившая информация и статус «новая статья» записываются в таблицу базы данных; статье автоматически присваивается ID-номер.

Технический секретарь заходит в систему в качестве администратора. Он имеет расширенные права доступа к базе данных: возможность просмотра информации обо всех пользователях, скачивания присланных документов,

отправки писем авторам, рецензентам, ученым секретарям. Если автор загрузил файл со статьей на сервер, у технического секретаря появляется соответствующее уведомление. Далее технический секретарь запрашивает в редакции номер для статьи. При этом на сайте отображается форма «Присвоить номер». Технический секретарь вводит полученный номер в специальное поле и нажимает кнопку «Применить». После этого технический секретарь отправляет статью ученому секретарю и пишет письмо-уведомление автору о том, что статья получена и зарегистрирована.

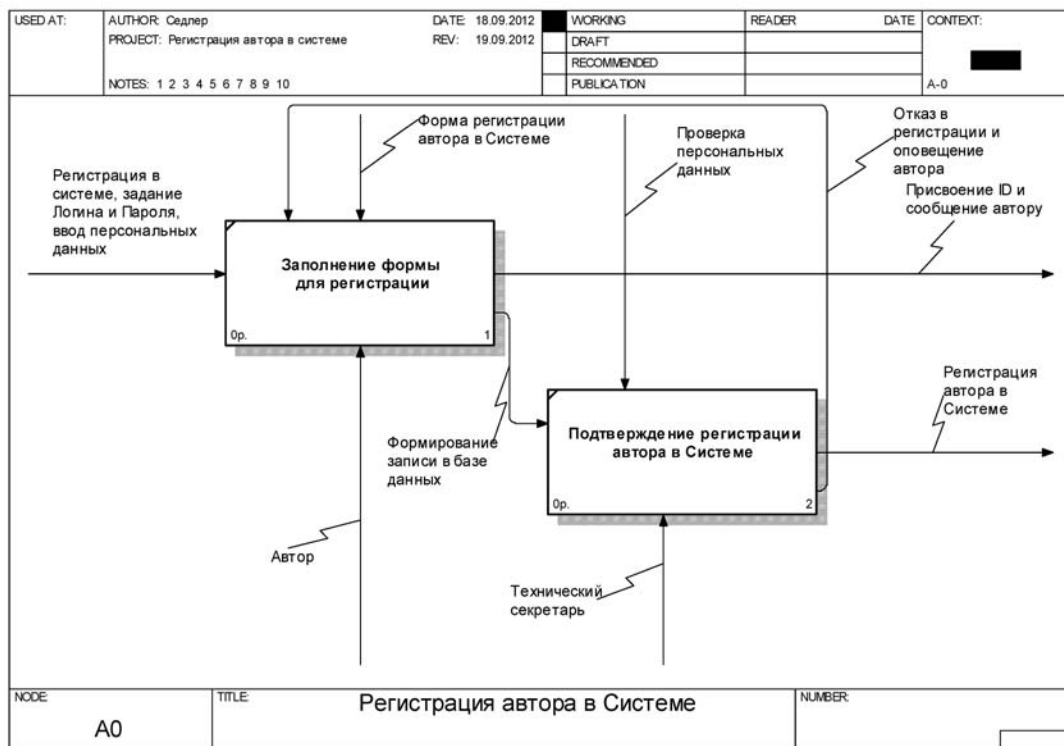


Рис. 3. IDEF(0)-модель регистрации автора

стрирована. Текст письма-уведомления автоматически генерируется на сайте с возможностью корректировки техническим секретарем. После корректировки письма-уведомления техническим секретарем оно автоматически пересылается автору, а статус статьи меняется с «Новая статья» на «Статья зарегистрирована».

IDEF(0)-модель процесса авторизации пользователя и регистрации статьи представлена на рис. 4.

Процесс рассмотрения статьи ученым секретарем

Ученый секретарь получает письмо-уведомление о том, что поступила новая статья. После ознакомления ученого секретаря с текстом статьи возможны следующие варианты развития событий:

Сценарий 1: Отклонение статьи ученым секретарем. Если статья не может быть принята (не соответствует требованиям журнала), ученый секретарь пишет в появившемся поле ввода техническому секретарю, что статью надо отклонить с указанием причины отказа в публикации.

Технический секретарь получает это уведомление, пишет письмо автору о том, что статья не

принята; статус статьи автоматически получает новое название — «Отклонено». Работа со статьей закончена.

IDEF(0)-модель процесса отклонения статьи ученым секретарем представлена на рис. 5.

Сценарий 2. Принятие решения ученым секретарем о рецензировании статьи. Если ученый секретарь решает, что редактировать статью он будет лично или статью можно сразу опубликовать, он отправляет техническому секретарю одно из указаний: «Статью принять» и связаться с автором для заключения договора об авторских правах либо «Рецензировать лично».

Если технический секретарь получает от ученого секретаря указание «Статью принять», он уведомляет об этом автора; статус статьи меняется на «Принято». У автора появляется сообщение о необходимости заключения договора об авторских правах. Файл (файлы) со статьей отправляется научному редактору. Процесс подготовки статьи к публикации завершается.

В случае получения техническим секретарем от ученого секретаря указания «Рецензировать лично» начинается процесс рецензирования; статус статьи автоматически получает новое название — «На рецензии».

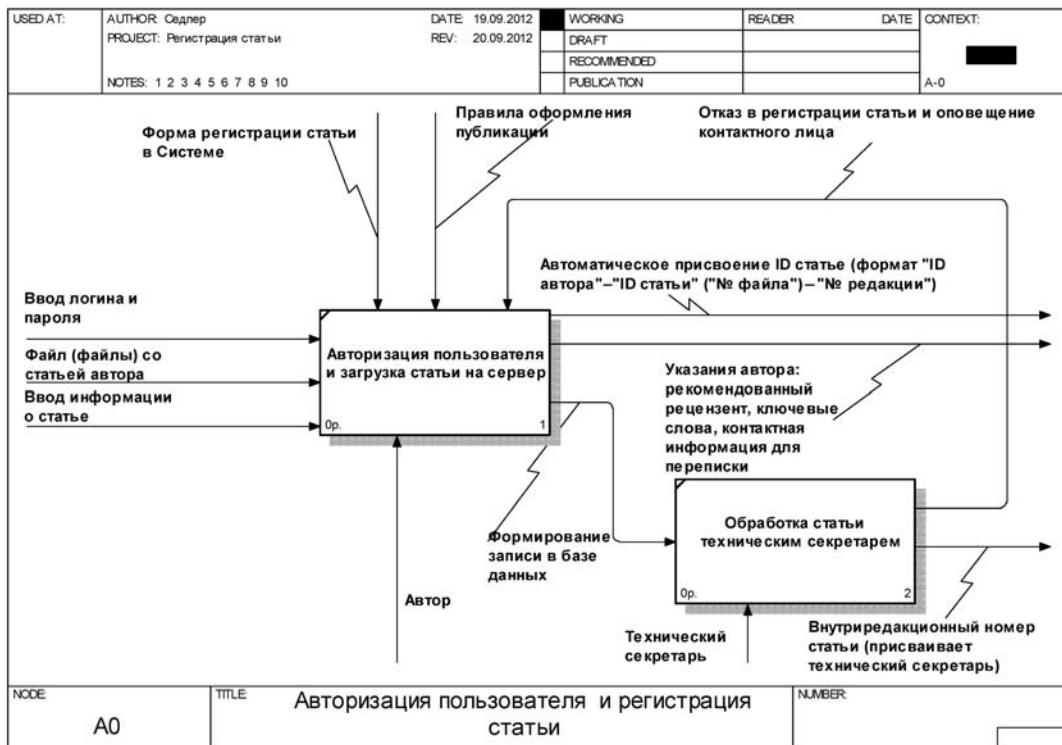


Рис. 4. IDEF(0)-модель процесса авторизации пользователя и регистрации статьи

В процессе рецензирования ученый секретарь заполняет анкету и пишет замечания. Технический секретарь получает анкету и замечания, выполняет поступающие указания и при необходимости связывается с автором.

IDEF(0)-модель процесса рецензирования статьи ученым секретарем представлена на рис. 6.

Сценарий 3. Ученый секретарь назначает рецензента из списка кандидатов. Если ученый секретарь решает назначить рецензента, он осуществляет поиск кандидата. Для поиска намеченного кандидата ученый секретарь вводит первые буквы его фамилии в специальное поле ввода. Система осуществляет автоматический поиск выбранного кандидата в списке предполагаемых рецензентов. После осуществления поиска ученый секретарь пересылает сообщение с фамилией предполагаемого рецензента техническому секретарю.

Процесс назначение рецензента

Получив указание от ученого секретаря, технический секретарь открывает предполагаемому рецензенту доступ к файлу (файлам) со статьей. При этом статус статьи автоматически становится «На рецензии»; в личном кабинете автора появляется соответствующая запись.

При входе в систему предполагаемый рецензент также вводит логин и пароль, но его персональная страница «Личный кабинет» имеет другое содержание. После ознакомления с материалом статьи предполагаемый рецензент должен принять решение о согласии на написание отзыва. Для этого в личном кабинете предполагаемого рецензента предусмотрены две кнопки выбора.

Если предполагаемый рецензент соглашается написать отзыв на статью, он нажимает на кнопку «Принять»; ему открывается доступ к форме отправки замечаний и файла с рецензией техническому секретарю.

В случае, если предполагаемый рецензент отказывается написать отзыв на статью, он нажимает на кнопку «Отклонить», переходит на новую страницу, на которой автоматически генерируется сообщение для технического секретаря с отказом от рецензирования. После нажатия на кнопку «Отправить» статус статьи меняется; предполагаемый рецензент больше не имеет доступа к статье. Техническому секретарю приходит сообщение от предполагаемого рецензента с отказом от рецензирования. Технический секретарь уведомляет ученого секретаря об отказе выбран-

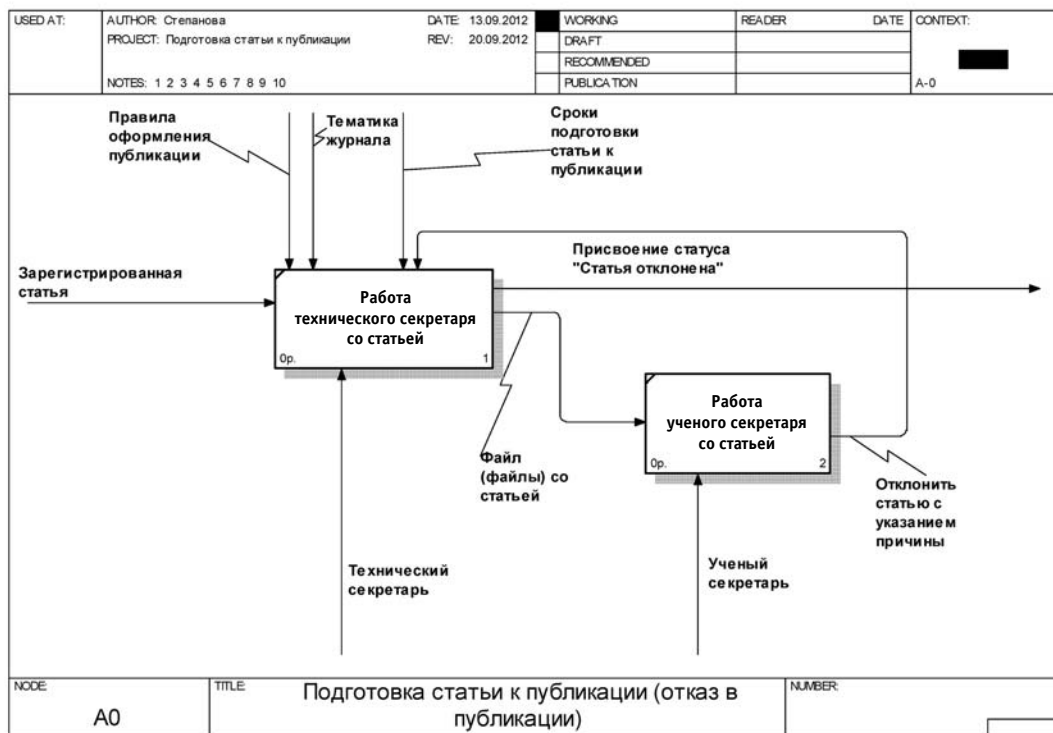


Рис. 5. IDEF(0)-модель процесса отклонения статьи ученым секретарем

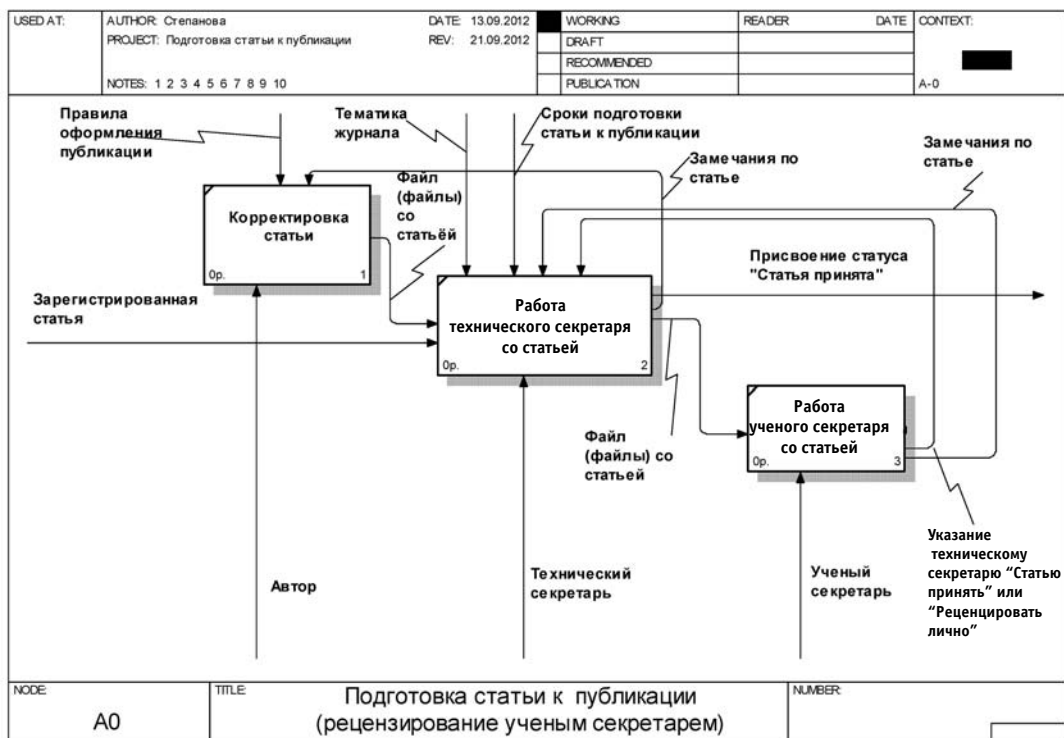


Рис. 6. IDEF(0)-модель процесса рецензирования статьи ученым секретарем

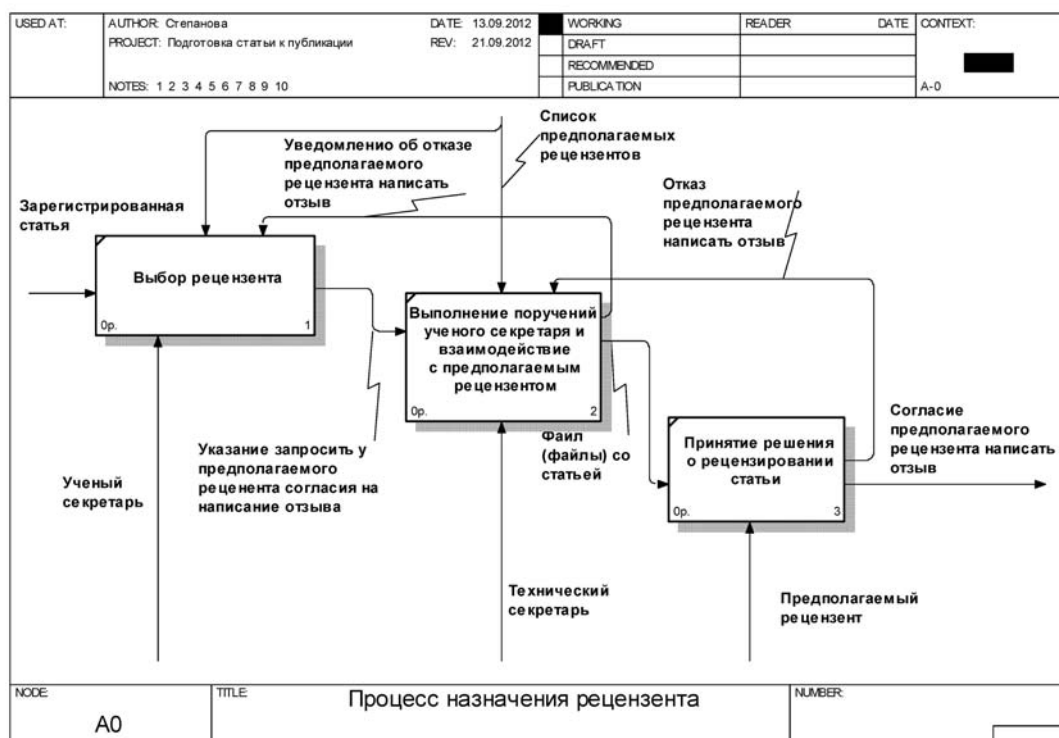


Рис. 7. IDEF(0)-модель процесса назначения рецензента

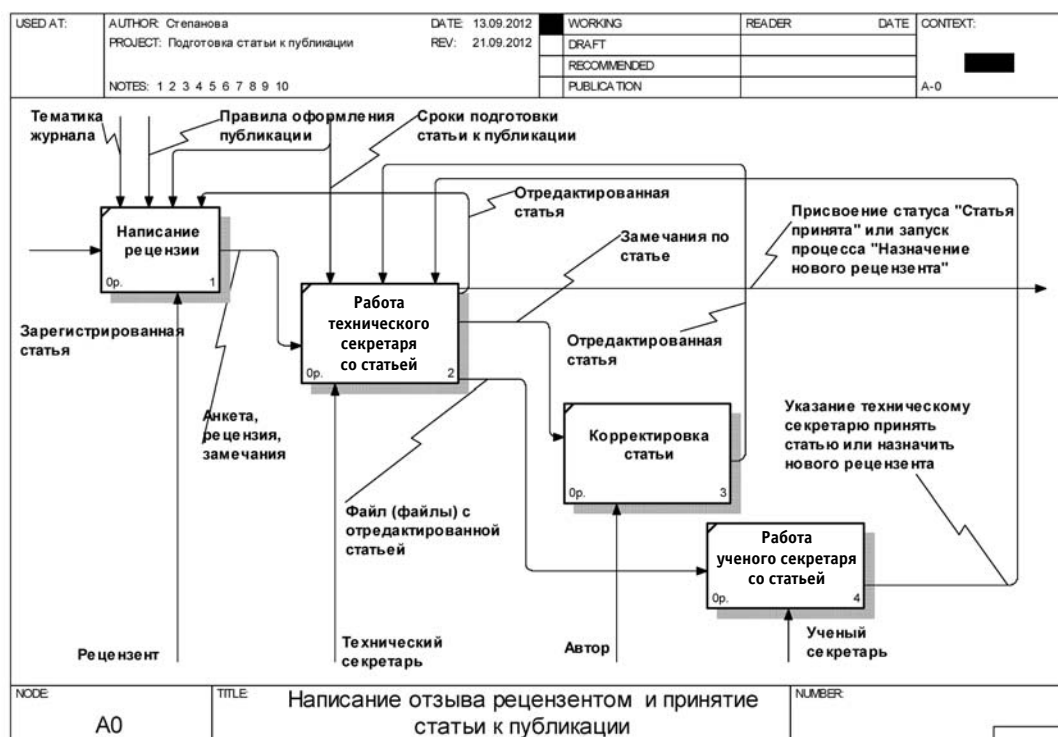


Рис. 8. IDEF(0)-модель процесса написания отзыва рецензентом и принятие статьи к публикации

ного кандидата рецензировать статью. Процесс назначения рецензента повторяется.

IDEF(0)-модель процесса назначения рецензента представлена на рис. 7.

Процесс рецензирования статьи

После согласия предполагаемого рецензента написать отзыв, ему необходимо заполнить анкету, написать замечания, рецензию на статью и отправить эти материалы техническому секретарю.

Технический секретарь пересылает полученные замечания автору.

Автор вносит исправления и отправляет файл с новой редакцией статьи техническому секретарю.

Технический секретарь пересылает отредактированную статью ученому секретарю и рецензенту. Ученый секретарь знакомится с материалом отредактированной статьи, с замечаниями рецензента, решает принять статью к публикации, о чем уведомляет технического секретаря, или решает назначить нового рецензента. В этом случае осуществляется процесс назначения рецензента.

В случае, если технический секретарь получает от ученого секретаря указание «Статью принять», он уведомляет об этом автора; статус статьи меняется на «Принято». У автора появляется сообщение о необходимости заключения договора об авторских правах. Файл (файлы) со статьей отправляется научному редактору. Процесс подготовки статьи к публикации завершается.

IDEF(0)-модель процесса написания отзыва рецензентом и принятие статьи к публикации представлена на рис. 8.

Для создания автоматизированной системы управления процессами регистрации авторов и подготовки статей к публикации используется MySQL — модифицированная система управления базами данных, имеющая возможность ра-

боты с таблицами типа MyISAM. Управлять базой данных и получать из нее необходимую информацию возможно, используя on-line клиент. Доступ к системе обработки запросов реализуется посредством PHP. С его помощью возможна не только обработка файлов, загружаемых на сервер, но и автоматическое извлечение POST- и GET-параметров, взаимодействие с большим количеством различных систем управления базами данных, автоматизированная отправка HTTP-заголовков, работа с HTTP-авторизацией, работа с cookies и сессиями. Для придания разработанным web-страницам интерактивности используется JavaScript.

Участникам процесса и загруженным файлам статей в таблицах базы данных автоматически присваиваются идентификационные номера, на основе которых происходит построение связей, необходимых для формирования запросов. В зависимости от действий участников процесса статусы меняются автоматически.

В настоящее время осуществляется разработка алгоритмов и написание программ для реализации вышеперечисленных процессов работы автоматизированной системы. Для этого создан интернет-сайт (<http://uktiedit.gixx.ru/>). На сегодняшний день полностью реализованы процессы регистрации автора, авторизации пользователя и регистрации статьи.

Внедрение приложения существенно упрощит работу технического секретаря. В редакции меньше времени будет затрачиваться на организационные проблемы; процесс обработки статей ускорится, повысится качество их обработки, снизится риск утери материалов, возрастет привлекательность журнала. Авторы активнее станут присылать новые статьи, так как будут знать, что в любой момент смогут отслеживать процесс их подготовки к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Международный стандарт ИСО 9001.** Системы менеджмента качества. Требования [Текст]. — 3-е изд. — 2000—12—15. ISO— 2000.
2. **Международный стандарт ИСО 9004.** Системы менеджмента качества. Руководство по улучшению деятельности [Текст]. — 2-е изд. — ISO— 2000.
3. **Марка, Д.** Методология структурного анализа и проектирования [Текст] / Д. Марка, К. Мак-Гоуэн; пер. с англ. — М.: 1993. — 240 с. — ISBN 5—7395—0007—9.
4. **P50.1.028—2001.** Методология функционального

- моделирования [Текст]. — М.: Госстандарт России, 2000. — [Электр. ресурс] www.cals.ru.
5. **Федеральный закон** об информации, информационных технологиях и о защите информации от 8 июля 2006 года.
6. **Степанова, В.А.** Создание автоматизированной системы управления процессами регистрации авторов и подготовки статей к публикации [Текст] / В.А. Степанова, М.И. Седлер, Н.А. Черкасова // XL недели науки СПбГПУ: матер. междунар. научно-практ. конф. Ч. IV. — СПб.: Изд-во Потитех. ун-та, 2011. — С. 258.

НОВЫЙ ФАКТОР ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА: ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ

Ответственный подход в современной фармацевтической индустрии предполагает многосторонние испытания лекарств, принимаемых человеком или используемых в ветеринарии. Тщательно рассматриваются вопросы эффективности и безопасности действующих веществ и различных лекарственных форм, подробно отрабатываются схемы и способы применения, ведется постоянный мониторинг нежелательных побочных эффектов, возникающих у пациентов как при краткосрочном, так и длительном применении препаратов. Регламентируются промышленные выбросы фармацевтических производств, совершенствуются соответствующие международные нормы и национальные законодательства. В целом кажется, что ситуация, связанная с безопасностью деятельности фармацевтического сектора индустрии движется к достижимому идеалу. Вместе с тем до 2002 года игнорировался тот факт, что уже произведенные лекарственные средства неизбежно попадают в окружающую среду, где оказывают биологическое действие на биоту и возвращаются к человеку с пищей, воздухом или водой.

Лекарственные вещества — загрязнители среды

В результате исследований, проведенных Национальной геологической службой США в период 1999–2000 годов, установлено, что более 80 % проб воды (139 проб поверхностных вод, питьевых источников и пр. из 30 штатов США) содержат детектируемые уровни биологически активных веществ различной природы, включая различные фармакологические

агенты, в частности, антибиотики синтетические гормоны и пр. [1]. При этом 50 % всех проб содержало более 7, а 34 % — более 10 таких веществ одновременно. В одной из проб питьевой воды были найдены следовые количества 68 лекарств. Среди проб питьевой воды из муниципальных источников или бутилированной в 25 % случаев содержалось более одного лекарственного вещества. Данные 2010 года показывают, что среди 158 веществ-загрязнителей реки Огайо насчитывается 118 лекарств.

Данные, обобщающие встречаемость лекарственных контаминантов различных терапевтических классов в окружающей среде по результатам анализа 134 статей, опубликованных за период между 1997 и 2010 годом [2], следующие:

<i>Тип лекарственного вещества</i>	<i>Относительная встречаемость</i>
Нестероидные противовоспалительные препараты.....	16
Антибиотики	15
Статины	12
Половые гормоны	9
Противоэпилептические средства.....	8
Бета-блокаторы	8
Анксиолитики	4
Антидепрессанты	4
Антигипертензивные средства	4
Антинеопластические	4
Антациды.....	3
Рентгенконтрастные вещества	3
2-симпатомиметики	3
Ветеринарные медикаменты	3
Антидиабетические орального применения	3
Антипсихотики.....	1

Источники загрязнения лекарственными веществами

Можно выделить два основных и приблизительно равнозначных источника попадания лекарственных средств в окружающую среду: лекарства неиспользованные и использованные по назначению.

По данным экспертных оценок представителей фармацевтического сектора различных стран практически около 35–50 % лекарственных средств оказываются ненужными из-за избыточного объема продаваемых упаковок, невостребованности, истечения сроков хранения, нарушений норм производства, складирования и перевозки или иных причин. Учитывая крупнотоннажный объем производства, это означает, что, например, в масштабах США населением ежегодно выбрасывается или сливается в канализацию около 100 тысяч тонн лекарственных средств. Кроме того, по данным Национального общества фармацевтических ассоциаций еще около 125 тысяч тонн лекарственных средств выбрасывается или сливается в госпиталях и других медучреждениях США.

Однако даже при использовании лекарства по назначению его активная субстанция все равно оказывается во внешней среде. Попадая в человеческий организм, одна часть лекарственного вещества подвергается химическим превращениям, а получающиеся метаболиты часто теряют активность. С точки зрения фармакологии устойчивость к превращениям оказывается предпочтительной, так как обеспечивает нужные сроки хранения препарата, а главное, увеличивает долю молекул, попадающих в ткани-мишени. Оставшаяся часть препарата (обычно от 50 до 90 %) выделяется неизменной. Например, в случае антибиотиков исходная субстанция сохраняется на 90 %, а для кофеина только 10 % выделяется почками в неизменном виде. Если принять, что неизменными выделяется около 66 % использованных лекарственных доз, а используется порядка 60 % лекарств, то получается, что 40 % произведенных субстанций лекарств выделяются в окружающую среду в неизменном виде после использования.

Если разделять лекарственные средства и их активные ингредиенты — фармацевтические

субстанции, оказывается, что в городе с населением порядка трех миллионов человек выбрасывается около 1000 тонн неиспользованных лекарств, что соответствует примерно 150 условным тоннам содержащихся активных начал. Дополнительно сопоставимая с этой масса неизменных активных начал, выделяемых организмом человека после приема лекарств, может превосходить 150 условных тонн.

Главными факторами загрязнения являются неиспользуемые медикаменты, попадающие в систему канализации, стоки или испарения свалок, содержащих неутилизированные лекарства, невостребованные частными лицами и организациями. Далее можно рассматривать бытовые стоки населенных пунктов и клиник, содержащие лекарственные субстанции, применяемые населением и пациентами, загрязненные воды и ирригацию сельских хозяйств, использующих ветеринарные препараты.

В целом центральные риски лекарственного загрязнения окружающих сред определяются уровнями повторного кругооборота лекарственных начал в системе «человек — бытовые стоки и свалки — поверхностные водоемы — подземные воды — источники орошения для выращивания растительных продуктов, способных аккумулировать медикаменты — мясомолочные продукты, содержащие ветеринарные препараты и вещества, полученные с растительной пищей или загрязненной водой — питьевая вода — человек и далее».

Уровни загрязнения водной среды лекарственными веществами и предполагаемые уровни риска

К настоящему времени уровни обнаруживаемых лекарственных средств крайне низки и не могут оказывать негативного действия на человека. Действительно, допустимые уровни примесей нормированных органических веществ в питьевой воде чаще всего измеряются величинами от 1 до примерно 1000 мкг/л. Концентрации лекарственных веществ, обнаруживаемые в питьевой или бутилированной воде, лежат обычно в пределах 0,01–1,0 мкг/л, что уверенно обеспечивает стократный или даже тысячекратный запас безопасности. Уровни концентрации в поверхностных и грунтовых водах обычно ока-



зываются порядка нескольких мкг/л, что, как считается, не должно вызывать значительных проблем для безопасности человека.

Федеральные стандарты, регулирующие уровни медикаментозных примесей в воде, где-либо в мире отсутствуют. Соответствующий контроль наличия медикаментозных примесей и различных технологий очистки воды не ведется.

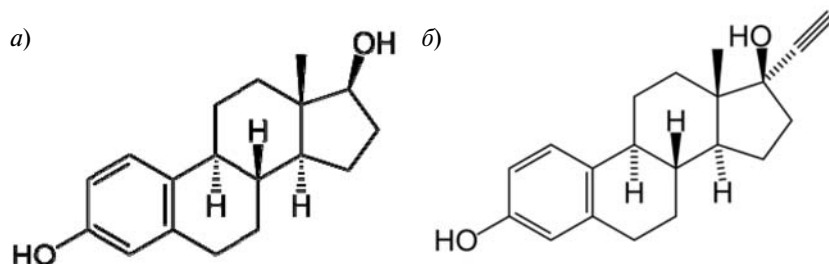
В то же время, органы здравоохранения и природоохранные службы развитых стран констатируют: несмотря на результаты текущих наблюдений, позволяющие предположить крайне незначительную вероятность того, что детектируемые низкие концентрации фармацевтических средств в питьевой воде представляют поддающийся оценке риск неблагоприятного воздействия на здоровье человека, существует разрыв в знаниях [3].

Во-первых, этот разрыв знаний определяется отсутствием данных, позволяющих реально оценивать риски, связанные с длительными воздействиями низких концентраций фармакологических средств на человека. Прежде всего, имеется в виду, что оценить длительное воздействие лекарств на состояние здоровья человека, к сожалению, все еще невозможно. Используемые в лабораторных опытах животные и организмы всегда имеют существенные отличия от человека. В большинстве выполняемых экспериментов исследуются действия разовых или краткосрочных, но не пожизненных курсов приема лекарств. Кроме того, при попытках проведения экспериментальных исследований действия лекарств возникают многочисленные вопросы корректности подготовки образцов, способов введения и форм испытываемых веществ, методов выявления токсикологической опасности. Эпидемиологический анализ заболеваемости, проводимый с целью установки долговременных факторов воздействия лекарств-загрязнителей окружающей среды, затруднен наличием множества иных химических, физических или социальных факторов, способных изменять благополучие человека.

Во-вторых, обсуждаемый разрыв знаний определяется тем, что комбинированное действие химических веществ еще остается одной из нерешенных проблем. Обычно в фармако-

логии или токсикологии изучают зависимость «доза — эффект» одного конкретного соединения. Когда число действующих веществ увеличивается, могут возникать как эффекты взаимного потенцирования веществ, так и их конкуренции, при этом зависимость «доза — эффект» изменяет характер. Известны случаи, когда одновременное применение только двух лекарств усиливало их активности до сотни раз. Такой эффект способен существенно снизить имеющийся резерв безопасности в случае сочетанных действий лекарственных примесей, обнаруживаемых в окружающей среде. Напомним, что в половине исследованных вод детектируется наличие сочетаний более чем 7 лекарственных средств в одной пробе. Предсказательные методы оценки комбинированного действия лекарств отсутствуют. Получение экспериментальных данных невозможно из-за бесконечной вариабельности концентраций и наименований лекарственных субстанций, меняющихся от времени и места пробы [4,5].

В-третьих, в отличие от случаев прямого действия на человека, имеется ряд сведений о неблагоприятном действии некоторых лекарств-примесей в воде на экологию обитателей водной среды. Например, нестероидное противовоспалительное средство диклофенак в концентрациях 0,5–1,0 мкг/л, т. е., сравнимых со встречающимися в ряде поверхностных водоемов, вызывало на 21–28 день испытаний цитологические изменения в почках, печени и жабрах форелевых рыб [5, 6]. Антибиотики выпускаются десятками тысяч тонн и особо активно используются в ветеринарии. Не разрушаются в течение длительного времени. Будучи токсичными для определенных видов бактерий, они препятствуют самоочищению водоемов и почв, а в низких концентрациях, встречающихся в водной среде, могут вызывать появление видов бактерий, устойчивых к антибиотикам, в том числе тех видов бактерий, которые могут вызывать заболевания человека. Половые гормоны и их синтетические аналоги часто используются для заместительной терапии, в качестве оральных контрацептивов и противоопухолевых средств. Типичная структура таких препаратов, в частности одного из наиболее активных син-



Химическая структура эстрадиола (а) и его синтетического аналога этинилэстрадиол (б) (этинилэстрадиол используется в гормональной терапии и является составной частью пероральных контрацептивов; препарат детектируется даже в условиях открытого океана)

тетических аналогов этинилэстрадиола, показана на рисунке. В питьевой воде наличие этинилэстрадиола обнаруживается на уровне десятых долей нг/л, в воде поверхностных водоемов его содержание достигает десятков нг/л [2]. Вещество химически стабильно, детектируется даже в открытом океане. Фактор биоаккумуляции препарата (отношение концентрации препарата в биоте к концентрации препарат в воде) достигает 1000000. Из-за своей высокой активности это вещество уже в низких дозах вызывает интенсивный биологический ответ. В концентрациях порядка 1 нг/л этинилэстрадиол влияет на репродуктивную функцию рыб. Считается, что его наличие в водах реки Потомак (район г. Вашингтон) определяет патологии фертильности, выявляемые у 80 % самцов окуней.

Экофармакология

Состав лекарственных веществ, обнаруживаемых в окружающей среде, зависит от региона, а их уровни — от времени года. Однако, оказывается, что система лекарственного обеспечения, решающая задачи создания, испытания, производства, хранения, распределения и применения лекарств, не располагает завершающим экологическим блоком, ориентированным на выявление и локализацию потенциальных рисков, связанных с загрязнением окружающей среды лекарственными субстанциями и утилизацией невостребованных лекарств.

В настоящее время в экофармакологии можно обсуждать следующие вопросы, отличающие ее от других направлений, например экотоксикологии:

во-первых, лекарственные субстанции заведомо малотоксичны, но (при наличии достаточной концентрации) всегда оказывают эффекты, изменяющие функционирование человеческого организма. Проблема лекарственного загрязнения среды для человека может быть переформулирована как проблема получения препаратов, которых нам не назначали. С другой стороны, очевидно, что лекарственные средства должны вмешиваться в деятельность функционально важных биомолекул. А между тем регуляторное действие находящихся в обороте фармакопейных средств на флору и фауну биосферы практически не изучалось;

во-вторых, это особенности перераспределения и аккумуляции лекарственных примесей в окружающей среде и пищевых цепочках биосферы. В отличие от обычных экотоксикантов, лекарства представляют специально созданную группу веществ, способных перераспределяться в ткани живого. Для биоты это означает возможность направленной концентрации этих веществ до уровней, близких к терапевтическим;

в-третьих, в тканях и органах живого интересными могут оказываться пути перераспределения и транспорта лекарственных веществ,



присутствующих в низких неисследованных концентрациях. Например, гидрофобные, а точнее, амфифильные субстанции лекарств после попадания в организм избирательно перераспределяются в гидрофобные компартменты, ассоциируются с различными фракциями клеточных мембран и диффундируют сквозь клеточные барьеры. Проникая в кровоток, они связываются с транспортными белками, распространяются по тканям живого. Далее вновь связываются с мембранами клеток, все более удаленных от места введения. В условиях терапевтической дозировки возникают явления насыщения, разворачивается множество альтернативных процессов. Для низких концентраций картина всасывания и перераспределения веществ должна отличаться в сторону большей однозначности;

в-четвертых, следует различать проблемы комбинированного действия обычных органических загрязнителей среды и лекарств. Попадающие в окружающую среду фармацевтические субстанции гораздо более однородны, нередко принадлежат к одной и той же терапевтической группе и чаще могут действовать на одну и ту же мишень, усиливая действие друг друга.

В целом, главные факторы потенциальных биологических рисков использования любых веществ — это: присутствие веществ в окружающей среде (воздух, пища, вода, почва, растения и пр.); способы поступления вещества в тот или иной организм (дыхательная система, желудочно-кишечный тракт, кожа, искусственное введение или элементы протезов); особенности перераспределения вещества между различными тканями организма; интенсивности взаимодействия привносимого вещества с функционально значимыми молекулярными компонентами тех тканей, в которые оно проникает.

При изучении лекарств как загрязнителей окружающей среды речь идет не об обычных органических веществах, а о химических соединениях, которые, с одной стороны, биологически неопасны, а с другой, специально созданы как агенты, способные особенно интенсивно всасываться в ткани живых систем и оказывать там выраженное биологическое действие. При этом фактическими источниками рисков для

человека и окружающей среды являются комбинации разных лекарственных средств, обладающие множественными видами терапевтического действия.

В целях анализа предсказуемости токсикологических рисков выделяют разные факторы, влияющие на степень их потенциальной опасности. С одной стороны, низкие концентрации лекарств, обнаруживаемых в окружающей среде, снижают возможности возникновения каких-либо биологических эффектов, а единственным исключением из этого правила оказываются только редкие, наиболее сильнодействующие фармакологические вещества. С другой стороны, можно ожидать, что в некоторых компонентах биоты может происходить существенное накопление лекарственных субстанций, что, напротив, должно означать избирательное перераспределение лекарств и их аккумуляцию в биофазе с последующей передачей веществ вверх по пищевым цепочкам «вода и человек», «растительная пища и человек», «мясомолочные продукты, рыба и человек» и пр., то есть цепочки «вода — растения — животные — человек» или непосредственные системы «вода — система водоподготовки — человек».

Одновременно констатируется наличие разрыва между имеющимися и необходимыми методами испытания биологической опасности сред, загрязненных лекарственными субстанциями [3]. Методы предсказания потенциальных биологических рисков, основанные на физико-химических и структурных свойствах лекарств и их комбинаций, отсутствуют.

В сложившейся ситуации для выявления биологических и экологических рисков, связанных с деятельностью фарминдустрии, могут рассматриваться два встречных направления:

создание базы данных и знаний, характеризующих уровни присутствия и особенности поведения лекарственных субстанций в разных фазах окружающей нас среды аналогично тому, как это считается необходимым для других вновь возникающих потенциально опасных веществ, например наноструктур разной природы [7];

формирование совокупности методов предсказания потенциальной опасности тех количеств фармацевтических веществ, которые

встречаются во внешней среде, а также средств прогнозирования переноса, перераспределения и биологического действия выявляемых фармакологических субстанций (накапливающихся в экологических средах, пищевых цепях, растениях, органах сельскохозяйственных животных и человека) с целью создания основ экофармакологии, способных обеспечивать решение стоящих проблем.

Направления оптимизации рисков

К настоящему времени получен представительный массив данных, свидетельствующий, что повсеместно, но преимущественно в водной среде детектируются микропримеси множества фармацевтических субстанций, что вызывает обеспокоенность общественности, ВОЗ и природоохранных органов разных стран. Пока еще никто не может точно сказать, насколько эта ситуация опасна для человека, водных экосистем, а тем более для других обитателей биосферы. В Австралии, Евросоюзе и США предпринимаются меры для сбора невостребованных лекарств, широко освещаемые средствами массовой информации, разворачиваются исследовательские программы, направленные на сбор данных о присутствии фармацевтических субстанций в воде как новом виде потенциально опасных загрязнителей. В Германии и Швейцарии уже функционируют специализированные пилотные установки, предназначенные для очистки госпитальных стоков от микропримесей фармацевтического происхождения [8].

Для решения проблемы неиспользованных лекарств в Евросоюзе привлекаются аптеки, где устанавливаются стационарные контейнеры, предназначенные для приема добровольно сдаваемых населением неиспользованных лекарственных средств. В США складывается иная

практика. По инициативе Агентства по борьбе с наркотиками и совместно со службой шерифов действует Национальная инициатива возврата лекарств. В разных районах страны назначаются дни места сбора лекарств, возвращаемых населением. Ежемесячно собирается и уничтожается около 300 тонн неиспользованных лекарств. В странах Европы и США органами власти определены правила обращения с ненужными лекарствами, а соответствующие инструкции распространяются среди населения. Налажена система переработки или уничтожения невостребованных лекарств.

В части снижения потенциальных рисков, связанных с загрязнением окружающей среды микропримесями активных фармацевтических ингредиентов, решаются юридические и финансовые вопросы ответственности общества, органов исполнительной власти и фарминдустрии. В частности, это касается возможной ответственности производителя. При этом фактически снова может подниматься вопрос о несовершенстве имеющихся схем управления жизненным циклом изделий лекарственного назначения. Известно, что полный цикл должен охватывать не только стадии разработки, производства и использования произведенной продукции, но и ее утилизации. В данном конкретном случае многие проблемы количественной оценки опасности остаются еще нерешенными.

В заключение хочется поблагодарить наших финских коллег, в первую очередь — Raijs Kaisjoki-Rojas, за плодотворное обсуждение проблем загрязнения окружающей среды лекарственными веществами.

Работа авторов статьи по изучению европейского опыта была поддержана грантом РФФИ 10-06-00521-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolpin, D.W. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999–2000: a national reconnaissance [Текст] / D.W. Kolpin, E.T. Furlong [et al.] // Environmental Science & Technology.— 2002.— Vol. 36, № 6.— P. 1202–1211.
2. Santos, L. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment [Текст] / L. Santos, A. Araujo, A. Fachini [et al.] // Journal of Hazardous Materials.— 2010.— № 175.— P. 45–95.
3. Cotruvo, J. Pharmaceuticals in drinking-water [Текст] / J. Cotruvo, M. Couper, D. Cunliffe [et al.] / World Health Organization.— 2012.— 52 p.
4. Richards, S.M. Effects of pharmaceutical mixtures in aquatic microcosms [Текст] / S.M. Richards, C.J. Wilson [et al.] // Environmental Toxicology and Chemistry.— 2004.— Vol. 23, № 4.— P. 1035–1042.
5. Cleuvers, M. Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects



[Текст] / M. Cleuvers // Toxicol. Lett. — 2003. — № 142. — P. 185–194.

6. **Schwaiger, J.** Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac. Part I: histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout [Текст] / J. Schwaiger, H. Ferling, U. Mallow [et al.] // Aquat. Toxicol. — 2004. — № 68. — P. 141–150.

7. **Козырев, С.В.** Новые подходы к оценке биологических и экологических рисков наноматериалов [Текст]

/ С.В. Козырев, В.В. Кораблев, П.П. Якуцени // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного университета. Сер.: Физико-математические науки. — 2012. — № 4 (158). — С. 104–111.

8. **Kovalova, L.** Hospital wastewater treatment by membrane bioreactor: performance and efficiency for organic micropollutant elimination [Текст] / L. Kovalova, H. Siegrist, H. Singer [et al.] // Environ Sci Technol. — 2012. — Vol. 7, № 46(3). — P. 1536–1545.

УДК 523:524:550.3:550.35–38:551.94:537.67

Н.В. Петров, В.И. Гуменюк

ПРИЧИНЫ ТАЯНИЯ ПОЛЯРНЫХ ШАПОК ПЛАНЕТЫ

Может случиться такое, что физика будущего включит как первичное простейшее явление — способность, сходную с ощущением, и на ее основе будет объяснено многое другое.

С.И. Вавилов

Обычно суждение об образовании полярных льдов сводится к тому, что, мол, солнечные лучи в области полюсов скользят относительно поверхности планеты, и потому там меньше выделяется тепла. Однако в настоящее время геометрия расположения планеты и динамика ее вращения относительно Солнца остались прежними, а льды на обоих полюсах стремительно тают. Значит, дело не в том, под каким углом падают лучи Солнца на поверхность Земли. Что произошло? Ответ надо искать в энергоинформационном взаимодействии планеты и звезды — Солнца. Начиная с 2007 года изменился ритм 11-летнего цикла, а вместе с ним и энергетическое дыхание планеты. В своем орбитальном движении относительно центра Галактики Солнечная система переходит в новый по знаку полярности магнитный сектор Галактики [2].

За все годы развития науки о Земле накоплен огромный экспериментальный материал, анализ которого позволяет с большой достоверностью утверждать, что вся система нашей планеты самостоятельно поддерживает постоянными (в некотором диапазоне величин) параметры

внутри планеты, в коре и над корой, в атмосфере: давление, температуру, химический состав, электрические и магнитные характеристики. Для такого процесса требуются поступление внешней энергии и реальный механизм ее приема и преобразования. На Земле такой механизм реально существует — это плазменный механизм солнечно-земных связей в виде *радиационного пояса, ионосферы и магнитосферы*. Этот механизм хорошо исследован с помощью как ИСЗ, так и наземными средствами наблюдений за полярными сияниями [1, 3, 5, 7, 8, 9]. Земной шар — это активный диполь, а все диполи обладают направленным *полем излучения*, или диаграммой направленности, направленным взаимодействием с телами Солнечной системы. Структурно такая диаграмма направленности для Земли представляет совокупность трех элементов — тороида в виде радиационного пояса, ионосферы и магнитосферы — в их функциональном единстве.

Постоянство параметров среды над корой планеты имеет колебательный ритм изменения, один из которых совпадает с периодом в 26 ты-

сяч лет и соответствует зодиакальному году — одному витку Солнечной системы среди звезд при поступательном движении вокруг центра Галактики с периодом 217 млн лет [2]. Получается, что за время одного периода обращения вокруг центра Галактики Солнечная система совершает более 8 тысяч зодиакальных витков по спиральной траектории. Принимая за аналог радиоактивный распад атомов химических элементов, можно сказать, что существует *период полураспада человечества как вида одной расы* — 13 000 лет.

Каждые 13 тысяч лет наша планетная система из магнитного поля Млечного Пути одного знака переходит в точках равноденствия в поле противоположного направления, достигая за 6,5 тысяч лет максимального положения в пространстве магнитного поля одного знака (точки *стояния* — максимальный день или максимальная ночь для всей Солнечной системы). Это означает, что регулятором энергетического состояния Солнечной системы в целом и изменения климата на Земле в частности служит информационное магнитное поле Галактики.

Газовое дыхание планетного тела сопровождается глобальными процессами внутри планеты, формируя при этом под воздействием ионизирующих солнечных излучений электрически заряженную ионную сферу над Землей. От этого в экваториальной плоскости вокруг Земли возникают мощные кольцевые токи силой в миллион и более ампер [3]. Кольцевой ток возбуж-

дает магнитное поле, которое становится магнитной сферой для планеты под воздействием солнечного ветра. *Постоянное магнитное поле планеты взаимодействует с переменным магнитным полем магнитосферы кольцевого тока, создавая эффект механического вращения, и тело планеты начинает вращаться **внутри** собственной магнитосферы, которая не вращается и смотрит постоянно своей замкнутой частью на Солнце.* Создается ритм чередования поведения, в частности биосферы, активного днем и пассивного ночью.

Газовое дыхание планетного шара, от которого зависит формирование ионосферы, возникновение в ней кольцевых токов и, как следствие, вращение Земли вокруг своей оси напрямую связаны с ритмом потребления энергии солнечного ветра нашей планетой [1–3, 11].

Краткое изложение причины таяния льдов в полярных районах Земли

Проблемные вопросы изменения климата планеты напрямую связаны с таким явлением, как активное таяние льдов Арктики и Антарктиды. В отличие от широко раскрытой *антропной* причины потепления, реальные его причины связаны с энергетическим дыханием планеты — живым элементом живой Солнечной системы [11].

В кратком изложении этот процесс выглядит следующим образом.

Над дипольными *магнитными полюсами* планеты существуют зоны (по одной над каждым полюсом), очерченные авроральными кольцами диаметром около 3 000 км каждый (рис. 1). Четыре магнитные аномалии (рис. 7), расположенные на одной широте относительно полярной области, создают начальные условия для формирования энергетического канала над полюсами Земли.

Смещение магнитной оси относительно оси механического вращения планетного тела создает эффект, необходимый для всасывания массы солнечного ветра вдоль разомкнутой половины магнитосферы.

Авроральные кольца светятся и днем и ночью, динамично сужаясь и расширяясь в ритме дыхания Земли и солнечной активности, а также в зависимости от скоростного напора солнечного ветра (рис. 2).

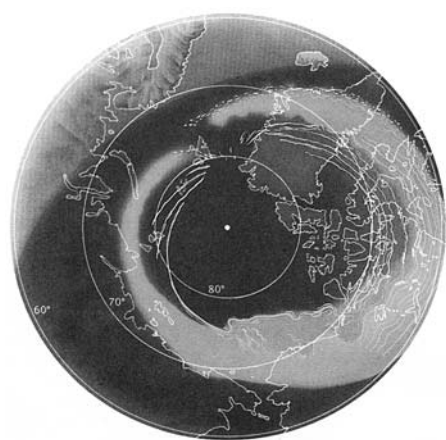


Рис. 1. Изображение северного полярного овала, смещенного относительно географического полюса в сторону магнитного полюса Земли

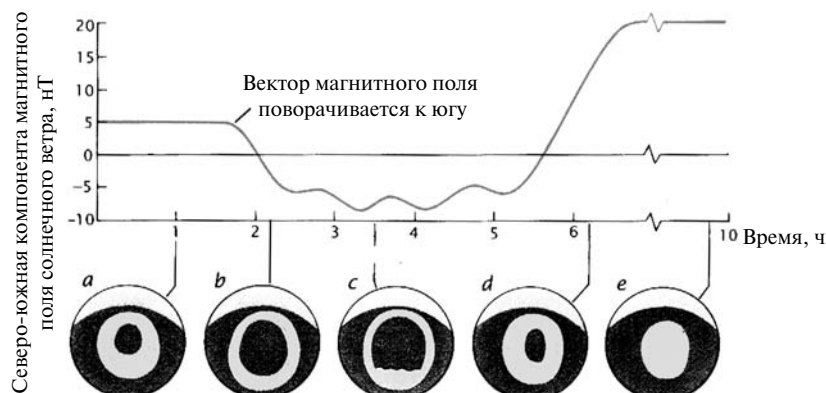


Рис. 2. Фазы изменения овала полярного сияния над северным полюсом планеты, где расположен южный магнитный полюс, в зависимости от направления магнитных линий секторного поля Солнца [1, с. 41]

Можно, несколько отвлекаясь, в качестве примера аналогичного свечения воздуха отметить, что в реальных условиях работы реактивного двигателя на стоянке самолета отчетливо наблюдается эффект свечения воздуха, всасываемого внутрь компрессора двигателя. Вначале с ростом оборотов наблюдается *шнур светлого вихря*, поднимающийся от поверхности земли во входное устройство двигателя, где он *преобразуется в кольцевую форму*, если входное устройство выполнено в виде круглого конуса. С нарастанием оборотов двигателя кольцо входит внутрь компрессора, и может снова появляться на входе с понижением оборотов. Светящийся воздух — это скачок уплотнения на входе в компрессор двигателя.

Магнитосфера планеты тормозит поток солнечного ветра, создавая условия электрического взаимодействия магнитного поля Земли с электрически заряженными частицами ветра (рис. 3).

Над полюсом Земли в магнитосфере ритмично работает мощный генератор электрической энергии, создавая закрученный поток быстрых электронов (рис. 4).

Этот вихрь из электронов служит эжектором для засасывания огромных масс солнечного ветра, движущихся с огромными скоростями — до 700 и более км/с.

Поток заряженных частиц направляется магнитными силовыми линиями поля планеты внутрь земного шара.

Наличие постоянного, но переменного по интенсивности свечения авроральных колец го-

ворит о том, что они являются скачками уплотнения в динамичном потоке заряженных частиц внутрь Земли.

Мощный энергетический *поток вдоха*, первоначальные границы которого очерчены в пределах диаметра 3000 км, *охлаждает область коры планеты на входе этого потока* в плотные структуры коры Земли, формируются льды океана и вечная мерзлота дна Ледовитого океана.

Внутри плотных структур планеты начинается мощный процесс выделения внутренней энергии потока (по типу выделения энергии

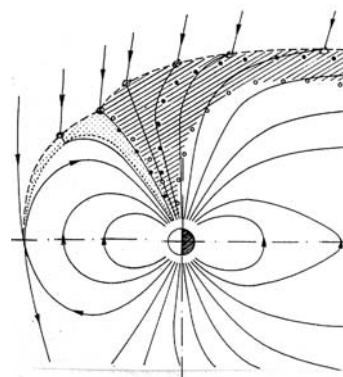


Рис. 3. Представлена схема плазменной мантии и входного слоя в модели активной магнитосферы, открытой для работы с солнечным ветром. На рисунке заштрихована область дневной стороны магнитосферы, постепенно расширяющейся, как опахало, для втягивания частиц солнечного ветра

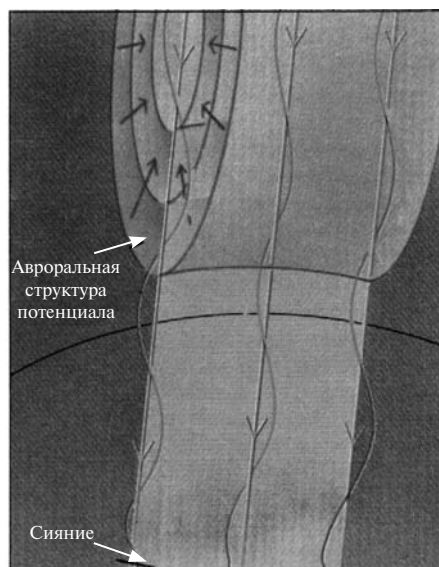


Рис. 4. Схема магнитосферного генератора электрической энергии над полюсом планеты (авроральная структура потенциала).

Здесь происходит ускорение электронов потока солнечного ветра [1, с. 41]

в современных тепловых генераторах струйно-импульсного типа).

Всегда там, где очень горячо, где *возникает плазма*, немедленно появляется углерод. Он поглощает избыточное тепло и по мере уплотнения плазмы приобретает атом водорода для своего индивидуального существования, в коре формируются запасы углеводородов. Для *уплотняющейся плазмы* характерен процесс присоединения дополнительных протонов теми атомами, которые уже имеют атомы водорода или часто их используют при образовании полимерных цепей. Так молекула водорода в плазме присоединяет третий протон, становясь положительно заряженным ионом H^{+3} . Та же история происходит с метаном CH_4 : он становится CH_5^{+} , [13, с. 39], а углерод превращается в углеводород типа C_nH_m .

Одним из основных недостатков современных генераторов тепла с использованием воды является необходимость регулярной замены воды как рабочего тела по причине обильного выделения в ней углеводородов: со временем вода становится черной как нефть.

Этот же эффект лежит в основе образования нефти в коре планеты в полярных районах и по

разломам коры в других районах. Так в полярных районах планеты появляются зоны, охлажденные до ледяного состояния сверху и богатые углеводородами на глубине.

Из многочисленных данных геологии [10] следует, что углеводороды (нефть, газ, битум, углеродные залежи) являются, в основном, не только итогом превращения биогенных отложений, а продуктом эндогенных процессов в коре планеты — *тектоники и магматической деятельности*. То есть *образование нефти относится и к тому периоду, когда еще не было биологических видов*. Углеводороды образуются циклически от архея к мезозою и кайнозою [10], и это связано с глобальными процессами роста коры планеты, сопровождаемого обильным выделением кислорода и тепла, появлением углерода в местах выделения тепла от деятельности кислорода и мощных разрядов электричества. Ритм дыхания человека имеет все эти же признаки: вдыхается кислород, выдыхается углекислый газ, и температура тела поддерживается в строго ограниченном пределе для каждого вида.

Учитывая четырехсекторное (*в виде свастики*) строение магнитного поля Солнца и межпланетного магнитного поля, постоянно меняющего свое направление по причине 28-дневного вращения Солнца вокруг своей оси, в районе Земли формируется семидневный ритм изменения полярности внешнего поля. Изменяется направление магнитных силовых линий: семь дней они направлены относительно Земли с севера на юг, следующие семь дней — с юга на север.

Магнитное же поле Земли в нормальном режиме вращения планеты вокруг своей оси не меняет (в отличие от Солнца) направления своих магнитных силовых линий в области каждого полюса.

Физика взаимодействия магнитных полей Земли и Солнца такова, что они способны соединяться или разъединяться в зависимости от их направления. Когда магнитное поле Солнца направлено встречно магнитному полю планеты (с севера на юг), то происходит объединение силовых линий, и Земля активно дышит Северным магнитным полюсом, поглощая солнечный ветер (см. рис. 2).

Когда магнитное поле Солнца через семь дней меняет свое направление, магнитные си-



ловые линии на Севере размыкаются, а на Юге замыкаются. Начинается процесс активного дыхания Южным полушарием.

Это приводит к тому, что *вдоль магнитной оси планеты от полюса к экватору* текут токи прямого и обратного направления с ритмом около семи дней. Возникает ритм автоколебательных процессов внутри тела планеты, роста и развития структур планетного шара. В такт возбуждению магнитного диполя как антенны изменяются параметры радиационного пояса, ибо он является полевой структурой, или диаграммой направленности, дипольного шара планеты.

Символом секторного межпланетного магнитного поля, которое является продолжением магнитного поля Солнца, служит древний славянский символ свастики.

В реальных условиях существования звезды наблюдаются непрерывные изменения в секторной картине, отражающие динамику солнечных процессов как реакцию на поведение планетных тел в его системе, а также энергетические изменения на трассе движения Солнечной системы среди звезд.

В настоящий период Солнце снижает свою активность, наблюдается значительная варибельность спектрального состава солнечного излучения в области мягкого рентгена и ультрафиолета [4], а вся система планет вошла в область магнитного поля Галактики (также имеющего секторное строение) противоположной полярности и обедненного электронами.

Современные исследования показывают, что ритм дыхания Солнца, всей системы планет и Земли, в частности, изменился. Фактически нарушился 11-летний цикл работы Солнца, ослабла его вспышечная активность. **Дыхание Земли стало более спокойным и размеренным**, скоростной напор потока солнечного ветра внутрь планеты снизился. Это повлекло реакцию коры планеты на полюсах — **прекратилось охлаждение от скоростного потока всасываемого солнечного ветра**.

И льды стали таять, стал таять замороженный ранее метан, оттаивает вечная мерзлота дна Ледовитого океана в районе моря Лаптевых.

Одним из дополнительных признаков существования мощных энергетических потоков, направленных внутрь планеты, служит наличие большого разнообразия каменных шаров (от

2,5 см до 2 метров в диаметре и весом до 12 тонн), или *сферолитов*, на островах Земли Франца Иосифа. Шары были обнаружены участниками Комплексной Северной поисковой экспедиции Русского географического общества, совершенной в августе 2011 года на яхте «Апостол Андрей». Способ образования сферолитов все еще является загадкой для геологов, но, возможно, что сферолиты образуются по пути прохождения *вращающихся потоков заряженных частиц* энергии вдоль магнитных силовых линий в виде гигантских магнитных трубок диаметром до 32 километров [9]. Пример формы сферолитов, аналогичных в своей сути полярным, показан на рис. 5.

Главным доказательством поглощения энергии планетным телом является фиксирование работы магнитосферного генератора мощностью свыше 10 миллионов мегаватт (спутниковые наблюдения и расчеты геофизиков) [1]. Возбуждение магнитного поля Земли (магнитные бури) происходит сразу же после активного потребления энергии солнечного ветра, после вспышки на Солнце. Землетрясения как признак активизации внутренних процессов происходят *сразу же (при входе энергии) в полярных районах и с задержкой, в противофазе, — в экваториальных поясах сейсмичности*.

В 2002 году сотрудники Карельского научного центра РАН (И.Л. Дубникова, Н.Ф. Кедрина и др.) исследовали зародышевообразующую

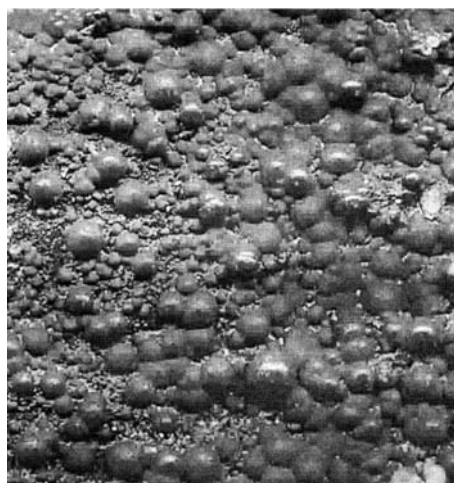


Рис. 5. Пример сферолитов малахита на кварцевой подложке
[Геовикипедия. — Wiki.web.ru]

активность шунгитов и пришли к выводу, что способность шунгитов образовывать зародыши *сферолитов* во внешнем пространстве возрастает по мере увеличения в их составе углерода. В современном состоянии шунгит — это фулереновый углерод (до 30 %) и силикатный материал (до 70 %), равномерно распределенный в углеродной среде. Углерод шунгита обладает высокой активностью образования форм материи, он служит прекрасным восстановителем. По-видимому, в структуре коры полярного района, богатого углеводородами, имеется много сферолитов, некоторые из которых со временем выдавливаются из вечной мерзлоты на поверхность островов Земли Франца Иосифа.

Геофизики объясняют причину свечения авроральных овалов только с позиции захвата энергичных электронов солнечного ветра магнитными силовыми линиями и только на пути до ионосферы, не учитывая динамику самого процесса и его необходимость для Земли. Природные торнадо и смерчи, а также современные механические устройства струйной энергетики, такие, как генераторы тепловой энергии на основе вращающегося потока воды и др., демонстрируют факт выделения внутренней энергии атомами и молекулами при их сильном закручивании в продольном *импульсно-вихревом потоке*. Вихри способны удерживать свою структуру благодаря тому, что в рабочем веществе, захваченном ими со стороны, происходит распадание внутренних энергетических связей, выделяются огромные тепловые энергии.

Наблюдения с орбиты ИСЗ показывают, что в *авроральной структуре потенциала* (рис. 4), как в зародыше вихревого образования в форме про-

дольного вихря, всасываемого в Землю, происходит активное взаимодействие атомов и молекул атмосферы с излучениями, что *сопровождается интенсивным излучением радиоволн*.

Это *радиоизлучение из авроральной зоны свечения* столь огромно, что значительно превышает оптическое излучение планетного тела в космическое пространство [1]. Земля сигнализирует о том, что идет активное потребление энергии солнечного ветра, она живет, и ее дыхание говорит об этом. Такой же эффект излучений электромагнитных волн наблюдается и в тепловых генераторах, и в динамике торнадо, смерчей.

Светящиеся овалы и (или) вихри над полюсами обнаружены также на Венере (рис. 6) и Сатурне, что демонстрирует универсальный принцип потребления энергии полюсными районами космических тел.

Невежественные действия специалистов в области разогрева ионосферы с помощью ионосферных станций нарушают ритм естественного энергетического дыхания Земли. Об этом говорит появление полярных сияний в тот момент, когда нет солнечной активности, но активно работает система ХААРП и др. Эти эксперименты вызывают целый набор экстремальных явлений: рост сейсмичности, развитие смерчей и тайфунов, аномальные климатические ситуации.

Земля отвечает на искусственные возбуждения со стороны технических средств человека точно так же, как она реагирует на солнечную активность. Примером тому служит работа (в прошлом) мощной радиолокационной станции «ДУГА» в районе Чернобыля и последствия от ее работы.

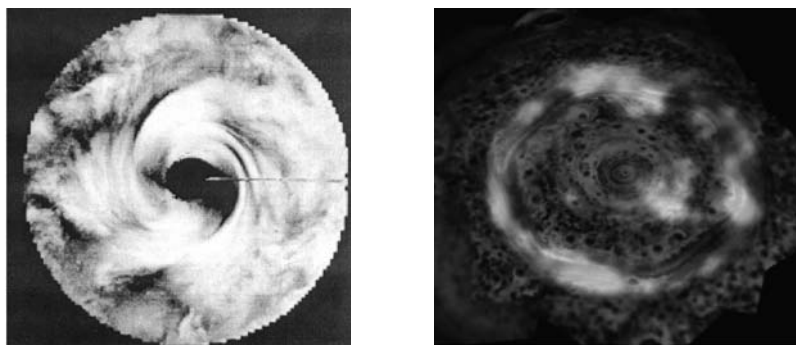


Рис. 6. Вихрь над южным полюсом Венеры (слева), свечение аврорального овала над шестиугольным образованием полюса Сатурна (справа) (фото из Интернета)

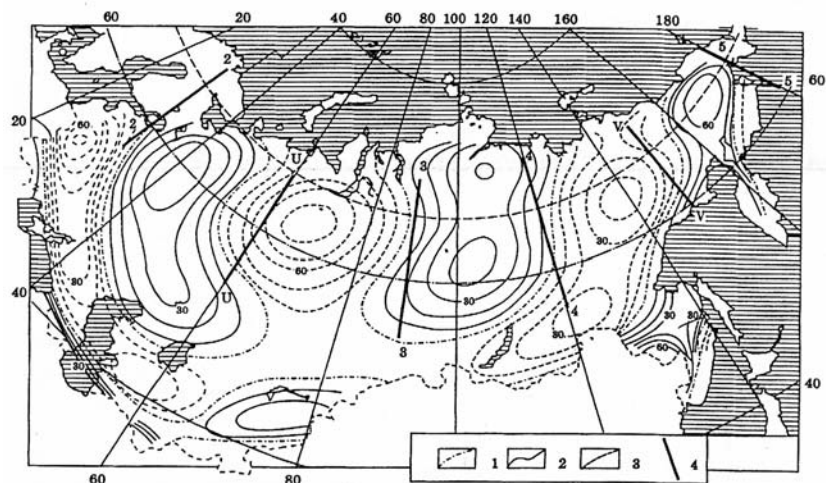


Рис. 7. Схема расположения четырех магнитных аномальных зон, разделенных нейтральными зонами, в виде физических полей в Северных районах планеты:

1 — нейтральная зона между противоположными по знаку аномалиями; 2 — положительная магнитная аномалия; 3 — отрицательная магнитная аномалия; 4 — разломы коры планеты [14]

На рис. 7 представлена карта, где видны четыре аномальные магнитные зоны в северном полярном районе Земли, разделенные нейтральными областями. Эти аномалии обрамляют зону энергетического дыхания планеты, формируя центральный канал над полюсом Земли (рис. 8). Такой универсальный прием Природа использует повсеместно. Например, чувствительные элементы внутренних органов человека размещены в радужке глаза, оконтуривая канал зрачка

ка глаза. Эти элементы избирательно формируют поток света в канал зрачка глаза. Медицинская практика ириодиагностики убедительно демонстрирует, что диагностику состояния внутренних органов можно проводить по радужке глаза.

Аналогичные *четыре* магнитных аномалии имеются и в Южном полушарии, но их свойства диаметрально противоположны свойствам аномалий Северного полушария. Поэтому на общем

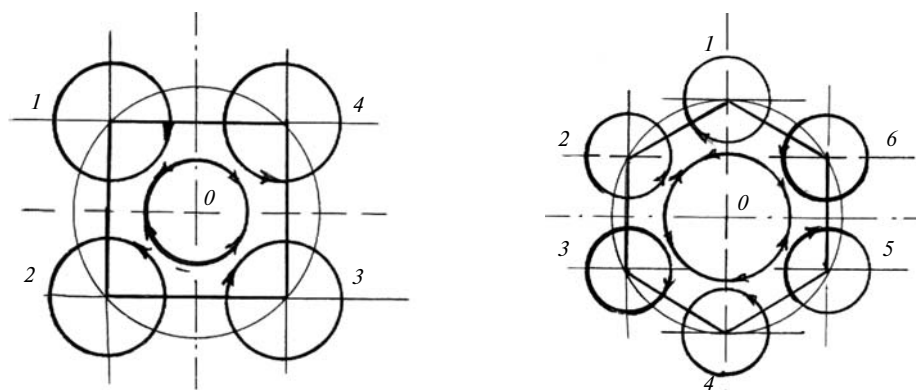


Рис. 8. Примерная схема формирования центрального канала энергетического дыхания планеты Земля с помощью четырех крупных аномалий в Северном полушарии (слева) и предполагаемая полярная зона Сатурна (справа), над полюсом которого космическими аппаратами зафиксирована структура правильного шестиугольника и мощные вихри внутри этой структуры

фоне планетного тела они перекрещены, образуют «X» форму. Из рис. 8 видно, что пара вихрей магнитных аномалий (1–3) формируют центральный поток левого вращения, а вихри аномалий (2–4) формируют центральный поток правого вращения. Таким образом, создается ритм раздельного вдоха и выдоха энергетических потоков.

Подобная картина вдоха и выдоха над полюсом Сатурна формируется тремя вихрями: 1, 3, 5 формируют вихрь потока центрального канала левого вращения, а вихри 2, 4, 6 формируют поток правого вращения. Все вихри аномальных зон исходят из вершин многоугольников (квадрат для Земли и шестигранник для Сатурна). Они отражают свойство энергетических каналов из недр тела планеты. Постоянное свечение авроральных колец над полюсами и сдвоенная их структура, зафиксированная по противоположному направлению токов в каждой из половин [1], только подтверждают факт формирования прямого и обратного потоков энергетического дыхания Земли.

Солнечный венец в высоких широтах [15] динамикой своего поведения в период 11-летнего цикла демонстрирует аналогичную картину энергетического дыхания Солнца. В высоких широтах (между 40 и 50 градусами по широте) волокна протуберанцев от активных магнитных зон (пятна солнечной активности) становятся видимыми спустя 3 года после образования максимума солнечного цикла в 11 лет вплоть до спада активности до минимума. В начале очередного 11-летнего цикла эта группа протуберанцев смещается в более высокие широты к полюсам Солнца и на 70 параллели объединяются в одну светящуюся структуру — венец Солнца. Здесь, по-видимому, и формируется канал потребления внешней энергии — потока заряженных частиц. Невидимые контуры канала обозначаются орбитами долгопериодических комет, большие полуоси которых перпендикулярны экваториальной плоскости Солнца, и простираются на сотни астрономических единиц.

Можно остановить часы, но нельзя остановить время. Энергетическое дыхание Земли определяет ритм ее колебательного процесса, благодаря чему и течет время событий жизни биосферы. Дыхание планеты остановить невозможно.

Двойственность или дипольность — это основа всех колебательных процессов в Космосе. День — ночь, активность — пассивность, Северное магнитное полушарие — Южное магнитное полушарие, вдох — выдох — все это только примеры двойственности, подобные началу и концу определенных событий, после чего возобновится новый ритм, новое рождение.

Этот эффект заставляет задуматься и понять, что **материя существует только в процессе движения, ей нельзя остановиться, требуется ритм дыхания и наличие чувствительных систем для работы с излучениями.** Поэтому нельзя остановить время как меру ритма дыхания.

Один оборот Солнце совершает за 28 дней, столько же времени требуется Луне, чтобы один раз обойти Землю по кругу. За это время магнитное поле Солнца дважды меняет свое направление относительно неизменного по направлению магнитного поля Земли. Это приводит к тому, что семь дней оказывается активным Северное магнитное полушарие планеты, а Южное полушарие при этом пассивно, затем семь дней будет активным Южное магнитное полушарие, а пассивным — Северное. Вдоль магнитной оси планеты происходит колебание потоков энергии с семидневным ритмом — семь дней поток следует с Севера к экватору, следующие семь дней поток течет с Юга к экватору. В плоскости экватора Земли формируются чувствительная *полевая структура планеты* и диаграмма ее направленного взаимодействия с Солнцем, она же — плазменный механизм солнечно-земных связей, состоящий из тора радиационного пояса, ионосферы и магнитосферы. Над каждым полюсом планеты сформировано дыхало, подобное дыхалу дельфина.

Энергетическое дыхание Земли не может остановиться, и оно находится под управлением дипольного, или сдвоенного, магнитного поля планеты и четырех магнитных аномалий в полярных районах каждого полушария. Поэтому у Земли два магнитных полушария и одна, но состоящая из двух половин общая диаграмма направленности, и одно тело планеты. Структура диаграммы сформирована из быстрых электронов и протонов, находящихся в постоянном движении под управлением магнитных силовых линий поля планеты.

Время колебательных процессов нельзя остановить благодаря энергетическому дыханию



материи за счет ритмично появляющихся и исчезающих форм материи. Поэтому-то в Природе существует основной закон — это закон сохранения жизни. Все космические тела работают в автоколебательном режиме.

Изложенная идея дает однозначное толкование современным изменениям климата планеты. *Она не противоречит реальным событиям активного таяния льдов*, но отличается от господствующего антропоного представления тем, что в геофизике не рассматривается энергетическое дыхание Земли, не учитываются причина и необходимость вращения планеты и способность шара планеты восстанавливать свою скорость вращения. Геофизика считает, что сгущение магнитных силовых линий на полюсах способствует формированию в этих зонах *магнитных пробок*, или зеркал отражения заряженных частиц, что не позволяет проникать внутрь планеты никаким заряженным частицам. При этом упускается главное — *реально существующее ритмичное пересоединение магнитных силовых линий поля Земли и Солнца*, что и служит условием перекачивания энергии солнечного ветра в недра Земли.

Современное активное таяние полярных льдов, оттаивание вечной мерзлоты, а также испарение ранее замороженного метана в восточной части моря Лаптевых связаны с уменьшением активности Солнца и, как следствие, с изменением активности энергетического дыхания планетного тела: *планета стала дышать плавно*, подобно дыханию в режиме отдыха или сна. Изменение ритма работы планеты было обосновано в [2] с учетом смены полярности галактического магнитного поля на трассе движения Солнечной системы.

Чем мощнее вспышка на Солнце, тем сильнее полярные сияния, тем мощнее энергетическое дыхание Земли, тем холоднее в полярных районах, тем резче очерчиваются границы климатических районов, повышается атмосферное

давление, выше организация пространства атмосферы, коры планетного тела и ее внутренних процессов.

Чем реже или совсем нет вспышек на Солнце, тем реже или совсем нет полярных сияний, тем мягче климат, размыты границы тепла и холода. Следствием современного устойчивого снижения энергетического дыхания планеты будет полное освобождение ото льда обоих полярных районов планеты, подъем уровня вод океанов планеты, изменение скорости и направления океанических течений по причине уменьшения солености воды, влажный и холодный климат в Европе. И этот прогноз надо учитывать на перспективу развития человечества.

В конце января 2012 года произошла вспышка на Солнце. Через два дня засияли полярные сияния, на Севере образовался мощный антициклон, резко похолодало в Европе и во всей Сибири, на Алтае. До этого там была мягкая погода, и мало было снега. С 27 января по 2 февраля произошла серия землетрясений: на границе Ставрополя и Кабардино-Балкарии, на северо-востоке Японии, на Курильских островах, в Египте в г. Хабарде, в Италии, в Перу, на Филиппинах. Эти события полностью соответствуют описанной ранее причине — энергетическому дыханию Земли. Вспышка на Солнце увеличила мощность вдоха планетного тела.

Никакие ухищрения человека, направленные на сохранение неизменным климата планеты, которые предложены в работе [12], не дадут желаемого эффекта. *Следует обратить пристальное внимание на ритм эволюционных процессов, и стремиться формировать жизнь общества в гармонии с ними* [11, 2]. Необходимо прекратить все эксперименты с разогревом ионосферы, которые служат причиной роста сейсмичности, локальных изменений климата и прочих стихийных бедствий, поскольку влияют на естественный ритм дыхания планеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сюн-Ити Акасофу.** Динамика полярных сияний [Текст] / Акасофу Сюн-Ити // В мире науки.— 1989. № 7.— С. 34.
2. **Петров, Н.В.** Применение системного подхода к прогнозированию изменения климата Земли [Текст] / Н.В. Петров // Проблемы анализа риска.— Т. 8, № 4.— М., 2011.— С. 58–69.

3. **Нишида, А.** Геомагнитный диагноз магнитосферы [Текст] / А. Нишида.— М.: Мир, 1980.
4. **Авакян, С.В.** Роль космических и ионосферных возмущений в глобальных климатических изменениях и коррозии трубопроводов [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Исследование Земли из космоса.— 2011. № 3.— С. 14–29.

5. Гальпер, А.М. Радиационный пояс Земли [Текст] / А.М. Гальпер // *Soros Education Journal*.— 1999.— № 6.— С. 75–81

6. Вернов, С.Н. Радиационный пояс Земли [Текст] / С.Н. Вернов // *Земля и Вселенная*.— 1979. № 4.— С. 33–36.

7. Тверской, Б.А. Взаимодействие магнитосферы с ионосферой [Текст] / Б.А. Тверской // *Земля и Вселенная*.— 1979. № 4.— С. 37–41.

8. Трахтенгерц, В.Ю. Магнитосфера как альвеновский мазер [Текст] / В.Ю. Трахтенгерц // *Земля и Вселенная*.— 1979. № 4.— С. 42–45.

9. Кадомцев, Б.Б. Волны вокруг нас [Текст] / Б.Б. Кадомцев, В.И. Рыдник.— М.: Знание, 1981.

10. Кузнецов, А.А. Системные признаки и природы нефтяных и газовых месторождений (универсальная генетическая модель) [Текст] / А.А. Кузнецов // Система «планета Земля».— М.: ЛЕНАД, 2010.— С. 133–152.

11. Тарасов, Б.Г. Живой Космос: системный взгляд

на живой процесс от микромира до макромира [Текст] / Б.Г. Тарасов, Н.В. Петров / Под ред. М.Н. Тихонова // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов* / РАН, Обз. инф.— 2010. Вып. 12.— С. 3–96.

12. Израэль, Ю.А. Возможности сохранения (стабилизации) современного климата с помощью новых технологий [Текст] / Ю.А. Израэль // *Биосфера. Междисциплинарный и прикладной журнал*.— 2011. Т. 3, № 1. С. 3–6.

13. Франк-Каменецкий, Д.А. Плазма— четвертое состояние вещества [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий.— М.: Атомиздат, 1975.— 160 с.

14. Ткаченко, О. Взаимосвязь антропогенеза с геоактивными зонами Земли [Текст] / О. Ткаченко // *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*.— 1999. Вып. 9.— С. 39–43.

15. Витинский, Ю.И. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца [Текст] / Ю.И. Витинский, М. Копецкий, Г.В. Ку克林.— М.: Наука, 1986.— 295 с.

УДК 543.426:539.16.04:556.53

В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ УРАНИЛОВ

Интенсификация промышленного производства во второй половине XX века привела к появлению на планете большого количества антропогенных радионуклидов. Их суммарная активность в среднем соизмерима с активностью естественного радиоактивного фона, но на некоторых участках (техногенно-повышенный фон) может существенно превышать его.

Антропогенные радионуклиды образуют две основные группы: искусственные радионуклиды, получаемые в результате ядерных реакций, и естественные, или природные, радионуклиды (уран, торий и продукты их распада), концентрация которых на земной поверхности резко возросла за счет техногенных процессов, связанных с перемещением их из более глубоких зон земной коры (например, при добыче урана). Это деление условно, поскольку образующиеся в естественных условиях легкие радионуклиды могут быть получены и искусственным путем.

Например, тритий образуется в окружающей среде (в результате ядерных реакций химических элементов с космическим излучением) и в реакциях, искусственно вызванных делением или синтезом ядер. Стронций-90 также возникает в окружающей среде при спонтанном делении урана-238 и может быть получен искусственно.

Искусственные радионуклиды не свойственны биосфере, они появились лишь с середины XX века в результате развития ядерных технологий военного и гражданского применения.

Радиоактивные вещества, образующиеся в результате ядерного взрыва, представлены в основном продуктами деления урана-238 и плутония-239, невыгоревшим ядерным топливом и материалами с наведенной активностью.

В зависимости от времени, прошедшего с момента взрыва до оседания частиц на земную поверхность, радиоактивные выпадения делятся на три вида:



1. Ближние, или локальные, выпадения представлены относительно крупными (более 100 мкм) частицами, оседающими на землю преимущественно под действием силы тяжести. Локальные выпадения начинаются сразу после взрыва и продолжаются в течение последующих 1–2 суток, охватывая по мере переноса радиоактивного облака ветром все более обширную территорию. В результате локальных выпадений на земной поверхности образуется радиоактивный след шириной в несколько десятков и протяженностью в несколько сот километров. Крупные частицы, оседающие под действием сил тяжести, попадают непосредственно на земную поверхность, в т. ч. на растительность и животных, обуславливая их поверхностное загрязнение. Считается, что при наземных ядерных взрывах мегатонной мощности на ближние выпадения приходится до 80, а при атмосферных — около 10 %.

2. Промежуточные, или тропосферные, выпадения представлены мелкими частицами (несколько микрометров и менее). Эти частицы формируются в тропосфере ниже тропопаузы на высоте 11–16 км. Период полувыведения этих частиц из тропосферы составляет 20–30 суток. На тропосферные выпадения при наземных взрывах мегатонной мощности приходится 5 %.

3. Глобальные, или стратосферные, выпадения состоят из частиц от нескольких сотых до десятых долей микрометра, забрасываемых в стратосферу на высоту 10–30 км. Оттуда они переносятся в тропосферу струйными течениями и циклональными вихрями либо с воздушными массами через разрывы в тропопаузе.

В умеренных широтах глобальные выпадения с атмосферными осадками (влажные выпадения) составляют 60–70 % общей суммы радиоактивных выпадений, остальная их часть (30–40 %) представлена сухими выпадениями. Глобальные выпадения распределяются по всей поверхности земного шара.

Из глобальных выпадений в водный раствор переходит около 50 % общего количества радионуклидов, в водонерастворимой форме поступает до 95 % стронция-90 и до 70 % цезия-137, в растворимой форме — 30 % церия-144 и 40 % циркония-95. Из локальных и тропосферных выпадений от атмосферных взрывов, представленных частицами величиной до 20 мкм, в воде растворяется до 30 % (в основном, это радионуклиды йода, цезия, стронция, бария).

Количество радиоактивных изотопов, образованных при ядерных взрывах и включающихся затем в пищевые цепочки, определяется не только тем, сколько их выпало из воздуха, но также структурой экосистемы и особенностями биохимических циклов. В целом в малопродуктивных местообитаниях значительная доля осадков включается в пищевые цепочки. В экосистемах с высокой продуктивностью интенсивность обмена веществ и большая сорбирующая емкость почвы или донных отложений обеспечивают такое разбавление осадков, что в растения они попадают в относительно небольшом количестве. Выпавшие радиоактивные осадки (особенно стронций-90 и цезий-137) доходят по пищевой цепочке до человека, но их содержание в тканях организма человека никогда не бывает таким высоким, как в тканях животных.

В результате работы реактора накапливаются продукты деления ядерного топлива, продукты нейтронной активации и остатки выгоревшего топлива. Продукты деления образуются преимущественно внутри тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и там остаются. Выход за пределы оболочки ТВЭЛов ничтожно мал для всех радионуклидов, кроме трития (через оболочки из нержавеющей стали проникает около 80 % трития). В состав продуктов деления входят также благородные газы, летучие и нелетучие вещества. Все они являются бета- и гамма-излучателями и имеют периоды полураспада от долей секунды до десятков лет. Среди продуктов нейтронной активации также присутствуют радионуклиды различного состава и продолжительности жизни. Отработанные ТВЭЛы выдерживают на территории АЭС в специальных бассейнах выдержки для распада короткоживущих радионуклидов, а затем отправляют на радиохимические заводы для переработки.

При нормальной работе АЭС поступление радионуклидов во внешнюю среду незначительно. Загрязнение окружающей среды в результате работы радиохимических заводов гораздо серьезнее. Значительный вклад в глобальное загрязнение биосферы предприятиями ядерного топливного цикла (ЯТЦ) вносят углерод-14, криптон-85, тритий и йод-129. Другие долгоживущие неггазообразные радионуклиды (стронций-90, цезий-137, изотопы трансурановых элементов), поступающие в окружающую среду с выбросами предприятий ЯТЦ, рассеиваются

на ограниченной территории, т. е. создают локальное загрязнение.

Помимо «плановых» выбросов, источником радиоактивного загрязнения окружающей среды являются аварии на ядерных реакторах. Основную опасность при этом представляют продукты деления и нейтронной активации, накопившиеся в активной зоне реактора. Условием их сохранения внутри твэлов является герметичность и достаточное охлаждение твэлов и кожуха. Перегрев топлива и оплавление активной зоны реактора могут произойти лишь в том случае, если количество тепловой энергии, выделяемой в процессе ядерной реакции, превысит величину, снимаемую теплоносителем. Тогда теплоноситель переходит в пар, который вместе с облаком газообразных продуктов деления может привести к избыточному давлению и взрыву. При разрушении защитного колпака продукты деления и нейтронной активации вместе с неразделившимся (невыгоревшим) топливом поступают во внешнюю среду и вызывают радиоактивное загрязнение территории, площадь которой будет зависеть от мощности взрыва и метеорологических условий.

Антропогенное загрязнение естественными радионуклидами (торий-232, уран-238, уран-235, продукты их распада, а также калий-40) может возникнуть при извлечении и переработке многих полезных ископаемых. В результате этих процессов в биосфере появляются локальные участки с концентрацией радионуклидов, существенно превышающей естественный радиоактивный фон. Такие участки относят к разряду малоактивных загрязнений. Однако участие в них некоторых долгоживущих естественных радионуклидов с очень большим периодом полураспада делает загрязнение такого рода опасными, поскольку они могут существовать практически бесконечно. Подобная аномалия является постоянным источником высокоэнергетических короткоживущих радионуклидов, среди которых особую опасность представляют газообразные изотопы радона.

Все предприятия ядерного топливного цикла служат источниками поступления радионуклидов в окружающую среду, как в процессе производства, так и при их хранении и захоронении. Но основное количество естественных радионуклидов поступает в биосферу в процессе добычи

и переработки урановой руды, разделения изотопов урана и производства ядерного топлива. Локальное, а в некоторых случаях и глобальное загрязнение биосферы тяжелыми естественными радионуклидами происходит главным образом на первом этапе — в процессе добычи и переработки урановой руды. Хотя здесь доля радиоактивного загрязнения окружающей среды не превышает 0,04 % загрязнения, которое дает полный ядерно-топливный цикл, именно добыча и переработка сырья оказывают общее загрязняющее воздействие на среду, учитывая высокую территориальную концентрацию производства.

Важный источник естественных радионуклидов в биосфере — добыча, переработка и использование фосфатных удобрений. Осадочные фосфатные руды характеризуются высокой концентрацией урана-238 и радионуклидов его семейства со средней концентрацией 1500 Бк/кг и значительно более низкой концентрацией радионуклидов семейства тория-232. В зависимости от типа исходного сырья и технологических особенностей его переработки в удобрение могут переходить практически весь уран-238 и определенная часть радия-226, тория-228, тория-230, свинца-210 и полония-210. Концентрация этих радионуклидов во всех видах фосфорных удобрений независимо от разрабатываемых месторождений несколько выше, чем в пахотных почвах. При изготовлении удобрений концентрация радия-226 снижается почти во всех видах продукции, получаемой из фосфатного сырья, и, напротив, концентрация урана-238, тория-232 и тория-228 увеличиваются в двойном суперфосфате, аммофосе и диаммофосе, но не более чем в два раза. Концентрация калия-40 в калийных удобрениях примерно в десять раз превышает его концентрацию в почве. Содержание радионуклидов уранового ряда в фосфорсодержащих удобрениях различных стран мира варьируется в пределах 70–2400 Бк/кг, а концентрация радионуклидов ториевого ряда не превышает 70 Бк/кг. В некоторых странах (США, ФРГ, Тайвань, Россия) отмечается увеличение содержания естественных радионуклидов в пахотных почвах за счет длительного использования фосфорных удобрений.

В жидкие сбросы АЭС радионуклиды могут попасть при появлении протечек промконтура, системы охлаждения конденсаторов турбин,



а также с дебалансными водами. В основном влияние АЭС на увеличение радиоактивности воды прослеживается в сбросных каналах и прилегающей к ним акватории водоема-охладителя.

Потенциальным источником поступления радионуклидов в водную среду являются хранилища радиоактивных отходов. Разгерметизация емкостей хранилищ и нарушения гидроизоляции могут привести к попаданию радиоактивных веществ в грунтовые воды.

Существенный вклад в радиоактивное загрязнение гидросферы внесла чернобыльская авария. Наибольшее загрязнение водных экосистем отмечалось в конце апреля — начале мая 1986 года: концентрация радионуклидов в воде достигала в Припяти 10 кБк/л, в Днепре 4 кБк/л [1].

Существенно повлияли на радиоактивное загрязнение ряда водоемов Урала промышленные сбросы ПО «Маяк». С 1949 г. в реку Течу сбрасывались жидкие отходы радиохимического производства, в результате в речную систему Теча — Исеть — Тобол — Иртыш — Обь попало около 2,8 млн *Ki* жидких радиоактивных веществ, около 95 % которых поступило в реку Течу за период с марта 1950 года по ноябрь 1951-го. В результате радиоактивного загрязнения речной системы повышенному облучению подверглись 124 тыс. человек, проживающих в прибрежных населенных пунктах.

Заметное воздействие на радиоактивность реки Енисей оказала деятельность Горнохимического комбината (г. Железногорск), расположенного в 40 км от Красноярска. Более 50 лет комбинат является источником радиоактивного загрязнения окружающей среды из-за газообразных выбросов и жидких сбросов радионуклидов. В 1992 году на комбинате были выведены из эксплуатации два промышленных прямоточных реактора, воды охлаждения которых сбрасывались в Енисей (80 км от Красноярска). Остановка реакторов несколько снизила радиоактивное загрязнение природной среды, однако до сего дня на комбинате эксплуатируется последний реактор, дающий тепловую энергию для Железногорска.

Одним из наиболее токсичных радионуклидов, поступающих в окружающую среду, является уран. Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой канцерогенности соединений урана [2]. В исследованиях отмечается, что уран

и его соединения относятся к сильнейшим протоплазматическим ядам, и 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 уранилов зависит от характера их поступления в организм человека, от физико-химических свойств, от особенностей метаболизма человека, от характера распределения уранилов в критических органах.

Анализ допустимых концентраций в воде некоторых α -активных радионуклидов, в том числе урана, показывает, что предельное допустимое содержание радионуклидов в воде составляют микроколичества [3]. Между тем в настоящее время отсутствуют быстродействующие, легкие в управлении приборы для определения зараженности воды соединениями урана выше допустимых норм. Процесс идентификации радионуклидов включает сложную пробоподготовку, заключающуюся в экстракции радионуклидов, нанесении раствора на подложку, выпаривании растворителя и дальнейшем определении радионуклида [1]. При этом точность измерений не лучше 25–30 %. Нам представляется возможным создание на основе хемилюминесцентных реакций [4, 5] достаточно простой методики определения равновесной концентрации перекиси водорода, образующейся при радиолизе воды под действием α -излучения изотопов урана в концентрациях, превышающих фоновые значения.

Изучение возможных механизмов генерации активных форм кислорода (АФК) в воде, в том числе перекисных соединений, показывает [6, 7], что классические представления, основанные на прямых химических образованиях (фотохимический, радиационно-химический и каталитический каналы генерации АФК), при описании не учитывают возможность наработки радикальных форм за счет процессов фазовой трансформации связанной воды. Однако, как следует из работ [6–8], формирование активных форм кислорода под действием изменения внешних физических полей в ряде случаев приводит к усилению степени их наработки в водной среде. При этом величина концентрации активных форм кислорода, возникающих вследствие фазовой пере-

стройки 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 с целью выявления наиболее информативных показателей, указывающих на наличие в воде соединений урана.

Известно [6], что внешние физические поля оказывают влияние на процесс генерации АФК в водной среде, при этом в ряде случаев степень формирования перекисных соединений в воде под воздействием полей в несколько раз превосходит степень образования АФК по химическим каналам генерации. Однако с теоретических позиций данное явление до настоящего времени не рассматривалось и не учитывалось при проведении анализа водных сред.

Для выяснения механизма образования кислородных форм в воде было проведено изучение влияния естественных (геомагнитных) полей, а также ионов металлов переменной валентности на процесс генерации активных кислородных соединений в водной среде.

Для приготовления растворов дистиллированная вода кипятилась в течение часа для удаления остатков летучих хлорированных и перекисных соединений. После охлаждения вода в течение суток выстаивалась без доступа света для исключения наработки АФК по фотохимическому каналу.

В качестве объектов исследования использовались сульфат, оксалат и ацетат уранила ($\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$), а также сульфаты магния, железа, хрома, меди и тория ($\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, FeSO_4 , $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CuSO_4 и $\text{Th}(\text{SO}_4)_2$) марки «ос. ч». Навеска соли контролировалась весовым методом (с помощью аналитических весов для полумикроанализа) и растворялась в 100 мл приготовленной ранее дистиллированной воды, а затем выстаивалась в течение часа в темноте. После этого растворы закисались серной кислотой марки «ос. ч» до значения $pH = 2,50$ и повторно выстаивались в течение суток.

Водородный показатель водных растворов солей контролировали с помощью pH -метра марки 1280 фирм «Пиколло» и «Экотест-120»,

преимущество которого состоит в возможности измерения параметра без испускания в исследуемый раствор хлорида калия, что исключает необходимость учета изменения ионной силы растворов в ходе эксперимента. Погрешность прибора не превышает $\pm 0,02$ в единицах pH .

Анализ водных растворов металлов переменной валентности на содержание в них АФК проводился на анализаторе жидких проб «ЛИК-2», в котором для определения концентрации пергидроксильного ион-радикала $\text{HO}_2^{-(*)}$ использовалась хемилюминесцентная реакция [4–10]. Контроль содержания $\text{HO}_2^{-(*)}$ в растворе проводился по интенсивности свечения при взаимодействии люминол-геминового реактива с анализируемой пробой. Люминол-геминовый реактив готовился перед проведением исследования и не менялся в ходе эксперимента.

Анализатор жидких проб «ЛИК-2» был выбран для регистрации АФК, как наиболее подходящий для исследования процессов самоиндукции активных форм кислорода в воде и водных растворах, поскольку за короткое время проведения анализа (длительность одного измерения не превышает 2 мин) возможно определение ион-радикалов $\text{HO}_2^{-(*)}$ и $\text{O}_2^{-(*)}$ концентрацией до 10^{-12} моль/л, что существенно снижает порог определяемой концентрации $\text{HO}_2^{-(*)}$ по сравнению с такими широко используемыми методами анализа, как масс-спектрометрия и ИК-спектрометрия (более, чем на 5–6 порядков). Кроме того, анализатор «ЛИК-2» позволяет осуществлять раздельное определение свободных и связанных радикалов, что невозможно при использовании других методов анализа. Существенные преимущества данного хемилюминометра — его компактность, малые габаритные размеры и возможность использования в полевых условиях непосредственно на месте контроля аварийных выбросов).

Влияние геомагнитного поля Земли на генерацию АФК в водной среде исследовалось по его вариационным характеристикам, определяемым K -индексом, база данных которого формируется метеорологической станцией Москвы, а также по изменению магнитного поля по трем направлениям: широтному, меридианному и вертикальному. Данные заносились в единую базу данных и анализировались с использованием программы «Excel».



Определение параметров электрического и магнитного полей непосредственно в месте проведения эксперимента осуществлялось по измерителю параметров электрического и магнитного полей (ВЕ-МЕТР-АТ-002) — среднеквадратических значений напряженности электрического и магнитного полей в полосе частот 5–400 кГц.

Для изучения влияния наработки АФК в водных растворах металлов переменной валентности под действием электромагнитных волн использовался генератор высокочастотных сигналов ГЗ–117, который обеспечивает создание переменных электрического и магнитного полей в широком интервале частот (2–200 МГц) регулятором выходного напряжения электрического и магнитного полей.

Вихревое электромагнитное поле создавалось генератором вихревых электромагнитных волн (генератор Авраменко) [11, 12]. Параметры поля контролировались по показаниям датчика, в устройстве которого предусмотрена магнитная развязка, чувствительная к изменению параметров создаваемого вихревого электромагнитного и магнитного полей. Параметры синусоидальных электрического и магнитного полей определялись по показаниям измерителя ВЕ-МЕТР-АТ-002.

В качестве более мощной установки, предназначенной для создания вихревого электромагнитного поля, использовалась экспериментальная установка, принцип действия которой основан на создании электромагнитных неустойчивостей объемной монополярной плазмы, формируемой в атмосфере объемными структурами коронирующих электродов [4, 13]. Установка располагалась в нескольких десятках метров от места проведения анализа, а контроль параметров электромагнитных излучений, генерируемых установкой, осуществлялся по методикам согласно [4, 10].

Изучение самоиндукции АФК в водных растворах за счет радиационно-химических превращений проводилось с использованием α -, β - и γ -активных препаратов, содержащих изотопы ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{137}Cs и ^3H . Контроль изотопного состава оценивался на основе показаний сцинтилляционного счетчика.

Оценка влияния когерентного ИК-излучения на динамику пергидроксильных ион-радикалов $\text{HO}_2^{(*)}$ в водных растворах сульфата уранила про-

водилась с использованием гелий-неонового лазера милливаттной мощности (ИЛГИ-503).

Экспериментальное подтверждение процессов обмена электронами между водой и внешней средой осуществлялось с использованием широкополосного генератора электромагнитных излучений ГШ-6.

При отработке методики полевого экспресс-контроля солей урана в природных водах использовались спиртовые растворы органических комплексонов: 8-оксихинолин, 2,2-дипиридил, 1,10-фенантролин, 2,3,5-трифенилтетразолий хлористый марки «х. ч.», а в качестве растворителя — этиловый спирт марки «для хроматографии».

Градуировка анализатора «ЛИК-2» по пергидроксильному ион-радикалу $\text{HO}_2^{(*)}$ осуществлялась путем анализа водных растворов перекиси водорода с диапазоном концентраций 10^{-3} – 10^{-12} моль/л, так как известно [14], что при содержании H_2O_2 в воде в концентрациях 10^{-6} моль/л и ниже она находится в диссоциированном состоянии в виде $\text{HO}_2^{(*)}$. Общий вид градуировочной зависимости приведен на рис. 1.

На начальном этапе изучение влияния воздействия внешних электромагнитных полей низкой интенсивности на характер и интенсивность генерации активных форм кислорода, в частности перекиси водорода, проводилось в водных растворах металлов переменной валентности.

В качестве объекта исследования использовался уран, относящийся к металлам переменной валентности. Из всех растворимых неорганических солей урана наиболее стабильной и хорошо растворимой уже при комнатной температуре является сульфат уранила [15]. Гидролиз уранил-ионов в воде сдерживался закислением исходного раствора серной кислотой до $\text{pH} = 2,50 \pm 0,02$.

Влияние геомагнитного поля Земли на водные растворы металлов переменной валентности изучалось также по железу, хрому, меди и сравнивалось с данными, полученными для урана. В исследованиях растворы солей готовились по вышеприведенной методике в концентрациях $5,37 \cdot 10^{-6}$ моль/л по FeSO_4 , $9,62 \cdot 10^{-6}$ моль/л по $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ и $1,57 \cdot 10^{-5}$ моль/л по CuSO_4 , что соответствует предельно допустимым концентрациям этих соединений в природных водах [3].

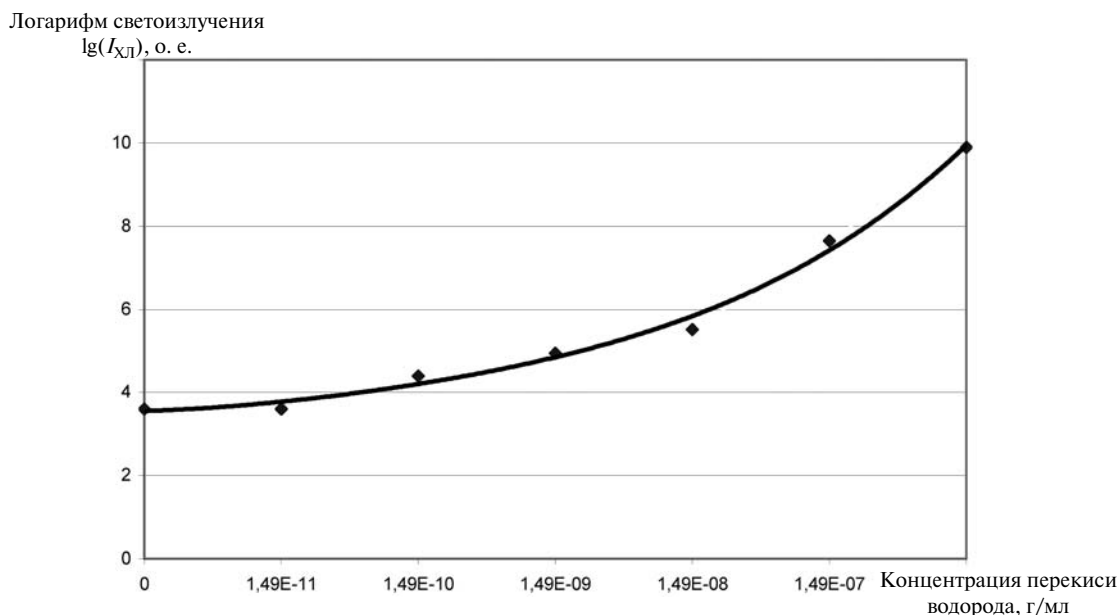


Рис. 1. Зависимость изменения максимальной интенсивности хемилюминесценции от содержания пероксида водорода в воде

На рис. 2 представлена зависимость изменения концентрации пергидроксильного ион-радикала $\text{HO}_2^{(*)}$ в воде для раствора сульфата железа, а на рис. 3 — для растворов сульфата меди и хрома. Анализ данных показывает, что во всех исследуемых растворах наблюдается наработка активных форм кислорода, при этом процесс накопления $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов имеет флуктуационный характер. В зависимости от

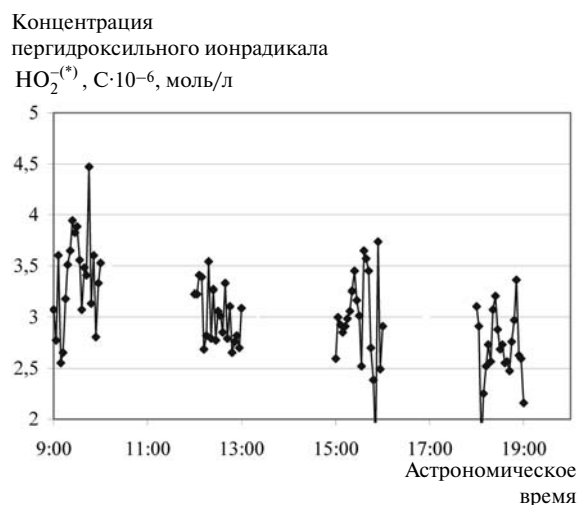


Рис. 2. Зависимость изменения концентрации пергидроксильного ион-радикала $\text{HO}_2^{(*)}$ во времени в водном растворе сульфата железа с концентрацией $5,37 \cdot 10^{-6}$ моль/л

времени суток интенсивность наработки $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов изменяется, причем для разных металлов время формирования максимального количества пергидроксильного ион-радикала различно. Так, для ионов Fe^{2+} наибольшее количество $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов образуется в утренние часы (табл. 1), а для ионов Cr^{3+} и Cu^{2+} максимальная наработка $\text{HO}_2^{(*)}$ наблюдается в вечерние часы. В отличие от всех исследуемых ионов металлов переменной валентности наибольшее количество $\text{HO}_2^{(*)}$ образуется в воде, содержащей ионы UO_2^{2+} , в дневное время (12.00–13.00). Такие различия в продуцирующей способности $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов для ионов металлов переменной валентности связаны, вероятно, с критическими условиями возбуждения электронной системы ион-кристаллического состояния воды. Активность действия таких состояний по наработке АФК проявляется при определенной интенсивности электромагнитного поля Земли, которое характеризуется К-индексом. Вариационный характер зависимостей (см. рис. 2 и 3) свидетельствует о том, что наработка $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов осуществляется в водной среде металлами переменной валентности не в соответствии с классическим механизмом, а в основном под действием вари-



абельных изменений вихревых электромагнитных полей.

Кроме исследования генерации АФК ионами железа, меди, хрома и кобальта, было проведено изучение характера и интенсивности генерации перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила концентрацией $7,56 \cdot 10^{-4}$ моль/л при $pH = 2,50$ в зависимости от изменения геомагнитной активности Земли в разные дни. Результаты исследований представлены в табл. 2. Из приведенных данных следует, что равновесная концентрация перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила варьируется под действием геомагнитного поля Земли. Так, при низких значениях К-индекса (2 и менее) наблюдается уменьшение концентрации перекиси водорода, а при высоких значениях К-индекса (3 и более) — значительный рост содержания H_2O_2 в воде.

Оценка вариабельности равновесной концентрации перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила (концентрация $7,56 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $pH = 2,50$) в дневное время (рис. 5) и влияния циклонической активности на наработку $HO_2^{(*)}$ -ион-радикалов (рис. 4) показала, что содержание $HO_2^{(*)}$ -ион-радикалов водного раствора сульфата уранила возрастает в период антициклонической активности, а в период циклонической активности (18–20 мая) наработка $HO_2^{(*)}$ -ион-радикалов в воде резко уменьшается. Столь же низкие концентрации $HO_2^{(*)}$ -ион-радикалов отмечаются и при отрицательных температурах окружающей среды (ночные заморозки).

отмечаются утренний и вечерний максимумы и снижение содержания $HO_2^{(*)}$ -ион-

Концентрация пергидроксильного ионрадикала $HO_2^{(*)}$, $C \cdot 10^{-6}$, моль/л

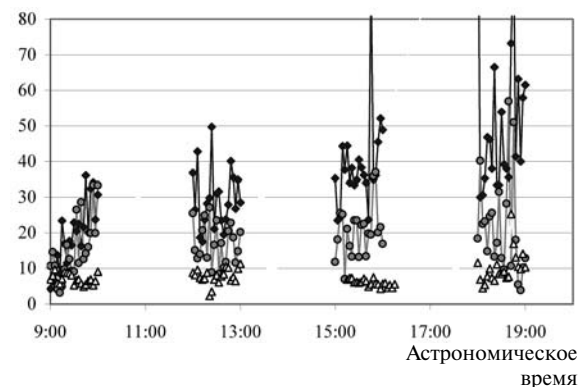


Рис. 3. Зависимость изменения концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{(*)}$ во времени в водном растворе:

- ◇ — сульфата хрома — $Cr_2(SO_4)_3$ ($9,62 \cdot 10^{-6}$ моль/л);
- — сульфата меди $CuSO_4$ ($1,57 \cdot 10^{-5}$ моль/л);
- Δ — сульфата уранила UO_2SO_4 ($7,56 \cdot 10^{-4}$ моль/л)

радикалов в первой половине дня (см. рис. 5). В периоды всплесков геомагнитной активности концентрация $HO_2^{(*)}$ резко увеличивается. Это свидетельствует о зависимости генерации АФК в воде, в том числе и $HO_2^{(*)}$, от геомагнитной активности, что связано с изменением параметров ион-кристаллических ассоциатов и преобразованием геомагнитной энергии в энергию АФК в воде.

Установлено, что зависимость изменения концентрации перекиси водорода в растворах от геомагнитного фона Земли носит куполообразный характер. При этом в невозмущенной атмо-

Таблица 1

Средние значения равновесной концентрации перекиси водорода в водных растворах солей металлов переменной валентности

Водный раствор соли	Концентрация перекиси водорода, моль/л, в часы суток*			
	9.00—10.00	12.00—13.00	15.00—16.00	18.00—19.00
$FeSO_4$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-6}$	$2,97 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$
$Cr_2(SO_4)_3$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$	$3,96 \cdot 10^{-7}$	$5,20 \cdot 10^{-7}$
$CuSO_4$	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$
UO_2SO_4	$7,03 \cdot 10^{-8}$	$7,76 \cdot 10^{-8}$	$5,97 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$

* Время дано в астрономическом масштабе

Таблица 2

Изменение равновесной концентрации перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила под действием геомагнитного поля Земли

Дата	Время измерения	Концентрация H_2O_2 , моль/л	Вариабельность $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}_2}$, отн.ед.	К-индекс
15.03.02	9.00–10.00	$3,63 \cdot 10^{-8}$	0,19	2
	12.00–13.00	$4,93 \cdot 10^{-8}$	0,15	3
	15.00–16.00	$2,91 \cdot 10^{-8}$	0,29	1
	18.00–19.00	$4,14 \cdot 10^{-8}$	0,34	2
18.04.02	9.00–10.00	$7,03 \cdot 10^{-8}$	0,21	3
	12.00–13.00	$7,76 \cdot 10^{-8}$	0,28	3
	15.00–16.00	$5,98 \cdot 10^{-8}$	0,16	3
	18.00–19.00	$1,01 \cdot 10^{-7}$	0,45	4

сфере ($K = 1$) перекись водорода нарабатывается относительно слабо (рис. 6), слабовозмущенная атмосфера ($K = 2-3$) соответствует пиковым значениям концентрации, а при магнитных бурях (сильно возмущенная атмосфера) концентрация $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов вновь уменьшается. В то же время возмущенное состояние

атмосферы сопровождается ростом короткопериодных вариаций концентрации $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов в воде. Такой характер наработки $\text{HO}_2^{(*)}$ свидетельствует о том, что в водной среде происходит преобразование геомагнитной энергии поля Земли в энергию АФК и перекиси водорода в воде.

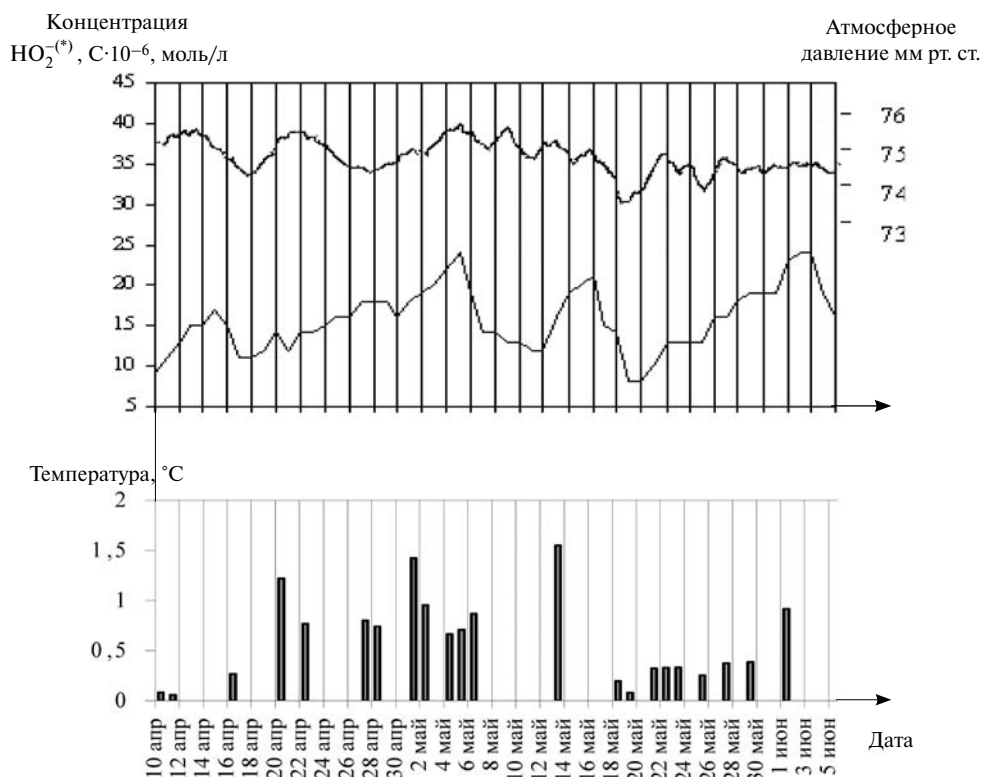


Рис. 4. Зависимость изменения концентрации перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила концентрацией $7,56 \cdot 10^{-4}$ моль/л от времени (10 апреля — 5 июня 2002 года)

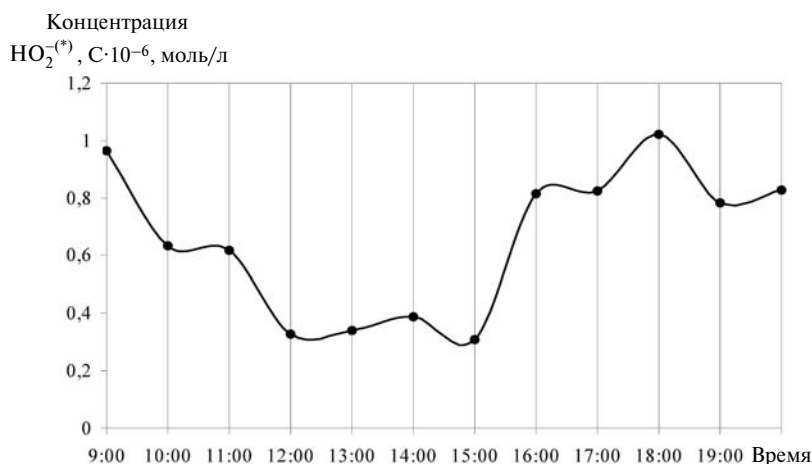


Рис. 5. Зависимость изменения концентрации перекиси водорода от времени суток

Причины подобного поведения концентрации активных форм кислорода в воде не связаны с электромагнитной активностью внешних синусоидальных волн (как оптического, так и более длинноволновых диапазонов), поскольку для оценки их влияния исследования проводились в полностью экранированных от этих излучений системах. Измеренные в таких экспериментах концентрации, если и отличались от неэкранированных, то в сторону больших значений.

Анализ концентрационной зависимости (рис. 7) $HO_2^{(*)}$ -ион-радикалов в водных растворах уранила от водородного показателя свидетельствуют о наличии в системе неравновесных процессов, характеризующихся фазовой нестабильностью (тонкая структура спектра). Подоб-

ные неравновесные процессы наработки $HO_2^{(*)}$ наблюдаются и для других α -активных элементов, например для тория (см. рис. 7), которые, как и уран, относятся к металлам переменной валентности. Такой ход зависимости концентрации перекиси водорода в растворах солей урана во многом повторяет характерные спектры поглощения U(III) и U(IV) в видимом диапазоне длин волн [12], что указывает на наличие фазового перехода в системе, так как интерпретация спектров поглощения ионов урана основана на модели электронных переходов между отдельными уровнями. При сопоставлении зависимости на рис. 7 с потенциалами переходов ионов урана [15] установлено, что генерация перекиси водорода в воде совпадает с интервалами pH

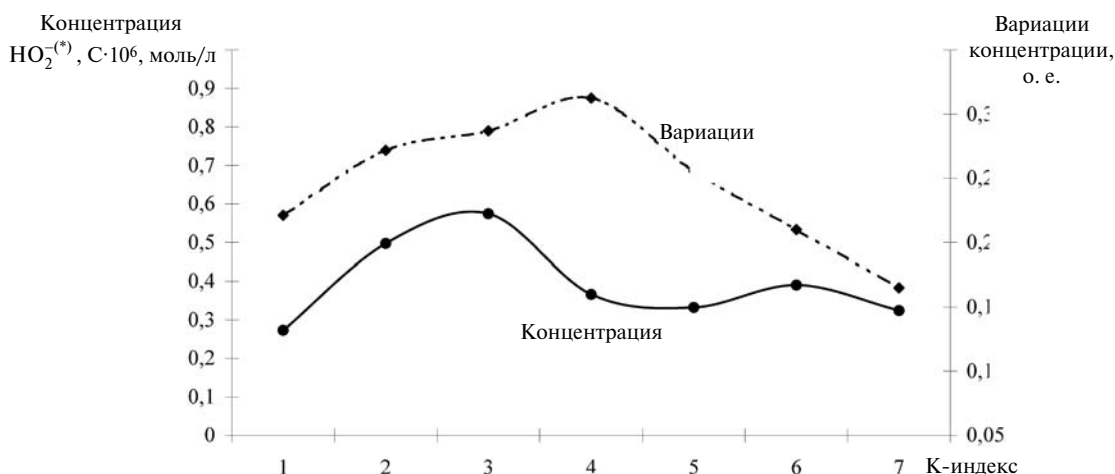


Рис. 6. Зависимость концентрации перекиси водорода от изменения геомагнитного фона

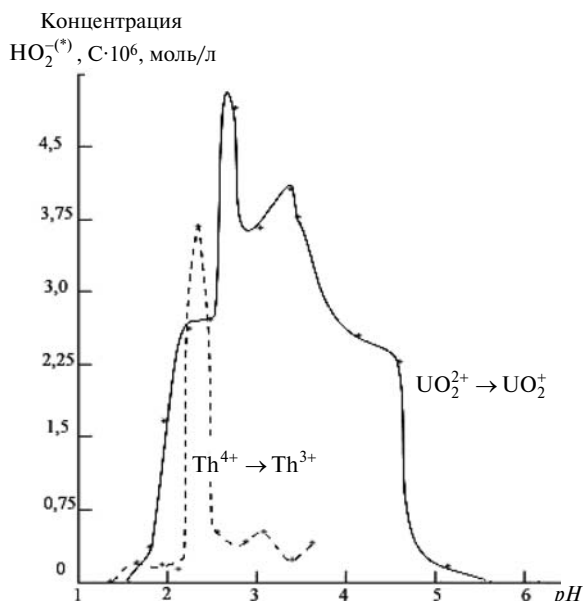
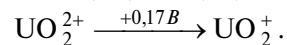


Рис. 7. Зависимость концентрации перекиси водорода в водных растворах сульфата уранила UO_2SO_4 концентрацией $7,56 \cdot 10^{-4}$ моль/л и нитрата тория $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ концентрацией $6,46 \cdot 10^{-5}$ моль/л от водородного показателя среды

перехода одной ионной формы соединения в другую. При этом максимальная наработка пергидроксильного ион-радикала в воде при на-

личии в ней солей урана происходит в точке фазового перехода $\text{U(III)} - \text{U(IV)}$ при $\text{pH} = 2,5$:



Увеличение концентрации $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов указывает на то, что их генерация в воде в присутствии металлов переменной валентности обусловлена динамикой обменных процессов в слабых джозефсоновских структурах связанных состояний воды. Способность подобных структур к концентрированию внешней магнитной энергии позволяет создавать в них избыточный запас химической энергии в виде кислородных ион-радикальных форм. В результате обменных процессов между связанными состояниями вещества в среде при джозефсоновских контактах часть накопленной энергии диссипирует с образованием сольватированных электронов, которые обеспечивают в воде дополнительную генерацию активных форм кислорода. Переход одной ионной формы металла переменной валентности в другую вызван фазовыми превращениями в связанных состояниях воды, сопровождающимися появлением в среде дополнительных активных форм кислорода, при этом процесс генерации пергидроксильных ион-радикалов в воде имеет осциллирующий характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ядерная энциклопедия [Текст].— М.: Изд-во «Благотворительный фонд Ярошинской», 1996.— 656 с.
2. Бекман, И.Н. Уран [Текст]: Учебное пособие / И.Н. Бекман.— М.: МГУ, 2009.— 300 с.
3. Справочник помощника санитарного врача и помощника эпидемиолога [Текст] / Под ред. Д.П. Никитина, А.И. Заиченко.— М.: Медицина, 1990.— 512 с.
4. Головина, А.П. Химический люминесцентный анализ неорганических веществ [Текст] / А.П. Головина, Л.В. Левшин.— М.: Химия, 1978.— С. 248.
5. Гуменюк, В.И. Хемилюминесцентный экспресс-контроль соединений урана в природных водах [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Куликович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 178–186.
6. Вода — космическое явление [Текст] / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАЕН.— М.: Изд-во РАЕН, 2002.— С. 427.
7. Гуменюк, В.И. Анализ существующих механизмов генерации активных форм кислорода в водных растворах уранилов [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Куликович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 186–193.
8. Гуменюк, В.И. Влияние процессов трансформации рассеянной энергии ассоциированных состояний воды на генерацию активных форм кислорода в растворах солей урана [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Куликович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 1 (142).— С. 255–262.
9. Бабко, А.К. Хемилюминесцентный анализ [Текст] / А.К. Бабко [и др.].— Киев: Техника, 1966.— 254 с.
10. Гаврилов А.В. и др. Хемилюминесцентное определение цианид-ионов // Журнал аналитической химии.— 2005. Т. 60. № 11.— С. 1157–1163.
- 11 Патент США № 61463.873 III. Способ и устройство для однопроводной передачи электрической энергии без омических потерь [Текст] / С.В. Авраменко [и др.].— от 10.05.2000.
12. Авраменко, С.В. Потенциальные возможности монополярного холодноплазменного генератора и экология [Текст] / С.В. Авраменко // Тез. докл. Всеросс. науч. конф. «Физико-химические потери сжигания углеводородных топлив».— Москва. 20–25 мая 1998 г.— С. 214.
13. Авторское свидетельство № 2105463. Способ воздействия на процесс атмосферной циркуляции и система для воздействия на процесс атмосферной циркуляции [Текст] / В.А. Протопопов, В.И. Уйбо.— 27.02.1998.
14. Шамб, У. Перекись водорода [Текст] / У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, Р. Вентворс / Пер. с англ. под ред. А.И. Горбанева.— М.: Иностр. лит., 1958.— 578 с.
15. Химия актиноидов (в 3-х т.) Т. 1 [Текст] / Пер. с англ. под ред. Дж. Каца, Г. Сибборга, Л. Морсса.— М.: Мир, 1991. С. 525.

УДК 532 (531+512.81)

М.Р. Петриченко, Д.В. Петросова, М.В. Петроченко

ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС ВОЗДУХОМ КОНСЕРВАТИВНОЙ ПРИМЕСИ (ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОТЫ) СКВОЗЬ СТЕНУ

Фильтрационный перенос консервативной примеси можно использовать для стилизации теплопередачи через ограждающую конструкцию. Роль консервативной примеси при этом играет температура, роль концентрации — безразмерный температурный напор:

$$\theta := \frac{T_h - T}{T_h - T_c} \in [0, 1]; \quad dT = -(T_h - T_c) d\theta.$$

Здесь индексы h и c относятся соответственно к горячей и холодной поверхностям стены (рис. 1).

В условиях плавно изменяющегося фильтрационного движения (поток вдоль оси x ; гидравлические элементы потока — функции ограниченного роста) для средней скорости фильтрации используется формула Дюпюи:

$$v = kJ; \quad J := -\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{g\rho} \right),$$

где k — коэффициент фильтрации, J — градиент пьезометрического напора. По определению и используя предположение о совершенности фильтрующего воздуха, можно записать:

$$\begin{aligned} J &:= -\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{g\rho} \right) = \\ &= -\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{RT}{g} \right) \frac{dT}{dx} = \frac{R(T_h - T_c)}{g} \frac{d\theta}{dx}; \\ v &= \frac{kR(T_h - T_c)}{g} \frac{d\theta}{dx}, \end{aligned}$$

где R — индивидуальная газовая постоянная воздуха ($R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$).

Ниже рассматриваются простейшие задачи, связанные с применением формулы Дюпюи.

Коэффициент фильтрации k предполагается известным [1].

Пусть известны температуры T_h, T_c на плоскостях соответственно $x = 0$ и $x = \delta$. Требуется найти: распределение температуры в стене; тепловые потоки, выносимые фильтрующимся воздухом сквозь стену. Температура считается консервативной (по Верно) примесью, не влияющей на коэффициенты переноса. Уравнение теплопередачи (Фурье) в данном случае имеет вид

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} - s \left(\frac{d\theta}{dX} \right)^2 = 0;$$

$$X := \frac{x}{\delta} \in [0, 1]; \quad s := \frac{\sigma k R (T_h - T_c)}{g v}. \quad (1)$$

Предельные условия:

$$\theta(0) = \theta(1) = 1 = 0. \quad (2)$$

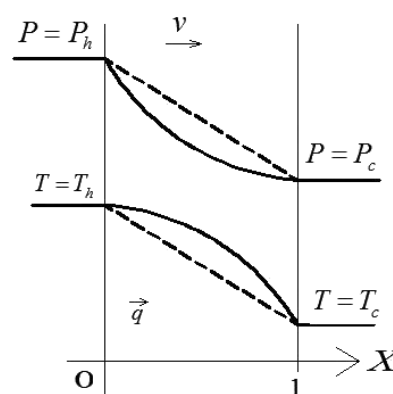


Рис. 1. Схема фильтрации сквозь стенку.

Пунктир — чистая теплопроводность, сплошные линии — фильтрация

Дробь $s = \frac{\sigma k R (T - T_c)}{g v}$ — безразмерна; очевидно, это число подобия — фильтрационный аналог числа Рэлея [1]. Пусть $s = s_0 = \text{const}$. Тогда решение задачи имеет вид

$$\begin{aligned}\theta(X) &= \frac{1}{s_0} \ln \frac{1}{1 - q_0 s_0 X}; \\ q_0 &:= \left(\frac{d\theta}{dX} \right)_{X=0} = \frac{1 - \exp(-s_0)}{s_0}; \\ q &:= \frac{d\theta}{dX} = \frac{q_0}{1 - q_0 s_0 X}; \\ q_1 &:= q(1) = \left(\frac{d\theta}{dX} \right)_{X=1} = \frac{q_0}{1 - q_0 s_0}.\end{aligned}\quad (3)$$

Переменную q естественно называть концентрацией теплового потока.

В силу (3) $q_1 > q_0$. Очевидно, что $\theta(X) \Rightarrow X$, $s_0 \rightarrow 0$, причем двойная стрелка означает равномерную сходимость по переменной X . Выражениям для плотности теплового потока q можно придать симметричный вид, исключив координату X :

$$\begin{aligned}q &= \frac{\exp(s_0 \theta) (1 - \exp(-s_0))}{s_0}; \\ q_1 &= \frac{\exp(s_0) - 1}{s_0}; \\ X &= \frac{1 - \exp(-s_0 \theta)}{1 - \exp(-s_0)}, \quad \theta \in [0, 1].\end{aligned}\quad (3.1)$$

Итак, при малых значениях s_0 , ($s_0 \ll 1$), распределение концентрации $\theta(X)$ такое же, как

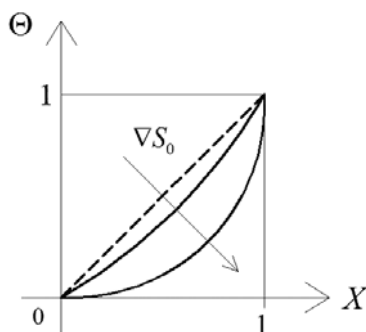


Рис. 2. Влияние фильтрационного числа Рэлея на концентрацию напора (линейная или консервативная фильтрация)

и в твердом теле — линейное. С увеличением s_0 распределение температуры фильтрующегося воздуха отклоняется от линейного (см. рис. 2). Точно так же тепловой поток, передаваемый воздухом по ходу фильтрации, возрастает. При этом

$$\frac{q_1}{q_0} = \exp s_0.$$

По ходу воздушного потока происходит своеобразная фильтрация примеси температуры, причем концентрация $\theta(X) < 1$. Падение температуры наблюдается на выходе из стены. При этом одновременно увеличивается концентрация q/q_0 теплового потока, т. е. «вынос» теплоты из стены. В размерных переменных

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (T_h - T_c) q(X) = \frac{\lambda}{\delta} (T_h - T_c) \frac{q_0}{1 - q_0 s_0 X},$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха.

Пусть $k(X) = k_0 f(X)$; $f(X) > 0$, $X \in (0, 1)$. Тогда $s = s_0 f(X)$, где $s_0 := \frac{\sigma k_0 R (T_h - T_c)}{g v}$. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d^2 \theta}{dX^2} - s_0 f(X) \left(\frac{d\theta}{dX} \right)^2 = 0. \quad (1.1)$$

Предельные условия — прежние, (2). Тогда

$$\frac{1}{q(X)} = \frac{1}{q_0} - s_0 F(X), \quad \text{где } F(X) := \int_0^X f d\tau;$$

$$q(X) = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 F(X)}; \quad q(1) = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 F(1)}; \quad (4)$$

$$\theta(X) = q_0 \int_0^X \frac{dt}{1 - s_0 q_0 F(t)},$$

причем $dF/dX \geq 0$.

Пусть $\theta = 1$. Тогда $X = 1$, и для определения q_0 получаем условие

$$1 = q_0 \int_0^1 \frac{dt}{1 - s_0 q_0 F(t)}. \quad (5)$$

Возможны следующие ситуации:

1. В качестве модельной функции для коэффициента фильтрации, увеличивающегося по ходу фильтрационного потока, можно взять $f(X) = X^m$. Тогда

$$F(X) = \frac{X^{m+1}}{m+1} \Rightarrow +0.$$

И поэтому $q_1 - q_0 \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0$ (практически достаточно $m \geq 3$). Поэтому в поровом пространстве стены с коэффициентом фильтрации, возрастающим по степенному закону вдоль фильтрационного потока, выравнивается концентрация теплового потока; концентрация же температурного напора θ распределяется по линейному закону.

2. Если $f(X) = (1 - X)^m$, т. е. коэффициент фильтрации уменьшается по ходу фильтрационного потока воздуха, то $F(X) = \frac{1 - (1 - X)^{m+1}}{m+1} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} +0$. Вывод аналогичен выводу пункта 1.

3. Если $f(X) = \chi(X_1, X_2)$, $0 \leq X_1 < X_2 \leq 1$, где χ — характеристическая функция отрезка (X_1, X_2) , то

$$F(X) = 0, \text{ для } 0 \leq X \leq X_1;$$

$$F(X) = X - X_1, \text{ для } X_1 < X < X_2;$$

$$F(X) = X_2 - X_1, \text{ для } X_2 \leq X \leq 1.$$

Значит, в силу (4)

$$q = q_0 \text{ при } 0 \leq X \leq X_1;$$

$$q = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 (X - X_1)} \text{ при } X_1 < X < X_2;$$

$$q = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 (X_2 - X_1)} \text{ при } X_2 \leq X \leq 1.$$

Концентрация q_1 конечна, если $s_0 < \frac{1}{q_0(X_2 - X_1)}$.

Определение q_0 производится по формуле (5):

$$1 = q_0 X_1 + \frac{1}{s_0} \ln \frac{1}{1 - s_0 q_0 (X_2 - X_1)} + \frac{q_0 (1 - X_2)}{1 - q_0 s_0 (X_2 - X_1)}.$$

Пусть $X_2 - X_1 = \Delta \ll 1$. Тогда $1 = q_0 + \frac{s_0 q_0^2}{2} \Delta^2 + \dots + \frac{s_0^{m-1} q_0^m}{m} \Delta^m + \dots$, и концентрации теплового потока в начале и в конце фильтрационного потока составят соответственно

$$q_0 = -\frac{1}{s_0 \Delta^2} + \sqrt{\frac{1}{s_0^2 \Delta^4} + \frac{2}{s_0 \Delta^2}} = s_0 \Delta^2;$$

$$q_1 = q(1) = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 F(1)} = \frac{s_0 \Delta^2}{1 - s_0^2 \Delta^3} = q_0,$$

Пусть величина концентрации теплового потока $s_0 \Delta^2 \ll 1$, тогда при $\Delta \ll 1$, $s_0 = O(1)$, $s_0^2 \Delta^3 \ll 1$. Значит, при наличии «тонкой» фильтрующей прослойки в стене и ограниченном значении фильтрационного числа Релея происходит перехватывание (выравнивание) концентрации теплового потока по ходу фильтрации. То же относится и к концентрации температуры.

Если же $s_0 \Delta^2 = O(1)$, $s_0 = O(\Delta^{-2}) \gg 1$ (фильтрационное число Релея велико), тогда $s_0^2 \Delta^3 = O(\Delta^{-1}) \gg 1$, и никакого выравнивания концентрации теплового потока нет. При этом, как видно, концентрация температурного напора почти всюду равна нулю.

2. Подстановка $q = d\theta/qx = q(\theta)$ понижает порядок и линеаризует выражение (1.1):

$$\frac{dq}{d\theta} - s_0 f(X) q = 0. \quad (1.2)$$

Очевидно, что уравнение (1.2) совпадает с необходимым условием минимума для неотрицательных функционалов [2]:

$$S(q) = \int_0^1 \left(\left(\frac{dq}{d\theta} \right)^2 + (s_0 f(X) q)^2 \right) d\theta > 0;$$

$$\Xi(q) = \int_0^1 \left(\frac{dq}{d\theta} - s_0 f(X) q \right)^2 d\theta \geq 0. \quad (6)$$

Именно в действительных фильтрационных потоках $\delta S = 0$, $\delta \Xi = 0$, δ — изотермическая вариация. При этом множество функций, минимизирующих (6), шире, чем класс решений уравнения (1). Действительно, решения (1.2) $q \in X^{(1)}(0, 1)$, а функции, минимизирующие $S(\theta)$, $q \in W_2^{(1)}(0, 1) \supset C^{(1)}(0, 1)$. Какие решения (1.2) могут быть погружены в поле одного из функционалов (6), например $S(q)$? Прежде всего, интересуют решения с «почти постоянной» (медленно изменяющейся) концентрацией теплового потока. Уравнение Лагранжа для $S(q)$ имеет вид

$$\frac{d^2 q}{d\theta^2} = s_0^2 f^2(X) q. \quad (7)$$

Это — уравнение второго порядка, что позволяет ввести лишнее условие мягкости:

$$\left(\frac{dq}{d\theta} \right)_{\theta=0} = 0. \quad (2.1)$$

Тогда, в силу (7), (2) и (2.1) существует первый интеграл:

$$\frac{dq}{d\theta} = \pm s_0 \sqrt{f^2(X)q^2 - f^2(0)q_0^2}. \quad (8)$$

В (8) возникают две ветви решения — положительная и отрицательная. Физический смысл имеет положительная ветвь. В случае $f(X) = 1$ (постоянный коэффициент фильтрации) получается

$$q = q_0 \operatorname{ch}(s_0 \theta), \quad (9)$$

откуда $q_1 = q_0 \operatorname{ch} s_0$. Для определения постоянной интегрирования q_0 надо решить (9):

$$\theta = \frac{1}{s_0} \ln \frac{1 + \operatorname{tg} \frac{s_0 q_0 X}{2}}{1 - \operatorname{tg} \frac{s_0 q_0 X}{2}}. \quad (10)$$

Пусть в (10) $X = 1$, $\theta = 1$. Тогда

$$q_0 = \frac{2}{s_0} \operatorname{arctg} \frac{\exp(s_0) - 1}{\exp(s_0) + 1}.$$

Если поток теплоты минимально изменяется с изменением температурного напора и удовлетворяет условию мягкости (2.1), то из этого следует:

1) $q_0 \cong \frac{\pi}{2s_0}$; $s_0 \gg 1$ и $q_0 = O(1/s_0) \ll 1$. В этом случае в силу (9), (10)

$$q \cong \frac{\pi}{2s_0} \operatorname{ch}(s_0 \theta);$$

$$\theta \cong \frac{1}{s_0} \ln \frac{1 + \operatorname{tg} \frac{\pi X}{4}}{1 - \operatorname{tg} \frac{\pi X}{4}};$$

2) $q_0 = 1$; $s_0 \ll 1$. Тогда в силу (9) распределение концентрации теплового потока вдоль фильтрационного потока практически постоянно и мало отличается от 1. В силу же (10) $\theta = X + O(X^2)$. Получается, что решения задачи на минимум $S(q)$ не противоречат сильным решениям предельной задачи (1), (2);

3) возможен случай фильтрации «неконсервативной» примеси. Тогда фильтрационное число Рэлея зависит от концентрации температурного напора: $s = s(\theta)$. Такая постановка стилизует ситуацию, когда нельзя пренебречь

зависимостью коэффициента вязкости и фильтрации от температуры, например при больших перепадах температуры на плоскостях $X = 0$, $X = 1$. Тогда в силу (1.2)

$$\frac{dq}{d\sigma} - q = 0, \quad (1.3)$$

где $d\sigma = s(\theta)d\theta$.

Решение, удовлетворяющее предельным условиям (2), имеет вид

$$q = q_0 \exp(\sigma);$$

$$X = \frac{\int_0^\theta \exp(-\sigma(t)) dt}{\int_0^1 \exp(-\sigma(\theta)) d\theta}, \quad (11)$$

где постоянная интегрирования q_0 определена так: $q_0 := \int_0^1 \exp(-\sigma(\theta)) d\theta$. Тогда в силу первой из формул (11) получаем

$$q = \exp(\sigma(\theta)) \int_0^1 \exp(-\sigma(\theta)) d\theta.$$

Например, если $s = \operatorname{const} = s_0$, то в силу (11) будет

$$q = \frac{q_0}{s_0} \exp(s_0 \theta);$$

$$X = \frac{1 - \exp(-s_0 \theta)}{1 - \exp(-s_0)};$$

$$\theta = \frac{1}{s_0} \ln \frac{1}{1 - X(1 - \exp(-s_0))};$$

$$q = \frac{1}{s_0} \exp(s_0 \theta) (1 - \exp(-s_0)). \quad (12)$$

Эти формулы получены раньше (см. (3), (3.1)). При малых значениях s_0 , получается $X = \theta$, т. е. распределение температурного напора такое же, как и при «чистой» теплопроводности. Наоборот, при $s_0 \gg 1$ $X \approx 1 - \exp(-s_0 \theta)$, $\theta \approx \ln(1 - X)^{-1/s_0}$. Иначе говоря, при больших значениях фильтрационного числа Рэлея концентрация напора почти всюду равна нулю, кроме левой окрестности точки $X = 1$.

Возможность ослабления полученных решений можно провести по схеме предыдущего пункта. Производящий функционал

$$S(q) = \int_0^\Sigma \left(\left(\frac{dq}{d\sigma} \right)^2 + q^2 \right) d\sigma;$$

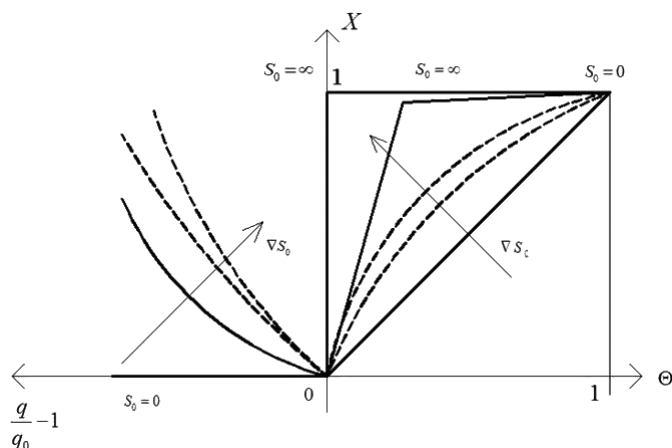


Рис. 3. «Сильное» решение (12) и слабое решение (12') (штриховая линия и сплошная линия) совпадают при $S_0 \rightarrow 0$ и $S_0 \rightarrow \infty$

$$\Sigma = \int_0^1 s d\theta$$

достигает минимума, если

$$\frac{d^2 q}{d\sigma^2} - q = 0,$$

причем можно поставить «лишнее» граничное условие:

$$\left(\frac{dq}{d\sigma} \right)_{\sigma=0} = 0.$$

Тогда

$$q = q_0 \operatorname{ch} \sigma(\theta), \quad q_1 = q_0 \operatorname{ch} \sigma(1).$$

По определению $\sigma(\theta)$ — положительная монотонно возрастающая абсолютно непрерывная функция: $\sigma(\bar{\theta}) > \sigma(\underline{\theta}) > 0$, если $\bar{\theta} > \underline{\theta} > 0$. Значит, всегда $q_1 > q_0$. Это означает, что тепловой поток на наружной (холодной) плоскости ($X=1$) больше, чем на плоскости $X=0$. Происходит перехват теплоты фильтрационным потоком воздуха по ходу фильтрации $0 < X < 1$.

Тогда

$$\begin{aligned} q_0 X &= \int_0^\theta \sec \sigma(t) dt, \\ q_0 &= \int_0^1 \sec \sigma(\theta) d\theta, \end{aligned} \quad (13)$$

$$X = \frac{\int_0^\theta \sec \sigma(t) dt}{\int_0^1 \sec \sigma(t) dt}.$$

Например, в линейном случае $\sigma = s_0 \theta$, и тогда в силу (13)

$$X = \frac{\operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \theta \right) \right)}{\operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \right) \right)};$$

$$\theta = \frac{1}{s_0} \ln \frac{1 + \operatorname{tg} \left(X \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \right) \right) \right)}{1 - \operatorname{tg} \left(X \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \right) \right) \right)}; \quad (12.1)$$

$$q_0 = \frac{2}{s_0} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \right) \right);$$

$$q_1 = \frac{2}{s_0} \operatorname{ch}(s_0) \operatorname{arctg} \left(\operatorname{th} \left(\frac{1}{2} s_0 \right) \right);$$

$$q = q_0 \operatorname{ch}(s_0 \theta).$$

Рис. 3 содержит сравнения распределений концентрации $\theta(X)$, $q(X)$ по формулам (12) и (12.1). При $s_0 \rightarrow +0$ оба решения, сильное (12) и слабое (12.1), практически совпадают; различия начинаются, если $s_0 = O(1)$ и при больших

значениях фильтрационного числа Рэлея концентрация напора почти всюду равна нулю, кроме левой окрестности точки $X = 1$.

Выводы.

1. Фильтрационная диффузия консервативной примеси (температуры и теплового потока) при конечных значениях фильтрационного числа Рэлея $s \gg 1$ приводит к нелинейному распределению температурного напора по ходу фильтрации. При сильной неоднородности изменения коэффициента фильтрации по ходу

фильтрации происходит практически скачкообразное падение температуры на холодной грани. Наоборот, при малых значениях $s \ll 1$, $s = O(1)$ наблюдается такое же изменение температурного напора, как и при чистой теплопроводности (линейное).

2. Распространение консервативной (и неконсервативной) примеси в фильтрационном потоке управляется положительным функционалом, необходимое условие минимума которого совпадает с уравнением переноса примеси в потоке. Вдоль хода фильтрации изменение теплового потока в среднем минимально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соковишин, Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен [Текст]: Справочник / Ю.А. Соковишин, О.Г. Мартыненко. — Минск: Наука и техника, 1982. — 402 с.;

2. Петриченко, М.Р. Экстремальные задачи для фильтрационных потоков [Текст] / М.Р. Петриченко, В.Н. Бухарцев. — Saarbruken, Palmarium academic publ. — 2012. — 84 p.

УДК 621.311.22:075.8

В. Г. Киселёв

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ КОРРОЗИИ

Постановка проблемы

Наружная поверхность подземных металлических коммуникаций (ПМК) в местах дефектов антикоррозионного покрытия или при отсутствии его подвержена интенсивному коррозионному износу, что и обуславливает использование различных мероприятий для их защиты от коррозии. Существенную роль в оценке выбора конкретного вида антикоррозионной защиты и оценке ее эффективности играют коррозионные измерения, включающие, прежде всего, измерение токов, сопротивлений и потенциалов. Особенно велика роль измерения стационарных и поляризационных потенциалов металлических сооружений, находящихся в электролитической среде. Так, например, в соответствии с ГОСТ 9.602–2005 [1] и ГОСТ Р 51164–98 [2], а также с рядом других отечественных нормативных документов, посвященных защите подземных металлических сооружений

от коррозии, для оценки эффективности электрохимической защиты (ЭХЗ) в первую очередь требуется обеспечить поляризационные потенциалы или потенциалы с омической составляющей ПМС в определенных пределах. При этом ГОСТ 9.602–2005 [1] указывает (в справочном порядке) конкретный метод измерения потенциалов — метод модельного электрода с использованием прерывателя тока, в то время как, например, соответствующие европейские нормативные документы требуют прежде всего использовать различные модификации метода отключения. Ситуация в этом направлении еще более обостряется в связи с активным участием нашей страны в международном разделении труда, особенно после вступления в ВТО. Рассмотрению основных проблем, связанных с распространением на нашей территории европейских методов измерения в области катодной защиты, в частности при оценке эффективности ЭХЗ



подземных металлических коммуникаций, и посвящена данная статья.

**Критерии эффективности
электрохимической защиты
при отсутствии опасного влияния
постоянных и переменных блуждающих токов
и методы их определения
в соответствии с ГОСТ 9.602–2005**

В соответствии с пунктом 7.1.1. ГОСТ 9.602–2005 «...Катодную поляризацию сооружений (кроме трубопроводов, транспортирующих среды, нагретые свыше 20 °С) осуществляют таким образом, чтобы поляризационные потенциалы металла относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения находились между минимальным и максимальным (по абсолютному значению) значениями в соответствии с таблицей 9.

Измерение поляризационных потенциалов производят в соответствии с приложением Р»

Таблица 9 ГОСТ 9.602–2005 приводит поляризационные потенциалы для различных материалов (сталь, алюминий, свинец) и границы их использования. В данной статье в силу ограниченности ее объема рассматриваются только поляризационные потенциалы подземных стальных металлических сооружений, которые в соответствии с таблицей могут находиться в пределах от $-0,85$ до $-1,15$ В по медно-сульфатному электроду сравнения.

При этом законодатель указывает конкретный метод измерения поляризационного потенциала с использованием модельного электрода и прибора для измерения потенциала со встроенным прерывателем тока. Несомненным преимуществом данного метода является то, что измерения поляризационных потенциалов методом модельного электрода можно проводить при наличии постоянных блуждающих токов. В то же время эта методика имеет и ряд недостатков, снижающих точность измерения поляризационных потенциалов [3]. К ним следует, прежде всего, отнести следующие факторы:

1) влияние на результаты измерений возможного разброса поляризационных кривых модели и реального объекта. Практика показывает, что в отдельных случаях эта погрешность может составлять нескольких десятых вольта и растет с ростом удельного сопротивления грунта;

2) влияние размера модели. Известно, что при воздействии электрического тока с ростом площади дефекта (при прочих равных условиях) уменьшается его поляризация, что существенно снижает точность измерений на старых коммуникациях с дефектной изоляцией. В этом случае погрешность определения поляризационного потенциала, как известно из практических измерений, может достигать одного вольта и более;

3) влияние электрического поля ПМК. Определить эту погрешность достаточно сложно, так как она зависит от многих факторов и возрастает с ростом удельного сопротивления грунта и плотностью защитного тока. Максимально возможная ее величина оценивается в 70 мВ.

Таким образом, на данном этапе развития техники измерения потенциалов методом модельного электрода с использованием прерывателя тока можно утверждать о принципиальной невозможности повышения точности измерений, во всяком случае, невозможности корректного учета погрешности, обусловленной пунктами 1 и 3. При этом и сама точность определения поляризационного потенциала зависит от множества факторов и с трудом поддается оценке. Все это приводит к практической недоступности определения истинных потенциалов поляризации методом модельного электрода и, следовательно, невозможности корректной оценки эффективности электрохимической защиты от коррозии. В частности, вероятно, это обстоятельство предопределило развитие различных методов отключения для оценки эффективности ЭХЗ в европейских странах вообще и в ФРГ в частности, а также активное проникновение их в нашу практику на современном этапе. Остановимся на рассмотрении метода отключения и основных направлениях его совершенствования несколько подробнее.

**Основные виды погрешностей
при измерении поляризационных потенциалов
методом отключения**

Физическая сущность метода отключения заключается в том, что время релаксации при омической и электрохимической поляризациях различается на несколько порядков. Поэтому при отключении тока за время порядка 10^{-6} с устраняется омическая поляризация. В то

же время электрохимическая поляризация, которая ответственна за скорость перехода и под-разделяется на два вида — активационную и концентрационную, — исчезает гораздо медленнее. Так, например, концентрационная поляризация, играющая основную роль в процессах почвенной коррозии, существенно уменьшается за время порядка более одной секунды. Следовательно, если провести измерения в течение одной секунды или менее, то можно определить электрохимическое перенапряжение. Более подробно с основными принципами метода отключения можно ознакомиться, например, в работе [3]. В то же время использование метода отключения связано с целым рядом осложнений (которые, как правило, можно преодолеть использованием специальной техники):

1) снижением точности измерений поляризационных потенциалов, связанным с отключением активационной поляризации. Величина данного вида погрешности обычно составляет не более 50 мВ [3] и в основном имеет значение при оценке поляризационных потенциалов на алюминиевых или свинцовых электродах. Как известно, коррозия стальных трубопроводов, как правило, происходит при диффузионном контроле по кислороду, что практически устраняет данный вид погрешности измерений. В случае необходимости повышения точности измерений, связанной с учетом активационной поляризации, можно использовать различные методы переключения. Таким образом, можно утверждать, что данный вид погрешности можно снизить до практически приемлемой величины;

2) снижением точности измерений поляризационных потенциалов, связанным с различной величиной катодной поляризации отдельных участков подземных металлических сооружений. Это явление может быть обусловлено, с одной стороны, неоднородностью удельного сопротивления грунта и различной величиной дефектов ПМК, с другой стороны, — значительной протяженностью защищаемых подземных коммуникаций и обусловленной этим неравномерностью их поляризации за счет возникающего в них градиента потенциала при прохождении защитного тока;

3) снижением точности измерения поляризационных потенциалов, связанным с наличием блуждающих токов;

4) снижением точности измерения поляризационных потенциалов при локальной защите подземных металлических сооружений.

Рассмотрим основные мероприятия по повышению точности измерения поляризационных потенциалов методом отключения в аспектах, прежде всего, перечисленных в пунктах 2, 3 и 4, в следующем разделе.

Основные мероприятия по повышению точности измерений поляризационных потенциалов

Обозначим напряжение, приложенное к трубопроводу, относительно бесконечно удаленной земли как U_{ein} . Тогда, если рассматривать участок трубопровода с эквипотенциальной поверхностью (ограниченной протяженности), то можно считать, что для каждого дефекта справедлива формула

$$U_{ein} = U_n + I_n R_n, \quad (1)$$

где U_n — потенциал свободный от омической составляющей (поляризационный потенциал) в месте дефекта; I_n — поляризационный ток для отдельного дефекта при общей силе тока I_1 ; R_n — сопротивление растекания (омическое сопротивление) отдельного дефекта.

Тогда ток, текущий через весь трубопровод, будет определяться следующей формулой:

$$I_1 = \sum_n I_n = \sum_n (U_{ein} - U_n) / R_n. \quad (2)$$

Соответственно после переключения тока с величины I_1 на величину I_2 получим

$$I_2 = \sum_n I_n^* = \sum_n (U_{um} - U_n) / R_n, \quad (3)$$

где I_n^* — поляризационный ток для отдельного дефекта при общей силе тока I_2 ; U_{um} — потенциал переключения, определяемый для одного дефекта формулой

$$U_{um} = U_{ein} - (I_n - I_n^*) R_n. \quad (4)$$

В свою очередь, потенциал, свободный от омической составляющей U_{IR} , для одного дефекта в соответствии с определением потенциала отключения можно вычислить по следующей формуле

$$U_{aus} = U_{IR} = U_{ein} - R_n I_n. \quad (5)$$

Для гомогенного электрода потенциал, свободный от омической составляющей U_{IR} , определяют путем измерения I_1 , I_2 , U_{um} , U_{ein} . Очевид-

но, что в случае гетерогенного электрода мы измеряем те же величины, но они уже относятся ко всему гетерогенному электроду и, следовательно, не совпадают с конкретными значениями поляризации для отдельных дефектов. Это означает, что, определив, например, нижнюю границу защитного потенциала для всего ПМС величиной $-0,85$ В по медно-сульфатному электроду сравнения, мы не можем гарантировать, что все дефекты обладают защитным потенциалом.

В свою очередь, потенциал, свободный от омической составляющей, определяемый методом переключения [3], можно представить в следующем виде:

$$U_{IR} = (U_{ein}I_2 - U_{um}I_1)/(I_2 - I_1). \quad (8)$$

Подстановка в последнюю формулу значений I_2 и I_1 из (2) и (3) после несложных преобразований позволит записать следующее уравнение:

$$U_{IR} = \left(U_{IR} = \left(\sum_n U_n / R_n \right) / \left(\sum_n 1 / R_n \right) \right). \quad (9)$$

Следовательно, поляризационный потенциал гетерогенного электрода представляет собой некоторую среднюю величину, зависящую от поляризации и сопротивления растекания отдельных дефектов. Только в случае равенства всех R_n получается истинное значение поляризационного потенциала на всех дефектах, что с практической точки зрения совершенно невозможно. Совместное использование формулы (9) и модельных представлений для дефекта ПМК позволяет оценить величину поляризации как функцию удельного сопротивления грунта и размера дефекта. Кроме того, это выражение позволяет наметить основные направления по повышению точности измерений поляризационного потенциала методом отключения (переключения). Действительно, непосредственно после отключения защитного тока на дефектах ПМК остается некоторый поляризационный потенциал, который имеет разные значения для различных дефектов. В случае, если один из дефектов поляризован до более отрицательной величины, при отключении тока с него будет стекать положительный ток, создавая омическое падение напряжения и тем самым кажущееся снижения потенциала на наиболее защищенной части ПМС. Аналогичный эффект, но с обратным знаком, будет наблюдаться на части ПМС с наименее отрицательным значением защитно-

го потенциала, что будет приводить к кажущемуся росту защищенности в этой зоне. Соответствующие токи, протекающие в системе, принято называть выравнивающими. Учет их влияния на поляризационный потенциал в случае однородности электролитической среды можно осуществить, используя следующие соображения:

омическое падение потенциала состоит из горизонтальной и вертикальной составляющей;

в случае изменения поляризационного тока изменение горизонтальной составляющей ΔU_r омического падения потенциала, которую легко измерить, будет пропорционально изменению вертикальной составляющей ΔU_b , которая не поддается непосредственному определению.

Таким образом, в силу пропорциональности этих величин в случае наличия защитного тока можно записать для горизонтальной величины омического падения потенциала ΔU_{ein}

$$\Delta U_{ein} \sim [\Delta U_{ein} - U_p], \quad (10)$$

где ΔU_{ein} — потенциал ПМС, измеренный при наличии защитного тока непосредственно над дефектом изоляции, а U_p — поляризационный потенциал ПМС в месте дефекта.

Аналогично для потенциала ПМС U_{aus} , измеренного в той же точке непосредственно после отключения защитного тока, и соответствующей величины горизонтального падения потенциала ΔU_{aus} получаем

$$\Delta U_{aus} \sim [\Delta U_{aus} - U_p]. \quad (11)$$

Из последних двух соотношений путем деления одного на другое имеем

$$\frac{\Delta U_{ein}}{\Delta U_{aus}} = \frac{[U_{ein} - U_p]}{[U_{aus} - U_p]}. \quad (12)$$

Отсюда путем несложных преобразований получаем следующее выражение для поляризационного потенциала в месте дефекта:

$$U_p = U_{aus} - \frac{\Delta U_{aus}}{\Delta U_{ein} - \Delta U_{aus}} (U_{ein} - U_{aus}). \quad (13)$$

Следовательно, наличие выравнивающих токов при использовании метода отключения и обусловленная ими ошибка измерения могут быть исключены путем применения специальной измерительной техники.

Ошибки измерений, вызванные наличием сторонних источников блуждающих токов, также могут быть исключены за счет использования специальных мероприятий. Действительно, если предположить однородность грунта при определении поляризационных потенциалов и отсутствие влияния блуждающих токов на формирование поляризационного потенциала в месте дефекта, то в этом случае необходимо провести, как минимум, два измерения градиентов потенциала, расположенных по пути движения блуждающего тока и вычислить их среднюю величину, что и приведет к разрешению проблемы.

Ситуация несколько осложняется при наличии влияния блуждающих токов на формирование поляризационного потенциала в месте дефекта изоляции. В этом случае рекомендуется проводить уже четыре измерения градиентов потенциала, например ΔU_{r1} , ΔU_{r2} , ΔU_{r3} , ΔU_{r4} , причем один из электродов устанавливается непосредственно над дефектом изоляции, и потенциал U_{ein} также измеряется непосредственно над дефектом изоляции. В таком случае можно говорить о пропорциональности горизонтальной и вертикальной составляющей омического падения потенциала, что приводит к формуле, аналогичной формуле (13), с той лишь разницей, что здесь учитываются отдельные величины градиентов потенциалов. Для большей наглядности без ограничения общности ограничимся двумя градиентами горизонтального потенциала — ΔU_{r1} , ΔU_{r2} . Тогда, повторяя предыдущие рассуждения для поляризационного потенциала, получим следующее выражение, аналогичное формуле (13):

$$U_p = U_{aus} = - \frac{\Delta U_{1aus} + \Delta U_{2aus}}{(\Delta U_{1ein} + \Delta U_{2ein}) - (\Delta U_{1aus} + \Delta U_{2aus})} \times (U_{ein} + U_{aus}). \quad (14)$$

Следовательно, можно утверждать, что и при наличии блуждающих токов, поляризующих металл ПМС в местах дефектов изоляции, путем использования специальной техники измерения можно существенно повысить точность измерения поляризационных потенциалов.

В соответствии с отмеченным в пункте 2 существенную роль при измерениях поляризации

онного потенциала методом отключения играет удельное сопротивление грунта и величина (геометрические размеры) дефекта изоляции. Действительно, чем больше дефект или выше удельное сопротивление грунта, тем меньшая часть потенциала падает на поляризационное сопротивление дефекта изоляции и, соответственно, тем большая его часть падает на омическое сопротивление грунта и покрывных слоев металла. Влиять на сопротивление грунта можно в весьма узких пределах, а уменьшать его сопротивление в местах нахождения ПМС вообще опасно, так как это повышает его агрессивность и стимулирует коррозионные процессы. Единственным разумным вариантом в этом случае является работа по устранению дефектов изоляции, особенно наиболее крупных из них. Теория и практика катодной защиты от коррозии привели к разработке специальной техники измерений, которые были названы интенсивными измерениями; она позволяет, с одной стороны, установить расположение крупных дефектов изоляции для последующего их устранения, с другой стороны, — провести в местах дефектов корректное измерение поляризационных потенциалов. Принято различать три вида интенсивных измерений в зависимости от особенностей их проведения:

интенсивные измерения с участием группы, состоящей из четырех человек. В этом случае производится определение положения трубопровода при помощи специального прибора и измерение как градиента потенциала, так и потенциала включения-выключения по всей протяженности трассы, причем обычно через каждые 5 метров с последующим расчетом величины поляризационного потенциала;

интенсивные измерения с участием группы, состоящей из трех человек. Отличительная особенность данного метода по сравнению с предыдущим — то, что измерения градиента потенциала, осуществляются от бесконечно удаленной земли, что позволяет сократить количество измерений и соответственно уменьшить рабочую группу;

интенсивные измерения с участием группы, состоящей из двух человек. Отличительная особенность данного метода по сравнению с первым — то, что измерения градиента потенциала осуществляются в направлении трассы трубо-



провода, что и позволяет еще более сократить количество измерений и соответственно уменьшить рабочую группу.

Резюмируя сказанное, можно утверждать, что высокое качество проектных и монтажных работ при строительстве подземных металлических коммуникаций, соблюдение всех технологических предписаний и высокий уровень контроля над целостностью антикоррозионных покрытий на всех этапах строительства и эксплуатации ПМС в значительной степени являются гарантией их надлежащей катодной защиты.

При осуществлении локальной защиты от коррозии в связи с наличием остаточного гальванического тока и при отключении защитного тока метод отключения в силу большой ошибки,

обусловленной омическим падением напряжения, становится практически непригодным для измерений поляризационных потенциалов. В этом случае предпочтительнее различные модификации метода модельного электрода, впрочем, и они, как было выяснено ранее, приводят к значительным погрешностям при измерении поляризационных потенциалов.

Рассмотрены основные методы оценки эффективности катодной защиты от коррозии путем измерения поляризационных потенциалов.

Показано, что максимальная точность измерений поляризационных потенциалов при наличии катодной защиты ПМС достигается с использованием метода отключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9.602–2005.** Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Стандартинформ, 2006.

2. **ГОСТ Р 51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от корро-

зии [Текст].— М.: Госстандарт России, 1998.

3. **Киселев, В.Г.** Современные тенденции развития техники измерения потенциалов подземных металлических сооружений [Текст] / В.Г. Киселев // Научно-технические ведомости СПб ГПУ.— 2012. № 2(147), Т. 2.— 265 с.

УДК 378.1

С.Г. Лагушкин

СОВЕТ РЕКТОРОВ ВУЗОВ ЛЕНИНГРАДА: СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ в 70–80-е годы XX века

В 2007 году мы уже обращались к данной теме [1]. Был сделан вывод о том, что Совет ректоров нашего города занимает важное место в формировании региональной государственно-общественной системы управления вузами. В 2012 году исполняется 40 лет со дня создания этих организаций в стране, в том числе и в Ленинграде — Санкт-Петербурге. В связи с этим целесообразно более подробно остановиться на конкретных деталях в деятельности Совета в 70-х — 80-х годов XX века.

Государственная политика СССР в сфере высшего образования в тот период исходила из политических и стратегических целей развития советского общества, которые формулировались политическим руководством страны и партией в целом. Приоритетом образовательной политики была признана ориентация высшего образования на обеспечение научно-технического прогресса. В связи с этим Министерством высшего и среднего специального образования СССР (Минвуз СССР) в конце 60-х годов начинается поиск путей по усовершенствованию системы управления вузами, ее децентрализации. Первой и, как показало время, весьма удачной попыткой в этом направлении стало создание региональных научно-методических советов, которые замыкались на Научно-методическое управление Минвуза РСФСР. Всего было создано 10 региональных советов, в том числе Северо-Западный, располагавшийся в Ленинграде [2]. Его базой стал Технологический институт имени Ленсовета*, а председателем — ректор этого вуза Валентин Борисович Алесковский.

Основную же роль координатора и организатора деятельности высшего образования продолжала играть система партийно-государственных органов. Интересные данные содержатся в диссертационном исследовании Г.А. Быковской [3, с. 24]. Впервые Отдел науки был учрежден при Управлении пропаганды и агитации ЦК КПСС 22 мая 1942 года. Затем последовала череда реорганизаций, в результате которых в конце концов был создан самостоятельный Отдел науки и учебных заведений. Это было в 1955 году.

Изменения структур территориальных партийных органов осуществлялись одновременно с реорганизацией структур ЦК партии в направлении сочетания функционального и производственно-отраслевого принципов и преследовали цель, помимо улучшения решения организационных, кадровых и идеологических вопросов, усиления партийного руководства в области экономики, социальной сферы и культуры [4, с. 134]. В 1965 году Отдел науки и учебных заведений создается в Ленинградском обкоме партии, а в 1969 году — в Ленинградском горкоме [5, с. 84, 470]. В создании Совета ректоров в городе именно эти партийные структуры были самыми заинтересованными. И в дальнейшем, до 1991 года, между ними и Советом были налажены тесные деловые партнерские отношения. Только один факт: за период с 1975-го по 1990 год в обкоме и горкоме было рассмотрено более 20 вопросов, связанных с проблемами высшей школы, и хотя часто их формулировка имела идеологическую, партийную окраску, по сути они затрагивали профессиональные стороны деятельности высших учебных заведений**.

* Здесь и далее наименования вузов города приводятся в соответствии с реальным временем событий.

** Подсчитано автором по: ЦГАИПД СПб. Ф. 24. Ленинградский областной комитет партии, Ф. 25. Ленинградский городской комитет партии.

18 июля 1972 года ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление «О мерах по дальнейшему совершенствованию высшего образования в стране» [6, с. 255–262], которое в определенном смысле можно расценивать как движение по пути формирования новой, более демократической системы управления высшим образованием. Она предусматривала более широкое участие в процессе принятия решений прежде всего руководителей высших учебных заведений. В постановлении была определена система мер, направленных на улучшение руководства высшими учебными заведениями и координацию их деятельности, совершенствование учебного процесса, повышение эффективности научной работы, улучшение подготовки и использования научно-педагогических кадров. Документ охватывал практически все сферы и направления работы отечественной высшей школы.

Было признано целесообразным создать в крупных вузовских центрах советы ректоров высших учебных заведений, возложив на них координацию деятельности вузов, обобщение и распространение положительного опыта по организации учебно-воспитательного процесса и научно-исследовательской работы, повышению квалификации преподавателей.

До конца 1972 года Министерством высшего и среднего специального образования СССР были разработаны и осуществлены практические шаги по реализации мер, предусмотренных этим документом, в том числе было подготовлено «Положение о Совете ректоров высших учебных заведений (утверждено приказом министра от 29 декабря 1972 г. № 926) [7, с. 11].

Положением о Совете ректоров определялись основные цели и задачи, направления деятельности, а также типовая структура и полномочия этого органа.

Наряду с традиционной для того периода отечественной истории идейно-политической составляющей, предусматривавшей активное участие руководителей вузов в реализации политики КПСС в области высшего образования и в коммунистическом воспитании молодежи, перед Советами ректоров ставились также важные организационные и практические задачи в области высшего профессионального образования.

Вот некоторые из них:

- разработка предложений по дальнейшему развитию высшего образования в конкретном регионе;

- организация взаимного изучения и обмена опытом работы вузов;

- координация разработки комплексных научных проблем, выполняемых вузами, научно-исследовательской работы студентов и проведение смотров студенческих работ;

- объединение усилий вузов по повышению квалификации преподавателей, организации их стажировки на предприятиях, в учреждениях региона;

- усиление связи вузов с предприятиями, организациями и учреждениями по вопросам производственной практики студентов и стажировки выпускников, изучение использования молодых специалистов в отраслях народного хозяйства;

- объединение усилий вузов в развитии межвузовской учебно-научной базы;

- координация работы вузов по профессиональной ориентации молодежи, организации деятельности подготовительных курсов и отделений, проведению приема на первый курс и др.

Одним из социально значимых направлений деятельности Советов также была разработка мер и предложений по улучшению жилищно-бытовых условий, культурного и медицинского обслуживания студентов, спортивно-массовой работы в вузах.

Советы ректоров на основании этого положения и с учетом региональных особенностей формировались в конце 1972 — начале 1973 годов.

29 декабря 1972 года Минвуз СССР своим приказом № 926 утвердил состав Совета ректоров Ленинграда и его первого председателя — Валентина Борисовича Алесковского [8], который возглавлял это пост до 1977 года и покинул его в связи с назначением ректором Государственного университета им. А.А. Жданова. Его сменил Александр Александрович Вавилов, ректор Электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина), к сожалению, преждевременно скончавшийся в 1983 году. С 1984-го и до 1993 года Совет возглавлял Анатолий Петрович Лукошкин, ректор Института авиационного приборостроения. Это были весьма уважаемые люди, снискавшие личный авто-

ритет среди научной и педагогической общест-венности, известные организаторы высшего образования не только в масштабах города, но и за его пределами.

Валентин Борисович Алесковский (1912—2006 гг.). Ректор Технологического института им. Ленсовета (1965—1975 гг.), ректор Государственного университета им. А.А. Жданова (1975—1985 гг.). Активный участник Великой Отече-ственной войны, был ранен под Пулковом. Член корреспондент РАН, создатель и руководитель научной школы в области химии твердого тела, среди его учеников — многие известные ученые и деятели. Валентин Борисович оказывал боль-шое внимание и поддержку перспективным уче-ным в их делах и начинаниях. Одним из них был Борис Вениаминович Гидаспов, член-коррес-пондент РАН, директор Государственного на-учно-исследовательского института приклад-ной химии, последний первый секретарь Ленинградского обкома КПСС.

Александр Александрович Вавилов (1922—1983 гг.). Ректор Электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина) (1968—1983 гг.). Член-корреспондент АН СССР. Активный участник Великой Отечественной войны. В студенческие годы секретарь парткома института. По мнению профессора Ю.М. Таирова, будучи сам талант-ливым ученым, ректор всесторонне поддерживал актуальные направления исследований, прово-димых в ЛЭТИ, — они и теперь успешно разви-ваются в университете. Это кибернетика, инфор-матика, микроэлектроника, радиоэлектроника, комплексная автоматизация и другие новые для того времени области науки. При нем в ЛЭТИ царили атмосфера новаторства, творчества, а в некоторых областях — и превосходство [9].

Лукошкин Анатолий Петрович (1929 г. р.). Ректор Института авиационного приборострое-ния (1978—1999 гг.). Доктор технических наук, профессор. Инициатор и руководитель многих научных направлений в области радиотехниче-ских систем, их многоканальной помехозащи-щенности. В начале 80-х годов прошлого века ЛИАП был в числе наиболее динамично раз-вивающихся вузов. В 1979 году — председатель комиссии Совета ректоров по научной работе студентов, в 1981 году возглавил Совет по на-учной работе.

К числу важнейших особенностей, определяв-ших условия и характер работы Совета ректоров

вузов Ленинграда, можно отнести: крупные мас-штабы вузовского центра, ведомственную разоб-щенность учебных заведений (19 министерств и ведомств), сложность и остроту региональных проблем, связанных с ролью высшей школы в ре-шении задач социально-экономического развития города, области и Северо-Западного региона.

На момент начала деятельности Совета рек-торов в городе было 41 высшее учебное заведе-ние и 2 филиала московских вузов. В них обуча-лись 273,6 тысяч студентов, трудились 30 тысяч научно-педагогических работников, из которых 1690 имело ученую степень доктора наук и 9700 — кандидата наук. Из 41 вуза только 3 были под-ведомственны Минвузу СССР и 17 — Минвузу РФ, остальные 17 министерств и ведомств име-ли по одному-двум высшим учебным заведени-ям. Ниже предложена таблица, в некотором роде характеризующая потенциал вузов на протяже-нии почти двадцати лет XX века. Справочно при-ведены данные Комитета по науке и высшей школе на начало 2012 г. [10, с. 132].

На эффективность работы Совета большое влияние имели и заместители председателя Со-вета. Особенно это было важно в моменты сме-ны руководства. Первыми заместителями были Константин Павлович Селезнев, ректор Поли-технического института, и Александр Алексан-дрович Вавилов. Они также возглавляли сове-ты — соответственно по техническим наукам и по учебно-методической работе. В дальней-шем заместителями председателя были Влади-мир Александрович Проскуряков (ректор Тех-нологического института имени Ленсовета), Дмитрий Михайлович Ростовцев (ректор Кора-блестроительного института), Юрий Сергеевич Васильев (ректор Политехнического института). В разные годы обозначенного периода времени практически все ректоры, а в особых случаях и проректоры, деканы, руководители подраз-делений крупных вузов, возглавляли советы по направлениям, вели тот или другой участок ра-боты в комиссиях и секциях.

К концу 70-х — в 80-х годах это выглядело следующим образом.

Учебно-методический совет возглавляли: А.А. Вавилов, А.И. Киприанов (Лесотехниче-ская академия), Ю.С. Васильев. Комиссиями в нем руководили В.И. Тимохин, Д.В. Пузанков (Электротехнический институт), В.Р. Окорочков, Г.В. Симаков (Политехнический университет),



Показатели вузов Ленинграда — Санкт-Петербурга

Показатели	1972 год	1990 год	2011 год
Государственные вузы	41	41	51
Негосударственные вузы	—	2	43
Профессорско-преподав. состав	30,0 тыс. чел	33,2	29,5 тыс. чел.*
Доктора наук	1690	2600	5000 *
Кандидаты наук	9,7 тыс. чел.	17,7 тыс. чел.	16,0 тыс. чел*
Кол-во студентов всех форм обучения в государственных вузах	273,6 тыс. чел.	265,2 тыс. чел.	351,7 тыс. чел.
Кол-во студентов в негосударственных вузах	—	—	49,2 тыс. чел.
Прием на 1 курс	79,7 тыс. чел.	53 тыс. чел.	
Выпуск	39,4 тыс. чел.	22,14 тыс.чел.**	92,4 тыс. чел.

* Приведены общие цифры по системе высшего и среднего профессионального образования города

** Количество выпускников только дневного отделения

Л.А. Вербицкая, Ю.Р. Перов (Государственный университет), А.И. Киприанов, В.И. Онегин (Лесотехнический институт), Б.Б. Кудряшов, С.А. Суворов (Горный, Технологический институты), В.П. Панов, В.В. Гурецкий (Северо-Западный политехнический институт), Е.П. Малютин (Государственный университет), Н.П. Смирнов, Л.Н. Карлин (Гидрометеорологический институт), В.С. Кабаков (Инженерно-экономический институт), В.Н. Боронин (Политехнический институт).

Совет по коммунистическому воспитанию возглавляли: Д.М. Ростовцев, А.Д. Боборыкин, Л.А. Вербицкая (Кораблестроительный, Педагогический институты, Государственный университет). Комиссиями при нем руководили Г.В. Воронцов (Государственный университет), Е.Я. Зазерский (Институт культуры), Г.А. Давыдов (Инженерное морское училище), Л.И. Королев (Государственный университет), В.Д. Кобецкий, Н.С. Гордиенко (Государственный университет, Педагогический институт), В.У. Агеев (Институт физической культуры), А.И. Михайлушкин (Инженерно-экономический институт), И.И. Орехов (Технологический институт холодильной промышленности), К.Н. Дьяков, И.В. Проскудин (Институт инженеров железнодорожного транспорта).

Совет по научной работе возглавляли К.П. Селезнев, Ю.И. Уханов (Политехнический

институт), А.П. Лукошкин, О.В. Алексеев (Электротехнический институт). Комиссиями при нем руководили В.Т. Пуляев, В.Н. Красильников (Государственный университет), В.М. Николаев, А.К. Григорьев (Политехнический институт), Ю.М. Таиров, А.Д. Виктор (Электротехнический институт), А.И. Муравьев (Финансово-экономический институт), Л.Я. Терещенко, В.Е. Романов (Институт текстильной и легкой промышленности), Н.Ф. Бондаренко (Сельскохозяйственный институт), С.В. Кулаков (Институт авиационного приборостроения), А.С. Дудырев, С.П. Меркурьев (Технологический институт, Государственный университет), А.Э. Янчевский (Электротехнический институт), Н.М. Проскуряков (Горный институт); Е.В. Кульков, Ю.П. Савельев (Военно-механический институт), К.Ф. Пузыня (Инженерно-экономический институт).

Совет по перспективному планированию и материально-техническому обеспечению возглавлял Ю.А. Лавриков (Финансово-экономический институт). Его комиссиями руководили — О.Б. Цветков (Технологический институт холодильной промышленности), Д.М. Ростовцев, В.П. Ильин, Г.Н. Шоршнев (Инженерно-строительный институт), К.С. Коровин, В.А. Гуляев (Торгово-экономический институт), С.В. Алексеев, Р.С. Орлов (Санитарно-гигиенический медицинский институт).

Совет по контролю за приемом в вузы возглавляли Л.Я. Терещенко, О.А. Терентьев (соответственно Институты текстильной и легкой промышленности, Технологический целлюлозно-бумажной промышленности). Комиссиями при нем руководили С.В. Рябченко, В.А. Суслов, О.И. Яковлева, А.А. Томашевский, И.Л. Мовсесян, (Технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности), В.А. Коноваленко (Электротехнический институт), Н.В. Виноградова (Институт авиационно-го приборостроения приборостроения).

Совет по контролю за деятельностью в студенческих общежитиях возглавлял И.И. Орехов. Его комиссиями руководили А.Н. Царицын (Государственный университет), С.М. Устинов (Политехнический институт).

Совет по гуманитарному образованию возглавлял В.П. Яковлев (Институт театра, музыки и кинематографии).

Структура Совета ректоров, которая из года в год совершенствовалась, изменялась в соответствии с велением времени и задачами, которые оно ставило перед высшим образованием, напрямую была связана с направлениями его деятельности.

Первые состав президиума и организационная структура Совета были утверждены 26 сентября 1973 года и объявлены на расширенном пленарном заседании, которое проводилось в Актовом зале ЛПИ. К этому моменту Совет сформировался практически полностью, определились основные направления его работы. В структуру Совета были включены действовавшие ранее в городе подразделения Северо-Западного научно-методического Совета Минвуза РСФСР, некоторые городские специализированные комиссии и советы, имевшие непосредственное отношение к высшей школе. Основными структурными звеньями стали: президиум и специализированные советы и комиссии по направлениям деятельности. В практику вошли проведение в течение учебного года от двух общих пленарных заседаний Совета и до десяти заседаний его президиума.

Ректор Государственного университета профессор Г.И. Макаров возглавил совет по естественным наукам. В этом же университете начал работать под руководством проректора профессора Л.И. Селезнева совет по общественным и гуманитарным наукам. Совет занимался вопро-

сами, представлявшими особый интерес для идеологических партийных структур, — мировоззренческим содержанием общенаучных и, что интересно, специальных дисциплин. Одновременно с созданием учебно-методического совета в его состав была введена комиссия по контролю за ходом приема в вузы, действовавшая в городе уже много лет. Работой комиссии руководил ректор Горного института профессор Л.Н. Кель. В поле зрения комиссии были не только непосредственно прием на первый курс, его организационное и методическое обеспечение, но и работа по профориентации, деятельность подготовительных отделений и многое другое.

Существенную роль в формировании и становлении Совета ректоров наряду с Университетом им. А.А. Жданова, Технологическим им. Ленсовета и Электротехническим им. Ульянова (Ленина) институтами сыграл Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. На базе ЛПИ формировались одни из основных структур — совет по техническим наукам, а затем совет по научной работе и учебно-методический совет. В разные годы в период 70-х — 80-х годов XX века в Совете трудились многие политехники: В.Р. Окороков и Г.В. Симаков в учебно-методическом совете возглавляли секцию научно-методического обеспечения учебного процесса; В.Н. Боронин возглавлял комиссию по проблемам подготовки специалистов для зарубежных стран; В.М. Николаев и А.К. Григорьев в совете по научной работе возглавляли секцию по прикладным исследованиям и координации деятельности проблемных и отраслевых лабораторий; В.А. Коноваленко в совете по контролю за приемом в вузы возглавлял комиссию по координации деятельности подготовительных отделений; С.М. Устинов в совете по контролю за деятельностью в студенческих общежитиях возглавлял комиссию по жилищно-бытовым проблемам.

В работе комиссий и секций Совета принимали участие не только руководители института. Деканы ведущих факультетов, многие заведующие кафедрами включались в состав временных групп, готовивших вопросы для обсуждения на пленарных заседаниях и заседаниях президиума Совета ректоров.

Впервые организационная структура Совета ректоров вузов Ленинграда как официальный документ встречается в виде Приложения к от-



чету о его работе за 1974/1975 учебный год [11]. Надо полагать, что в ее основе лежала типовая структура, содержащаяся в утвержденном ранее Минвузом СССР Положении о Совете ректоров. Она состояла из Президиума, 6 специализированных советов и 3 комиссий. Существовавшие в этот момент секции (а их реально было 4) в структуру не вошли (Приложение 1). В качестве комментария можно отметить следующее. По сравнению с 1973 годом произошли следующие изменения: совет по техническим наукам возглавил профессор Ю.И. Уханов; комиссию по контролю за ходом приема в вузы — профессор Л.Я. Терещенко. Были созданы новые советы: по повышению квалификации (профессор А.Д. Боборыкин) и по научной работе студентов (профессор Е.А. Непомнящий). Данная структура не в полной мере отвечала многообразию направлений деятельности вузов и нуждалась в дальнейшем развитии. Уже через год она была расширена (Приложение 2). При сохранении количества советов по направлениям и комиссий значительно увеличилось число секций — до 20, в совете по научной работе студентов созданы отделы, а в комиссии по работе в студенческих общежитиях — сектора. Кроме того, в структуре выделялась связь Совета ректоров с Северо-Западным научно-методическим советом. В то же время вне поля зрения совета по общественным и гуманитарным наукам оставались социально-экономические, социокультурные науки. Скорей всего, совет по научной работе студентов либо копировал городской совет по НИРС, либо просто вводил его под свою эгиду.

В соответствии с приказом № 653 от 9 июня 1977 г. министра высшего и среднего специального образования СССР был утвержден новый состав Совета ректоров [12]. В него входили 41 ректор, представители партийных, советских, профсоюзных и комсомольских организаций. Кроме того, членами Совета были главный инженер ЛЭО «Электросила», директор производственного объединения совхозов, заместитель начальника политотдела Ленинградской военноморской базы, заместитель директора института математики АН СССР, заведующий отделом газеты «Ленинградская правда» и 4 студента. Необходимо сделать следующее уточнение. В 70-х—80-х гг. прошлого века Совет ректоров представлял собой общественную организацию

только теоретически. Все члены Совета входили в него по должности. Вновь назначаемые ректоры автоматически становились членами Совета.

Одновременно были внесены изменения в структуру Совета ректоров. К основным подразделениям были отнесены: президиум, специализированные советы по основным направлениям деятельности вузов, их комиссии и секции (Приложение 3). Как отдельное структурное звено выделялся секретариат Совета. Впервые с момента создания Совета ректоров были подробно определены полномочия, сферы влияния, периодичность мероприятий, которые регламентировались по положению, для каждого структурного звена (от президиума до секретариата) специализированных советов. Кроме того, был создан единый совет по научной работе под руководством К.П. Селезнева, в который вошли на правах комиссий советы по общественным и гуманитарным наукам, по техническим наукам и вновь созданная комиссия по медицинским наукам.

Очередной приказ Минвуза СССР № 1042 от 22 сентября 1980 года, утвердивший новый состав Совета ректоров города, не внес каких-либо изменений в структуру [13]. Однако весной 1981 года произошла, на наш взгляд, некоторая «перегруппировка сил». Усилился блок, связанный с научной работой вузов. Константин Павлович Селезнев, оставаясь заместителем председателя, стал курировать вузовскую науку, а совет по научной работе возглавил Анатолий Петрович Лукошкин. Сформированная структура стала базовой для последних десяти лет работы советского Совета ректоров.

Дальнейшее развитие структура получила в середине и в конце 80-х годов (Приложения 4, 5). В ней нашли свое отражение процессы, вызванные принятым государством курсом на перестройку, внедрение новых методов управления с целью интенсификации экономики, демократические преобразования в обществе.

Из заметных нововведений в структуре нужно отметить:

преобразование комиссии по контролю за приемом в вузы города в совет;

создание в совете по научной работе секций по реализации целевых программ — общесоюзной Продовольственной программы и территориально-отраслевой «Интенсификация — 90», а в совете по перспективному планированию

и материально-техническому обеспечению — секции по кадровому сопровождению программы «Интенсификация-90»;

из Совета ректоров был выведен Северо-Западный научно-методический совет в связи с практическим прекращением деятельности.

В таком виде Совет ректоров Ленинграда, его структурные подразделения вошли в 1991 год.

За 20 лет только на пленарных заседаниях Совета было рассмотрено около 30 стратегических вопросов. Они были посвящены состоянию учебной и научно-исследовательской работы, подготовке научно-педагогических кадров, их аттестации, материально-технической базе и перспективам ее развития. Предварительное глубокое изучение проблем с привлечением широкого круга вузовской общественности, представителей академической и отраслевой науки, крупных предприятий и организаций позволяло принимать взвешенные, реалистичные решения, вырабатывать конкретные рекомендации. Достаточно часто подготовленные документы ложились в основу постановлений региональных партийных органов, использовались государственными органами управления высшей школой для решений в масштабах государства и республики. Изучался опыт работы проблемных и отраслевых лабораторий, межотраслевых научно-исследовательских лабораторий, достижения вузов по установлению прямых контактов между высшей школой, промышленностью, отраслевой и академической наукой. Значительное внимание было уделено анализу качества преподавания естественных наук в технических вузах. В начале 70-х годов начинают свою историю постоянно действующие семинары профессорско-преподавательского состава по методике преподавания фундаментальных дисциплин (математика, физика, химия). Многие из них существуют и в настоящее время. Не менее важные вопросы деятельности вузов обсуждались также на заседаниях президиума Совета и специализированных советов. Однако только этим работа не ограничивалась. Руководители Совета, ректоры высших учебных заведений принимали участие в работе Совета экономического и социального развития города и области. Очевидно значение Совета ректоров в деле координации интересов вузов региона с учетом их многоотраслевого подчинения. Особенно это стало важно в самом начале 90-х годов, когда начал фор-

мироваться негосударственный сектор высшей школы.

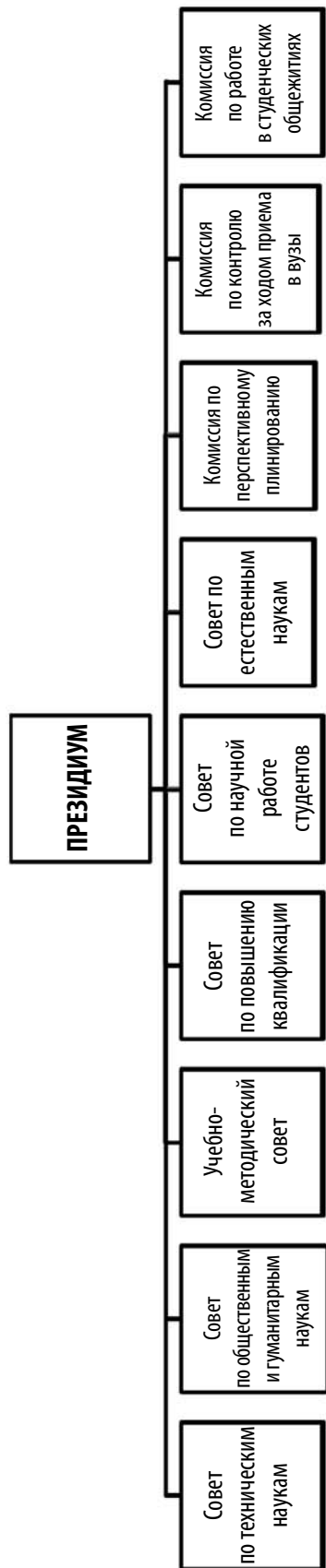
В конце 80-х годов прошлого века Совет ректоров принял активное участие в подготовке и обсуждении документов по перестройке высшего и среднего специального образования в стране. Совет неоднократно принимал в городе руководителей Государственного комитета по образованию Г.А. Ягодина, Ф.И. Перегудова. Были организованы встречи с руководителями вузов города, вузовской общественностью, включая студентов. При обсуждении проекта документов по перестройке высшего и среднего специального образования в стране в Совете ректоров, в вузах города было подготовлено и направлено в Государственный комитет по образованию большое число предложений и замечаний, многие из которых в последующем были учтены.

К началу 90-х годов в структуре высшей школы города не произошло каких-либо существенных изменений. Не изменилось количество вузов, в пределах 300 тысяч человек оставался контингент студентов всех форм обучения. Однако качественные изменения в лучшую сторону по всем направлениям деятельности высшей школы Ленинграда были налицо. Не в последнюю очередь на эти результаты влияла деятельность Совета ректоров. И прежде всего они касались подготовки кадров высшей квалификации. При сохранении общего числа профессорско-преподавательского состава на уровне середины 70-х годов в нем существенно увеличилась доля докторов и кандидатов наук, соответственно с 1690 до 2429 и с 9700 до 13300 человек. Накопленный опыт, проведенная перестройка структуры позволили Совету перейти от простой координации деятельности вузов к решению более сложных, принципиально важных проблем. Совет по направлениям, их комиссии вели работу по координации научных исследований, внедрению результатов в народное хозяйство, подготовке кадров высшей квалификации, перспективному планированию подготовки специалистов с высшим образованием и размещению специальностей в вузах, что, безусловно, положительно сказывалось на качестве подготовки специалистов с высшим образованием.

Однако не следует идеализировать результаты работы Совета в 70–80-е годы: много из намечавшегося осталось нереализованным.

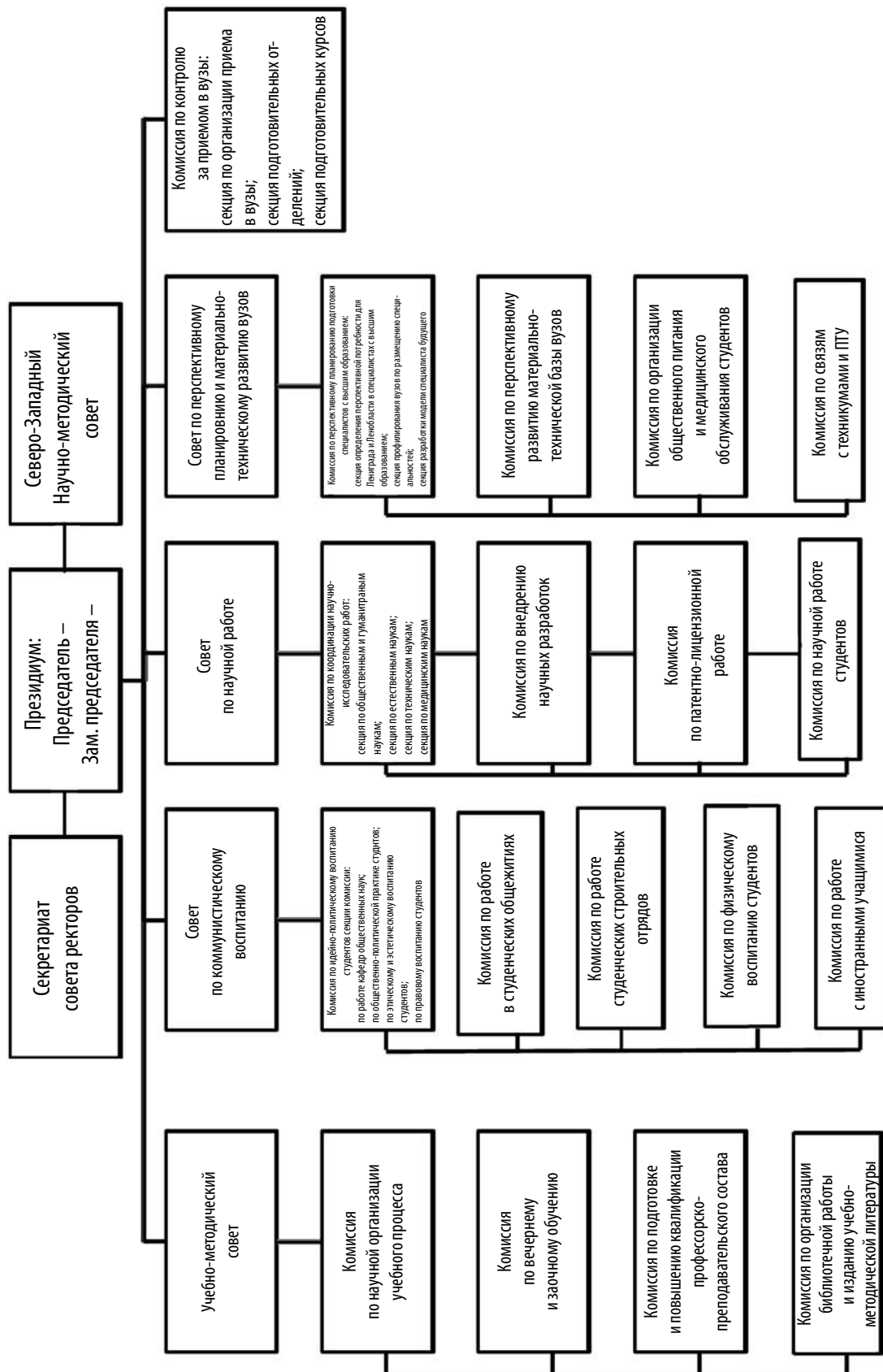
Приложение 1

СТРУКТУРА СОВЕТА РЕКТОРОВ ВУЗОВ ГОРОДА В 1975 г.

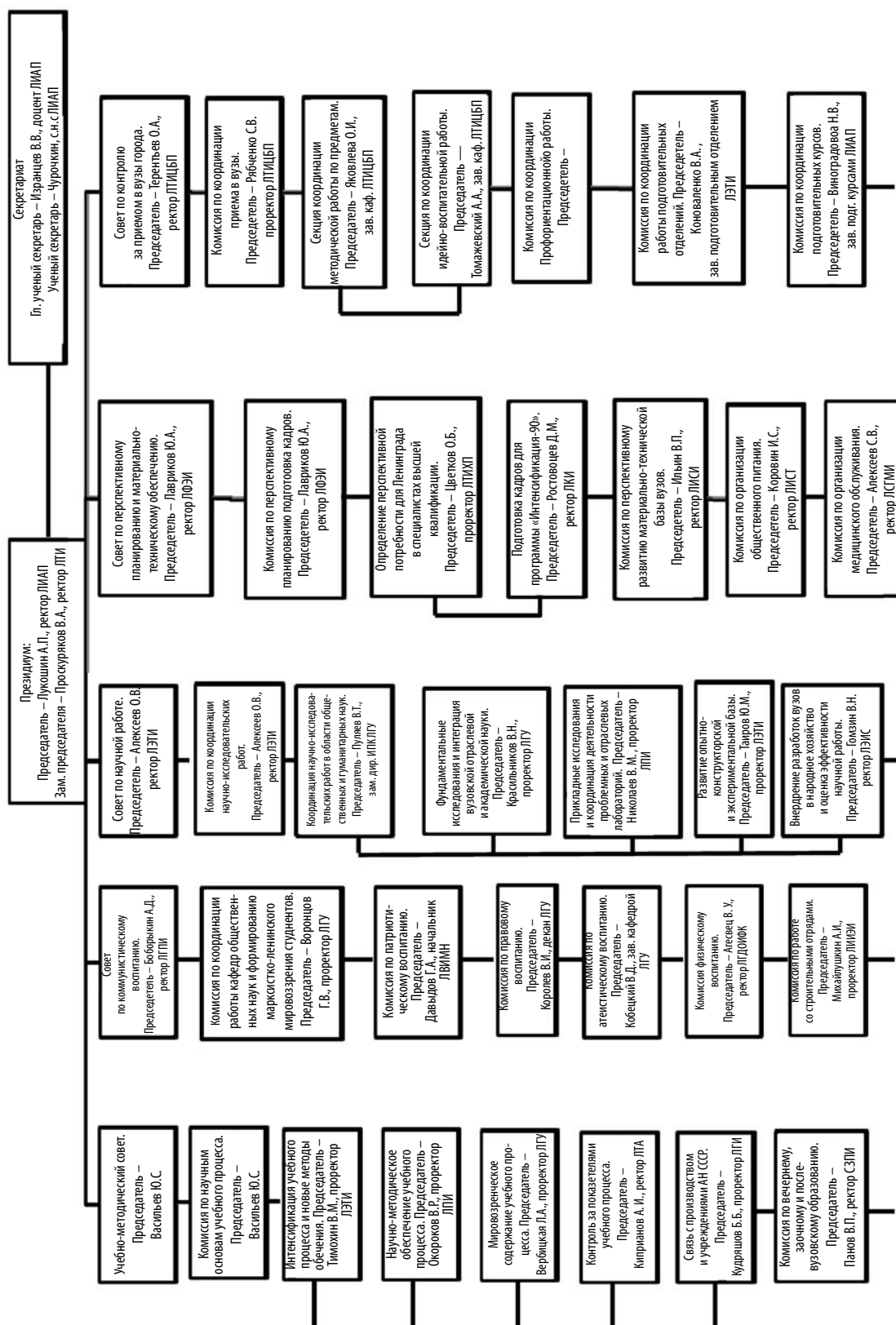


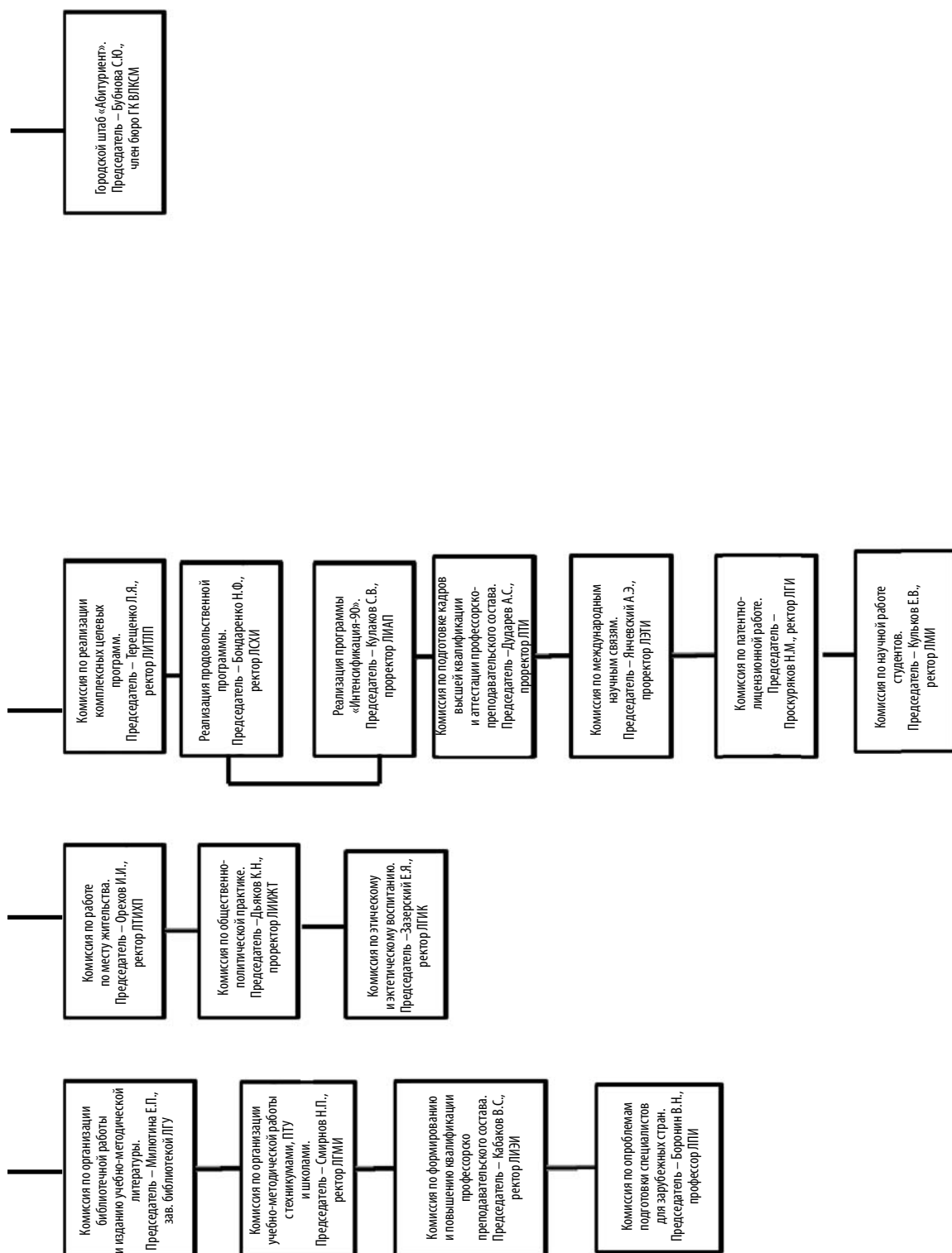
[illegible]

СТРУКТУРА СОВЕТА РЕКТОРОВ ВУЗОВ ГОРОДА В 1977 г.

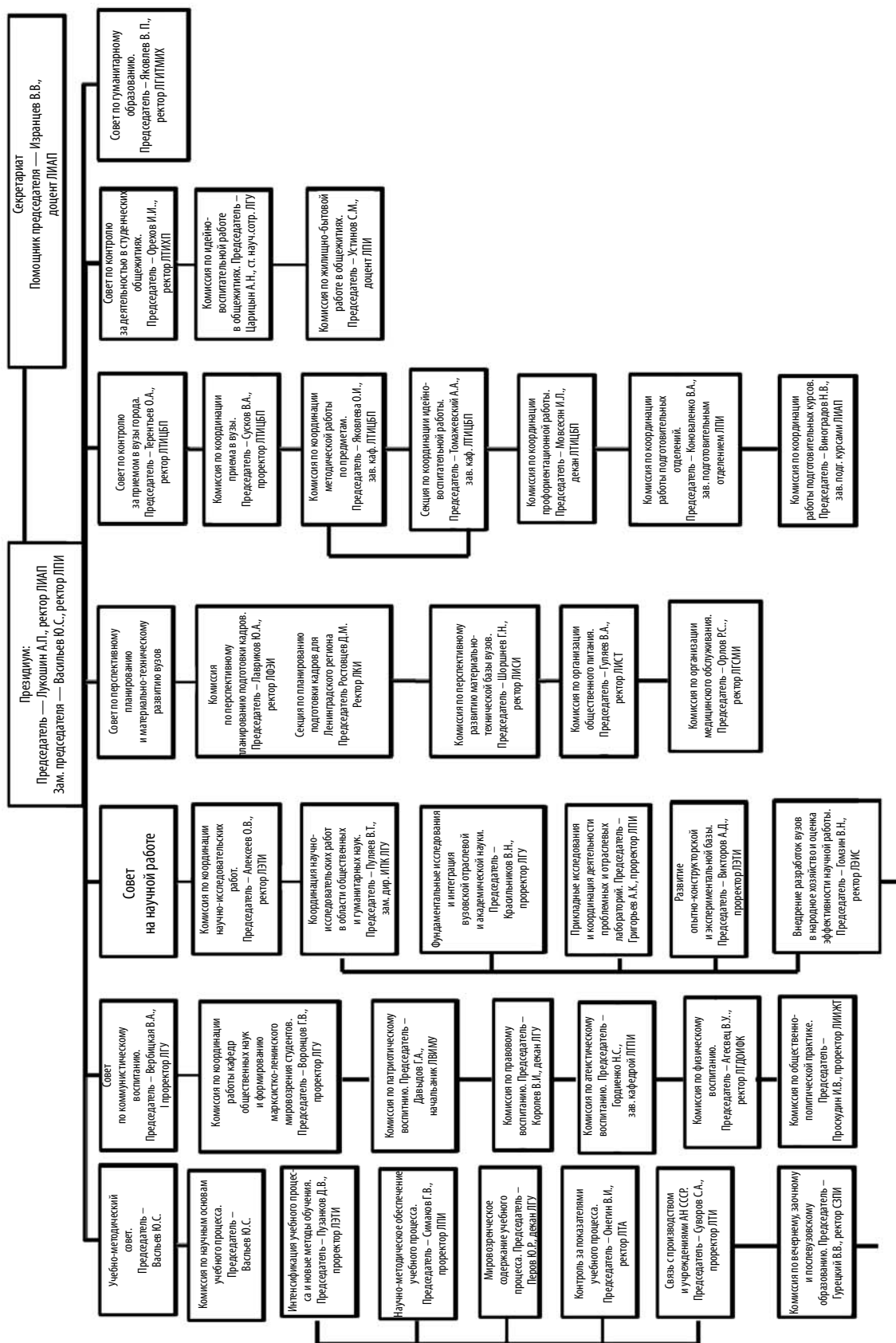


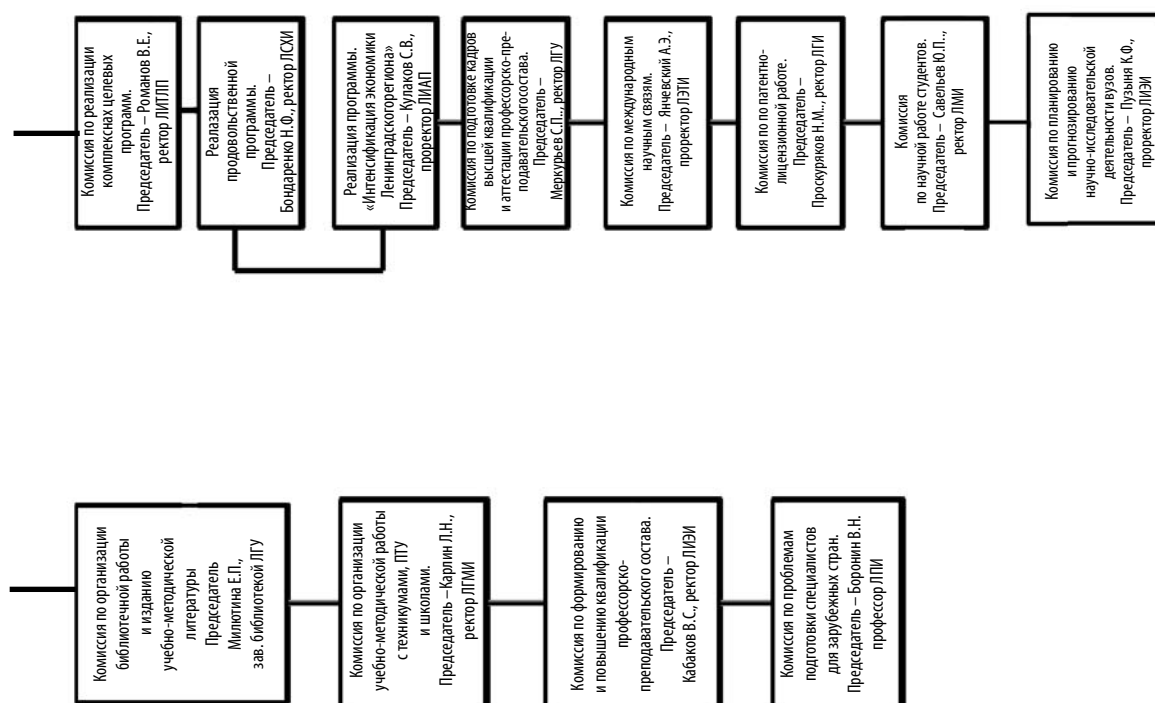
СТРУКТУРА СОВЕТА РЕКТОРОВ ВУЗОВ ГОРОДА В 1985 г.





244





По нашему мнению, во многом это было связано с тем, что намеченные в 1987 году программы реформы образования по многим направлениям выполнялись медленно и не в полной мере. На этот факт указывается и в диссертационном исследовании Н.Л. Яблонскене [14, с. 14]. Если в масштабах страны координатором действий выступал Госкомитет по образованию, то на уровне региона реальных структур и механизмов управления учебным, научным и воспитательным процессом создано не было. Вряд ли мог решать поставленные задачи отдел науки и учебных заведений Плановой комиссии Ленгорисполкома, так как партийные структуры постепенно утрачивали свое влияние. В 1988 году заканчивается история Ленинградского горкома партии, а вместе с ним и отдела науки и учебных заведений, одновременно прекращает свою деятельность отдел науки и учебных заведений обкома партии [15, с. 84, 470]. В 1991 году прекращают свою деятельность Ленинградский обком, первичные партийные организации высших учебных заведений.

Вместе с тем от истории нельзя отказаться, «переписать» ее заново. Необходимо объективно оценивать опыт предыдущих периодов, использовать в настоящем и будущем все позитивные моменты, сделать правильные выводы из допущенных просчетов. Кроме того, любая из проблем нашей жизни, в том числе и в высшей школе, может быть всесторонне осмыслена и разрешена не как локальная, специфическая задача, а лишь в общем контексте развития страны.

В заключение отметим следующие обстоятельства. Первое: при подготовке статьи автор старался иметь в виду два фактора — развитие российского общества в целом (общеисторический фактор) и развитие системы высшей школы (проблемный фактор). И второе: к сожалению, непосредственная деятельность Совета ректоров высших учебных заведений Ленинграда практически не представлена в фондах архивов, по крайней мере, находящихся в нашем городе. По этой причине существенной основой данной работы стали интервью с реальными участниками событий и личный архив автора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лагушкин, С.Г.** История создания, становления и развития Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга [Текст] / С.Г. Лагушкин // Санкт-Петербургский вестник высшей школы. Декабрь 2007. — История становления и развития государственно-общественной системы управления высшей школой. 1975–2005 годы (На материалах Ленинграда — Санкт-Петербурга) [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. — № 5(66).
2. **Интервью с О.П. Никотиным и В.И. Штанько.** Июнь 2012. [Рукопись] // Личный архив С.Г. Лагушкина.
3. **Быковская, Г.А.** Исторический опыт разработки и реализации партийно-государственной научно-технической политики в Российской Федерации (1917–1991 гг.) [Текст]: дисс. ... докт. ист. наук / Г.А. Быковская. — М., 2005.
4. Центральный государственный архив историко-политических документов Санкт-Петербурга (ЦГА-ИПД СПб.) [Текст]: Путеводитель. — М.: Изд-во «Звенья», 2000.
5. **Там же.**
6. **Коммунистическая** партия Советского Союза в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК (1898–1986). [Текст]. — 9-е изд., доп. и испр. Т. 12. — 1971–1975. М.: Политиздат, 1986.
7. **Романов, В.В.** Совет ректоров вузов Хабаровского края Еврейской автономной области. Страницы истории [Текст] / В.В. Романов, А.В. Пасмурцев, В.А. Пасмурцев. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009.
8. **Отчет** о работе Совета ректоров вузов Ленинграда за 1975–1976 учебный год [Рукопись] // Личный архив С.Г. Лагушкина.
9. **Старикова, В.** Капитан корабля. Интервью с проф. Таировым Ю.М. [Текст] / В. Старикова // Электрик. — 2012. № 9 (3107).
10. **Народное хозяйство** Ленинграда и Ленинградской области в 1975 году. [Текст]: Сборник ст. — Л.: Лениздат, 1976.
11. **Отчет** о работе Совета ректоров вузов Ленинграда за 1974–1975 учебный год [Текст] // Личный архив С.Г. Лагушкина.
12. **Отчет** о работе Совета ректоров вузов Ленинграда за 1976–1977 учебный год [Текст] // Личный архив С.Г. Лагушкина.
13. **Отчет** о работе Совета ректоров вузов Ленинграда за 1980–1981 учебный год [Текст] // Личный архив С.Г. Лагушкина.
14. **Яблонскене, Н.Л.** Развитие высшего образования в России в условиях социально-политической трансформации общества (вторая половина 80-х — 90-е гг. XX в.) [Текст]: дисс. ... канд. ист. наук / Л.Н. Яблонскене. — М., 2004.
15. ЦГАИПД СПб. [Текст]: Путеводитель // М.: Изд-во «Звенья», 2000.



УДК 378.1

В.П. Горюнов

ОБ ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ НА «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ФОРУМЕ — 2012»

В период с 28 марта по 1 апреля состоялся «Санкт-Петербургский образовательный форум — 2012», работа которого проходила на площадках ведущих вузов города и в Центральном выставочном зале «Манеж», где была развернута выставка образовательных учреждений высшего, среднего и начального профессионального образования, открытая при участии губернатора Санкт-Петербурга Г.С. Полтавченко и заместителя министра образования и науки РФ С.В. Иванца. Проведены «круглые столы» в государственных университетах — экономики и финансов, телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, технологии и дизайна, аэрокосмического приборостроения, а также в Петровском колледже. В Политехническом университете прошла работа двух «круглых столов» по темам «Создание национальных исследовательских университетов — основа развития отечественной

науки» и «Кадровое обеспечение приоритетных отраслей экономики в аспекте формирующихся в Санкт-Петербурге кластеров».

Важными мероприятиями Форума стали пленарное заседание «Инженеры будущего: от технического творчества до базовой кафедры», проведенное в манеже Первого кадетского корпуса, и конференция «Развитие инженерного образования в России», проведенная в Центральном выставочном зале. С докладами выступили представители Казанского государственного энергетического университета, Московского авиационного института, Южно-Уральского госуниверситета, Уральского федерального университета, Санкт-Петербургского горного университета, Орловского государственного аграрного университета, Финансового университета при Правительстве РФ. Были рассмотрены проблемы инновационной под-



Открытие форума.

Приветственное выступление губернатора Санкт-Петербурга Г.С. Полтавченко



С докладом на конференции выступает заведующий кафедрой философии гуманитарного факультета СПбГПУ В.П. Горюнов

готовки специалистов, научно-исследовательской деятельности магистрантов, внедрения современных образовательных технологий, развития управленческой компетенции, коммерциализации объектов интеллектуальной собственности и др. Политехнический университет был представлен докладом заведующего кафедрой философии В.П. Горюнова на тему «Единство социального и естественного содержания в инженерном образовании».

В докладе обосновывается тезис: необходимо формировать у инженерно-технических ра-

ботников глубокое знание и понимание социальной компоненты в материально-техническом развитии, что вытекает из социальной сущности техники. Только при этом условии можно добиться такого положения, когда в каждом техническом проекте будет определена и учтена его социальная составляющая, за счет чего технический прогресс действительно станет составной частью общественного прогресса, а все технические достижения будут поставлены на службу человеку.

Вел конференцию ответственный секретарь доцент МГУ имени М.В. Ломоносова А.А. Коропченко.

Санкт-Петербургский образовательный форум продемонстрировал прогрессивную поступательность в развитии высшей школы в России. Наиболее важный показатель этой динамики — заметный рост востребованности инженерно-технического образования, что позволяет говорить о позитивных сдвигах в российской промышленности. На этом фоне особенно радует признание Санкт-Петербургского государственного политехнического университета одним из лидеров технических вузов России.

Остается только пожелать расширения предметной представленности нашего университета в очередных образовательных форумах, в том числе и его гуманитарных подразделений.



Ректор СПбГПУ А.И. Рудской у павильона университета со школьниками — гостями форума, будущими абитуриентами



УДК 001.892

А.М. Митрофанов, С.П. Никулина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ НА НИР В ВУЗЕ

Результативность научной деятельности (НД) вуза — важный фактор его внешней оценки со стороны Минобрнауки России, а также объект внутреннего мониторинга со стороны высшего руководства вуза. Одним из механизмов мотивации научно-педагогических работников к повышению результативности НД является возможность их участия в НИР, проводимых в рамках государственного задания (ГЗ). Такой формат финансирования научной деятельности из федерального бюджета в 2012 году используется впервые вместо существовавших ранее тематического плана и так называемого «единого заказа-наряда».

Для национальных исследовательских университетов (НИУ) наиболее важны отчетные показатели по НИОКР, установленные в программе развития НИУ, и функционально связанные с ними показатели мониторинга деятельности вузов [1]: объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника (НПР); общий объем НИОКР; доля доходов от НИОКР из всех источников по приоритетным направлениям развития (ПНР) НИУ в общих доходах НИУ; доля ОКР по приоритетным направлениям развития НИУ в общем объеме НИОКР НИУ; число статей по приоритетным направлениям развития НИУ в научной периодике, индексируемой Web of Science, Scopus и РИНЦ, в расчете на одного НПР.

Наряду с перечисленными, важным показателем, характеризующим ширину спектра научных исследований, служит показатель аккредитации — среднегодовой объем научных исследований по каждой из отраслей наук, соответствующих реализуемым основным образовательным программам в рамках укрупненных групп специальностей. Значение этого показателя должно быть не менее 3 млн руб.

Рассмотрим механизм воздействия госзадания по НИР на результативность научной деятельности вуза на примере СПбГПУ. Последние несколько лет СПбГПУ демонстрирует поло-

жительную динамику результативности НД, достаточную для выполнения обязательств по программе НИУ. Например, годовой объем финансирования НИОКР из всех источников вырос за период 2008–2011 годов в 2,2 раза и достиг величины 876 млн руб. Однако темпы роста значений показателей результативности НД недостаточны, что приводит к постепенному ухудшению позиции СПбГПУ среди НИУ. В 2011 году по показателю «общий объем НИОКР» СПбГПУ занимает 16 место среди 29 НИУ, по показателю «объем НИОКР в расчете на одного научно-педагогического работника» — 25 место, по показателю «доля ОКР ... в общем объеме НИОКР НИУ» — 24 место, по показателю «число статей ... в расчете на одного научно-педагогического работника» — 22 место.

Высшее руководство СПбГПУ считает, что достигнутые показатели результативности НД и их динамика не соответствуют потенциалу университета, и ставит задачу их существенного повышения.

Переход в 2012 году на бюджетное финансирование НИР в форме ГЗ и появление новых регламентирующих документов Минобрнауки РФ дает возможность вузу модернизировать системы распределения указанных бюджетных средств.

В соответствии с инструкциями Минобрнауки РФ [2] внутренний отбор проектов должен производиться специально созданной комиссией в соответствии с разработанным в вузе порядком формирования перечня НИР. Указанная комиссия при экспертизе заявок на включение в перечень НИР должна использовать утвержденную в вузе методику оценки заявок.

Экспертиза заявок включает предварительный этап, на котором проверяется выполнение ряда обязательных требований (соответствие перспективным направлениям развития НИУ, использование результатов в образовательном процессе, наличие в составе исполнителей докторантов, аспирантов, студентов и т. п.), а также

собственно этап формирования рейтинговых оценок заявок. Именно критерии второго этапа экспертизы определяют результативность последующего использования бюджетных средств для развития научной деятельности в СПбГПУ, в том числе в рамках хоздоговоров.

Применявшийся в СПбГПУ в предыдущие годы способ распределения средств тематического плана был распространен на распределение средств ГЗ в 2012 году. В основе этого способа распределения лежат следующие два принципа:

обеспечение ненулевых показателей по объемам НИОКР по всем отраслям наук, соответствующим реализуемым ООП в рамках УГС;

распределение средства ГЗ по научным направлениям (фактически по факультетам) пропорционально результативности научной деятельности в предыдущем году, причем оценка результативности НД в основном (на 90 %) определяется по объемам внебюджетных НИОКР.

Использование этих принципов при разработке методики оценки заявок имеет существенные недостатки. Первый принцип потерял актуальность после замены применявшегося ранее аккредитационного показателя «Среднегодовой объем научных исследований на единицу ННР» (норматив — 18 тыс. руб.) на новый — «Среднегодовой объем научных исследований по каждой из отраслей наук ...» (норматив — 3 млн руб.). Если раньше объем НИР порядка 100 тыс. руб. в год позволял выполнить аккредитационный показатель по некоторой специальности в рамках небольшой выпускающей кафедры, то в новых условиях такой искусственный подход не дает эффекта.

Применение второго принципа действует разнонаправлено. Негативные последствия наступают, если НИР в рамках ГЗ рассматривается научным коллективом как «поощрительный приз». При этом замораживается сложившаяся структура научных направлений университета, происходит демотивация научных работников к расширению спектра направлений исследований. Поскольку объем НИР в рамках ГЗ составляет лишь 10 % от общего объема НИОКР СПбГПУ, эффективность вложения этих дополнительных средств в существующие направления научных исследований весьма мала.

Поддержка научного направления за счет средств ГЗ на период спада хоздоговорной актив-

ности научного коллектива, например во время кризиса соответствующей отрасли, также не может быть однозначно оценена как положительное явление.

Позитивные последствия могут наступить при использовании средств государственного заказа для открытия новых направлений научных исследований как в рамках сложившегося научного коллектива, так и на базе формирования нового научного коллектива.

Объективно существующие тенденции развития реального сектора экономики таковы, что отдельные отрасли развиваются неравномерно, чередуются инновационные периоды и периоды научно-технического застоя, а также возникают новые отрасли, требующие научно-технического сопровождения.

Таким образом, основная ценность государственного задания на НИР с учетом его акцента на фундаментальные и прикладные НИР (не на НИОКР), состоит в возможности отвечать объективно существующей необходимости расширения и трансформации спектра научных исследований, проводимых вузом. Инструментом именно такого использования средств ГЗ является процедура внутривузовского конкурсного отбора заявок, в частности критерии отбора заявок и их значимость.

Анализ рекомендаций Минобрнауки по критериям конкурсного отбора показывает, что их использование позволяет реализовать предложенную стратегию. Например, таким критерием является «актуальность, новизна, научная и (или) практическая значимость сформулированной в заявке научной или научно-технической проблемы, ее соответствие приоритетным направлениям научных исследований федерального, отраслевого, вузовского уровня». В то же время другой критерий — «имеющийся задел по предлагаемой тематике НИР, публикационная активность членов научного коллектива, в том числе по тематике НИР» — сдерживает развитие новых научных направлений через выполнение госзадания.

При формировании критериев оценки в вузе можно воспользоваться возможностью «устанавливать дополнительные критерии оценки заявок на выполнение НИР», предоставленной федеральным положением [3].

Предлагается следующая методика оценки заявок на проведение НИР за счет средств гос-



задания в СПбГПУ. Вводятся две группы критериев (см. таблицу): критерии, оцениваемые экспертным образом (A_i), и критерии, оцениваемые пропорционально измеряемым показателям (B_j). Стратегия ориентации НИР в государственном задании на новые перспективные направления реализуется введением критериев A_1, A_2, B_1, B_3, B_4 , установлением их преобладающих весов, а также используемой формулой расчета рейтинга заявки.

Расчет рейтинговой оценки R по каждой заявке производится по формуле

$$R = \prod_{i=1}^3 A_i \sum_{j=1}^5 B_j.$$

Наряду с совершенствованием критериев отбора заявки целесообразно при распределении ГЗ на НИР придерживаться следующих принципов:

устанавливать относительно короткую продолжительность НИР — 1–2 года, что допускается федеральным положением и уменьшает возможные потери при ошибках в определении перспективных направлений НИР;

Критерии оценки НИР

Обозначение	Показатель	Правило начисления баллов
A_1	Актуальность, научная и (или) практическая значимость сформулированной в заявке научной или научно-технической проблемы	Экспертная оценка в пределах от 1 до 5 с шагом 1
A_2	Новизна сформулированной в заявке научной или научно-технической проблемы по отношению к спектру направлений научных исследований СПбГПУ	Экспертная оценка в пределах от 1 до 5 с шагом 1
A_3	Соответствие сформулированной в заявке научной или научно-технической проблемы приоритетным направлениям научных исследований федерального, регионального, вузовского уровня	Экспертная оценка: 1, 2 или 3
B_1	Доля молодых ученых, специалистов и преподавателей (кандидаты наук в возрасте до 35 лет и доктора наук в возрасте до 40 лет, специалистов и преподавателей без ученой степени в возрасте до 30 лет) в общей численности исполнителей НИР, %	До 10 % — 1 балл; 10–20 % — 2 балла, и т. д.
B_2	Количество студентов и аспирантов, участвующих в выполнении НИР на возмездной основе, чел.	0,5 балла за каждого студента или аспиранта
B_3	Число охраняемых документов на результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученных научным коллективом за 2 предыдущих года, и заявок на их получение, планируемых к подаче в рамках НИР, ед.	Патент — 6 баллов. Полезная модель или промышленный образец — 4. Другие виды РИД — 2. Заявка — 50 % баллов за соответствующий РИД.
B_4	Отношение числа статей, опубликованных за 2 предыдущих года в ходе НИР в индексируемой научной периодике (РИНЦ или Перечень ВАК, Web of Science, Scopus) и планируемых к публикации в рамках НИР, к общей численности исполнителей НИР, ед./чел.	За каждые 0,2 — 1 / 3 балла по статьям в РИНЦ или Перечне ВАК / Web of Science, Scopus.
B_5	Количество диссертаций, защищенных за 2 предыдущих года и планируемых к защите в рамках НИР под руководством (консультацией) работников вуза, принимающих участие в выполнении НИР, ед.	5 / 10 баллов за каждую кандидатскую / докторскую диссертацию

не привязывать работу экспертной комиссии к моменту выхода распоряжения Минобрнауки России о формировании тематики госзадания на очередной год, а проводить ее в течение года в плановом режиме.

Использование предложенной методики сопоставительной оценки заявок при распределении государственного задания на НИР

позволит сконцентрировать бюджетные средства вуза в научно-исследовательских направлениях, соответствующих современным потребностям высокотехнологичных производств, а также в дальнейшем реагировать на изменения этих потребностей за счет корректировки весовых коэффициентов тех или иных показателей методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перечень** показателей оценки эффективности деятельности федеральных государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования и их филиалов [Текст]. — Утвержден зам. министра образования и науки 09.08.2012. — №АК-11/05вн.

2. **Приказ** Минобрнауки России от 03.11.2011 № 596 «Об организации работы по координации проведения фундаментальных и прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполняемых в рамках государственного задания».

3. **Положение** по организации научных исследований, выполняемых подведомственными Минобрнауки РФ учебными заведениями, в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) [Текст]. — Утверждено Комиссией по координации проведения фундаментальных и прикладных научных исследований и экспериментальных разработок. — Протокол № 1 от 8 ноября 2011 г.

4. **Приказ** ректора СПбГПУ от 14.11.2011 № 833/1 «Об отборе НИР, выполняемых в рамках государственного задания на 2012–2014 годы»

УДК 378.1

А.И. Демидов

ПРОФЕССОР В.Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО О ПРОБЛЕМАХ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ

При сборе материалов о деятельности Комиссии по изучению естественных производительных сил России обнаружена неизвестная работа профессора Петроградского политехнического института В.Е. Грум-Гржимайло, опубликованная в «Отчетах о деятельности Комиссии по изучению естественных производительных сил России, состоящей при Императорской Академии наук» за 1916 год*. Ниже приводится полный текст записки профессора В.Е. Грум-Гржимайло, которая остается злободневной спустя почти сто лет.

Профессор ФТИМ *А.И. Демидов*

К вопросу о средней технической школе. Записка проф. В.Е. Грум-Гржимайло

Всякое промышленное предприятие держится своим техническим персоналом. Это мозг предприятия, и забота о подготовке хорошего технического персонала должна стоять на первом плане.

Это общее место. Все и всегда говорят, что наша промышленность слаба, ибо у нас слабо развито высшее техническое образование, среднее и низшее почти отсутствует. При этом общество и правительство настаивают на развитии высшего образования; промышленники же особенно хлопочут о средней технической школе. Средних технических школ у нас мало, и воспитанники их занимаются в жизни совсем не техникой, к которой, казалось бы, готовились.

Неудача среднетехнического образования имеет свою очень глубокую причину, и мне кажется, что, если бы наша Комиссия приложила бы свои усилия для устранения тормозов в развитии средней технической школы, она сделала бы большое и хорошее дело.

* Грум-Гржимайло, В.Е. К вопросу о средней технической школе [Текст] / В.Е. Грум-Гржимайло. — Отчеты о деятельности Комиссии по изучению естественных производительных сил России, состоящей при Императорской Академии наук: Отчет № 3. — Пг.: Тип. Императ. акад. наук, 1916. — С. 59–62.

Средняя школа должна готовить заведующих отдельными производствами. Если вы дадите себе труд поговорить с понимающим свое дело заведующим производством техником, то очень часто, почти всегда, вы не потеряете своего времени даром. Познания лиц, непосредственно стоящих у дела и ведущих его, оказываются чрезвычайно глубокими в той области, в которой они работают. Такой техник не всегда вам объяснит, почему надо делать так, а не иначе, но он вам всегда определенно скажет, как надо поступать для получения наилучших результатов. Такие именно техники ценны для промышленности. Из сказанного следует, что таких техников мы и должны готовить в средней школе, т. е. мы должны готовить узких, но глубоких специалистов своего дела, чем среднетехническое образование в корне отличается от высшего инженерного образования, которое должно давать широкое, общее, скажу даже, философское образование. Наши среднетехнические школы грешат крайней шириной и легковесностью своей программы; потому-то ими все недовольны и все на них жалуются.

После этого длинного предисловия перехожу к сути дела. Во-первых, надо разъяснить, какое отношение имеет подкомиссия о глинах и огнеупорных материалах к вопросам о среднетехническом образовании? Чисто случайное. Создание

среднетехнической школы для подготовки узких, но глубоких специалистов есть задача вообще крайне трудная, но в применении к области глины и к огнеупорным материалам эта задача в настоящую минуту сделалась весьма легко осуществимою. Поэтому ставить Комиссии по изучению естественных производительных сил России задачу решения вопроса о среднетехническом образовании в общей форме — нельзя; использовать же легкость создания среднетехнической школы для подготовки ученых глиноведов — можно и, мне кажется, должно. Изучать глины чрезвычайно полезно. Но дать к тому же толчок для правильной подготовки глиноведов будет еще полезнее. Если бы задача эта не казалась бы мне столь легкою и осуществимою, я не рискнул бы затруднять внимания Комиссии.

Я ставлю себе задачу так: возможно ли создать такую школу глиноведения, пройдя которую молодой человек усвоил бы себе в два года глиноведение не менее глубоко, чем в высшей школе, дабы, выйдя из этой школы, он чувствовал себя в этой области не хуже подготовленным, чем студент, кончивший высшую школу? Если бы это удалось, мы создали бы тип всем нужной средней школы; мы создали бы настоящих техников-специалистов.

Для того чтобы проверить себя, я попробовал исходя из учебного плана Петроградского политехнического института создать учебный план такой школы (см. табл. — ред.). Подготовка слушателей — городское училище.

Если ввести обязательную работу на заводе по приготовлению керамических, стеклянных, изделий или цемента до поступления в школу

не менее года, то мы получим молодых техников, хорошо подготовленных по аналитической химии, печному делу и специалистов по приготовлению искусственных силикатов. Люди с такой подготовкой найдут себе работу и будут полезными работниками.

В заключение я считаю необходимым указать: почему такого типа школа должна удалась теперь и не могла удалась раньше? Какое преимущество имеем мы сейчас сравнительно с недавним прошлым? Оно заключается в следующем: главным рычагом всей керамики, стекла и цемента является печь. Это механизм, сущность работы которого от нас ускользала. Верный путь к пониманию печного дела был дан в 1742 году Михаилом Васильевичем Ломоносовым, но использовать идеи его удалось только теперь. Зато сейчас вопрос о печах решается так просто, расчет печей так элементарен и так безошибочен, так доступен лицам с самыми скромными научными познаниями, что не использовать этого момента, не приобщить к этому делу массы, не поставить керамику в России на должную высоту было бы грешно.

То, до чего техники добиваются в Германии десятками лет упорного труда промышленных исканий, мы можем преподавать в школе. Ученики этой школы явятся в заводы с подготовкой, которой пока не имеют их заграничные конкуренты, и этот момент надо использовать. Говорю так на основании опыта молодых инженеров-металлургов Петроградского политехнического института, успех службы которых в заводах в значительной степени объясняется правильной подготовкой в печном деле.

Предметы:	Лекц.	Лаб.	Упражн.
Физика	10 час.	6 час.	—
Химия общая	8 час	—	—
Аналитическая химия	—	24 «	—
Минералогия и геология	8 «	—	4 час.
Топливо, пирометрия, печи	6 «	3 «	3 «
Минеральная технология:	6 «	6 «	—
глины	6 «	6 «	—
цемента	6 «	6 «	—
стекла	8 «	—	10 «
Общее машиноведение	8 «	—	4 «
Заводские машины	—	—	6 «
Черчение			
Семестровых часов	66 час.	51 час.	27 час.
	144 часа		
Недельных часов при двухгодичном курсе	$16\frac{1}{2} + 12\frac{1}{2} + 7 = 36$ часов		



ПОЛИТЕХНИКИ, ПРОСЛАВИВШИЕ НАШУ СТРАНУ

Павел Павлович Кобеко (1897–1954) — ученый-физик и физико-химик мирового уровня, крупный специалист в области диэлектриков, сегнетоэлектриков, аморфных тел и полимеров, член-корреспондент АН СССР, соратник и друг академиков А.Ф. Иоффе, И.В. Курчатова и А.П. Александрова; кавалер орденов Ленина, Трудового Красного Знамени, Отечественной войны II-степени, медалей «За оборону Ленинграда», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне в 1941–1945 гг.». Его портрет помещен в портретной галерее «Политехники, прославившие нашу страну».

В 1925–1952 годах работал в Ленинградском физико-техническом институте, в 1952–1954 годах — в Институте высокомолекулярных соединений АН СССР. Одновременно с 1930 года преподавал в ЛФМИ — ЛИИ — ЛПИ, с 1935 года — профессор. Во время войны все годы блокады трудился в Ленинграде: был директором Ленинградского филиала ФТИ, членом комиссии при горкоме партии по реализации изобретений по обороне, участник строительства железной дороги через Ладогу и военной переправы по льду под Шлиссельбургом. Заведующий кафедрой физики диэлектриков и полимеров ЛПИ с 1944 года, декан физико-механического факультета в 1943–1945 годах.

М.Ф. Кесаманлы, Ф.П. Кесаманлы

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ КОБЕКО

Член-корреспондент Академии наук СССР Павел Павлович Кобеко — крупнейший советский физик и физико-химик, основатель большой школы исследователей в области молекулярной физики жидкостей, стекол и полимеров, создатель нового направления в механике и электродинамике аморфных тел, получившего всемирное признание.

Академик *А.Ф. Иоффе* [1, с. 291]

Текущий 2012 год является годом 115-летия со дня рождения и 58-летия со дня смерти Павла Павловича Кобеко — ученого-физика, физико-химика мирового уровня, крупного специалиста в области физики твердого тела, аморфных тел и полимеров, член-корреспондента АН СССР, друга и соратника академиков А.Ф. Иоффе, И.В. Курчатова и А.П. Александрова.

Он родился 31 мая (11 июня) 1897 года в городе Вильно (ныне Вильнюс) в семье потомственных дворян и был четвертым ребенком в семье.

Отец Павла Павловича — выпускник Александровского лицея, статский советник Павел Фомич Кобеко, служивший членом Виленской судебной палаты, в 80-х годах XIX века занимал завидное положение в обществе. Его отец (дед Павла Павловича) — тайный советник Ф.Ф. Кобеко — был советником правления Государственного заемного банка, а брат — известный пушкинист, член-корреспондент Российской академии наук Д.Ф. Кобеко — был казначеем

Литфонда, а затем директором Публичной библиотеки. В 1887 году сослуживец Павла Фомича И.И. Сердюков пригласил его в свое имение Кудричи Мстиславльского уезда Могилевской губернии, где жила его семья — мать, брат и сестры. Предполагалось, что перспективный чиновник может составить удачную партию старшей из его сестер — Анастасии. Однако сорокадвухлетнему Павлу Фомичу больше приглянулась младшая сестра — семнадцатилетняя Елена Ивановна Сердюкова. Родственники не стали возражать, и молодые люди были помолвлены, а вскоре и обвенчались в кудричской церкви.

Несмотря на разницу в возрасте, молодая чета жила в любви и согласии. Уже в 1897 году после двух сыновей и одной дочери родился третий сын, названный в честь отца, — Павел Павлович Кобеко. После рождения детей семья Кобеко жила на два дома — зимой в Вильно, а летом Елена Ивановна переезжала с детьми в Кудричи. До десятилетнего возраста Павел, как и полага-

лось у дворян, живших вдали от города, обучался дома, а затем в 1907–1915 годах — в гимназии. Летом 1917 года он был мобилизован (шла Первая мировая война), однако служил недолго: осенью по состоянию здоровья Павел Кобеко был демобилизован и возвратился в деревню. Осенью этого же года он поступил на физико-математический факультет Московского университета, но вскоре обучение пришлось прервать — началась революция. После революции семья Кобеко оказалась практически без средств к существованию. Чтобы прокормить семью Павел Павлович вначале устраивается секретарем в уездный комитет народного образования, а затем начинает работать учителем (единственным!) в Кудричской начальной школе. Сначала школа размещалась в крестьянской избе, а затем местным властям показалось, что дворяне Кобеко занимают слишком большой дом, и им велели потесниться. На освободившееся место была переведена школа.

В 1921 году Павел Кобеко поступает в Горький сельскохозяйственный институт и начинает работать лаборантом в лаборатории органической химии. Вплоть до окончания института Павел Павлович совмещает учебу, работу в лаборатории и преподавательскую деятельность. В 1924 году Кобеко окончил институт и получил звание ученого агронома.

В конце 1924 года Павел Кобеко переезжает в Ленинград. С 1 марта он начинает работать препаратором в физико-технической лаборатории, руководимой А.Ф. Иоффе. По воспоминаниям Иоффе, «Курчатову принадлежало открытие того, что Кобеко был химиком. Кобеко поступил к нему в качестве служителя, который варил олифу и убирал помещения. Но вскоре Курчатов заметил аномалии в поведении своего служителя — тот слишком хорошо все понимал и признался, что имеет диплом высшей сельскохозяйственной школы». После этого П.П. Кобеко стал научным сотрудником. Вскоре Кобеко и Курчатов подружились. Вместе с Курчатовым и Синельниковым Кобеко выполнил свои первые научные работы, посвященные в основном электрическим свойствам диэлектриков.

После переезда в Ленинград Павел Павлович снимает небольшую квартиру, в которой начинает жить вместе с матерью и племянницей. Вскоре на одной из вечеринок он познакомился

с Софьей Владимировной Турской и через некоторое время они поженились. Свадьба не изменила привычки Кобеко: на первом месте у него работа в лаборатории. Его трудовой день обычно заканчивался далеко за полночь.

В конце 1929 году А.Ф. Иоффе поручает И.В. Курчатову и П.П. Кобеко разобраться в явлении аномально высокой диэлектрической проницаемости сегнетовой соли. На первом этапе лидером работы стал Кобеко. Ему после многочисленных попыток удалось разработать технологию выращивания кристаллов сегнетовой соли из насыщенного раствора. Подтвердив высокую поляризуемость полученных образцов, Курчатов и Кобеко проводят серию экспериментов по изучению распределения электрического заряда в кристалле. Для этого они используют ту же методику, что и при изучении «тонкослойной изоляции»: получают и исследуют тончайшие пластинки сегнетовой соли, нарезаая их смоченной в воде тонкой нитью.

Это была чрезвычайно трудная задача. Кристаллы сегнетовой соли из-за их хрупкости и высокой растворимости требуют особой осторожности в обращении. Кроме того, кристаллы очень чувствительны к изменению температуры и могут дать трещину даже от соприкосновения с рукой. На результаты во многом влияют чистота и совершенство кристаллов. Часто работать приходилось по ночам, так как днем проведению экспериментов мешали помехи от искрения контактных проводов проходивших мимо трамваев... Достаточно сказать, что на получение однозначных и воспроизводимых результатов у Курчатова и Кобеко ушло почти четыре года.

Результат их исследований оказался неожиданным. Приступая к экспериментам, Кобеко и Курчатов ожидали обнаружить высоковольтную поляризацию с образованием тонкого приэлектродного слоя большой емкости. Вместо этого они обнаружили существование в кристаллах сегнетовой соли областей спонтанной поляризации. Уже в слабых электрических полях эти области ориентируются по полю, что приводит к возникновению большого электрического момента у всего кристалла. Так был открыт механизм сегнетоэлектрического эффекта.

Результаты исследований П.П. Кобеко и И.В. Курчатова директор Физтеха А.Ф. Иоффе доложил на электротехническом конгрессе в Па-



риже, а затем в Кавендишской лаборатории. «Опыты были проведены исключительно четко, — рассказывал он, — а система кривых, изображавших зависимости эффекта от силы поля, от температуры, с такой убедительностью демонстрировала открытие, что к ним почти не требовалось пояснений. Мой доклад мог быть прочитан на интернациональном языке диаграмм». Работы молодых физиков получили мировую известность, а П.П. Кобеко удостоился престижной тогда премии Наркомата тяжелой промышленности, в систему которого в то время входил Физтех.

Работа по изучению сегнетоэлектрического эффекта стала последней совместной работой Кобеко и Курчатова. В конце 1932 года Игорь Васильевич переключается на ядерную тематику, становится, как пошутил по его адресу Кобеко, капитаном Бомбарделем. Курчатов долго уговаривал своего друга также заняться ядерной физикой, но тщетно. Кобеко выбрал другое направление исследований — аморфные вещества и, в частности, полимеры. «Вещества с большими молекулами произведут переворот в технике», — говорил он.

С начала тридцатых годов как руководитель бригады, а затем и как заведующий лабораторией Кобеко занимается физикой и физхимией аморфных веществ. К празднованию пятнадцатилетнего юбилея образования ЛФТИ выходит небольшая по объему монография Кобеко «Аморфное состояние», в которой он обобщает первые результаты своих исследований в этой области. В предисловии он пишет: «Аморфные тела имеют большое применение в качестве изолирующих материалов. Их электрические характеристики многократно изучались, но до сего времени никак не сопоставлялись с теорией аморфного строения. Работы нашей группы были посвящены в первую очередь выяснению общих закономерностей, позволяющих связать электрические характеристики аморфных диэлектриков с общими закономерностями аморфных тел. Это дало возможность построить общую картину строения аморфных веществ». В 1934 году выходит в свет его следующая монография «Физико-химические свойства диэлектриков». Материалы монографий послужили основой докторской диссертации П.П. Кобеко, которую он защитил в 1935 году.

Под руководством П.П. Кобеко был создан целый ряд новых материалов: морозоустойчивый синтетический каучук, полимерные смазки, не замерзающие при низких температурах. Особо надо отметить создание нового изоляционного материала — эскапона (Синтетический Каучук Пономарева), заменившего закупавшиеся за границей материалы. Название нового материала в честь своего сотрудника — один из многих примеров скромности П.П. Кобеко.

В 1930 году П.П. Кобеко в качестве доцента приступает к чтению лекций по физике и химии диэлектриков на инженерно-физическом факультете Политехнического (в те годы Индустриального) института. Его лекции, в значительной части построенные на экспериментальном материале, полученном автором и его учениками, всегда пользовались большим успехом у студентов. «Он обставлял их довольно своеобразно и просто, — вспоминает Ю. Коптев [4], — демонстрируя несложные, но очень показательные эксперименты, что делало предмет обсуждения доступнее для понимания студентами. Зачастую, чтобы «развеять академическую скуку», он отпускал подходящую шутку или применял образное сравнение.

Мне еще в бытность студентом посчастливилось слушать его лекции. Я помню, как он на конкретных примерах, логично подводил слушателей к выводам довольно сложной формулы, к пониманию физики и химии того или иного процесса, явления. Скорее, это были не лекции, а непринужденные беседы. Обычно он приносил на занятия в карманах массу образцов и технических изделий, работающих во многих новейших устройствах. Что позволяло нам, молодым, понимать всю важность и перспективность этой группы материалов. Благодаря его манере говорить непринужденно и просто, все, о чем он рассказывал, как говорится, доходило до ума и западало в душу». Одновременно с чтением лекций П.П. Кобеко вел практические занятия, руководил дипломными работами. В 1936 году Кобеко утверждается в звании профессора по кафедре «Электрофизика».

К концу 30-х годов Павел Павлович Кобеко вырос в одного из крупнейших советских ученых. В представлении П.П. Кобеко к выборам в члены-корреспонденты АН СССР А.Ф. Иоффе [1] в июне 1941 года писал: «П.П. Кобеко —

крупнейший специалист в ряде вопросов, является одновременно и физиком, и физико-химиком, и химиком. Колоссальная эрудиция. Большая интуиция в разрешении научных и технических проблем, исключительная работоспособность и инициатива создали ему авторитет среди специалистов в области физики, технической физики, физической химии, электроизоляционной, резиновой, оптической промышленности и промышленности пластических масс». Из-за начавшейся войны избрание П.П. Кобеко состоялось только 29 сентября 1943 года.

В начале июля 1941 года, когда фронт стал приближаться к Ленинграду, Президиум АН СССР принял решение об эвакуации ленинградских академических институтов в г. Казань. Павел Павлович имел возможность уехать в тыл, но добровольно вместе с женой Софьей Владимировной и матерью отказался покинуть город. Он организовывал эвакуацию института, затем был назначен научным руководителем филиала, а с июня 1942 года по 1945 год работал в качестве директора Ленинградского филиала Физико-технического института. Одновременно с этим П.П. Кобеко был введен в состав Комиссии по реализации оборонных изобретений, где занимался экспертизой и внедрением предлагаемых проектов.

К этому времени у П.П. Кобеко был уже немалый опыт работы по оборонной тематике. Во время советско-финской войны он вместе с сотрудниками Физтеха изготовил пластиковые «бронешиты» для самолетов, разработал метод борьбы с обледенением самолетов на аэродромах. После продолжительных поисков им была получена жидкость для амортизаторов самолетов обладающая низким температурным коэффициентом вязкости. Во время Великой Отечественной войны эти работы были продолжены. Под руководством Кобеко были разработаны новые высокомолекулярные присадки-загустители, необходимые для работы двигателей в зимних условиях, созданы новые морозоустойчивые смазки.

Еще до войны под руководством П.П. Кобеко был создан новый изоляционный материал — эскапон. Использование эскапона для изоляции высокочастотного кабеля, широко используемого в военной технике, позволило отказаться от зарубежных поставок. Уже в августе 1941 года

в Физтехе был налажен выпуск этого ценного материала. «Гоним эскапон, сколько успеваем», — писал Павел Павлович в одном из писем. Серийный выпуск кабеля на эскапоне при активном участии Павла Кобеко был налажен на заводе «Севкабель», а затем на нескольких заводах в других городах. За проделанную работу П.П. Кобеко получил специальную благодарность по Красной армии и войскам противовоздушной обороны. В 1942 году Кобеко возглавил работы по размагничиванию военных кораблей.

Исключительно важную роль П.П. Кобеко сыграл в налаживании автомобильной трассы через Ладожское озеро зимой 1941—1942 года — Дороги жизни. В ноябре 1941 года сотрудники филиала по заданию командования ленинградского фронта провели первые исследования ладожского льда. Измерялись вязкость льда, его толщина и грузоподъемность, условия пролома. Рекомендации ученых легли в основу выбора маршрута трассы. Однако с началом эксплуатации трассы начались необъяснимые аварии — очень часто автомобили без видимых причин проваливались под лед. Необходимо было провести более глубокое исследование ладожского льда, выполнить его предстояло в кратчайшие сроки и под непрерывным огнем противника.

П.П. Кобеко в короткие сроки разработал методику изучения льда, предложил идею самописца, регистрирующего колебания льда. Н.М. Рейнов придумал конструкцию. Над его созданием работал Ф.И. Марей.

Чтобы не увеличивать нагрузку на мастерские, решили использовать детали от старых телеграфных аппаратов. Доставка деталей с Главного почтамта оказалась нелегким делом: люди истощены, транспорт не работал, а расстояние было немалым — около 20 км. Захватив дневной паек, сотрудники института во главе с директором выступили в поход. Только к вечеру, зато с полными рюкзаками, набитыми деталями, они вернулись домой. Этот путь от Почтамта в Сосновку пришлось проделать не один раз, но приборы были созданы.

Оставалась одна проблема — массивная станина, на которой должен размещаться прибор. «Как-то мы, несколько физтеховцев, шли в раздумье через парк Политехнического института, возвращаясь из стационара, куда помещали самых больных и истощенных сотрудников. Вдруг



взгляд остановился на тяжелой чугунной подставке, к которой крепились трубчатые ограждения клумб.

«— А ведь из этой штуки можно что-то сделать, обточить — и будет неплохая станина!

Было нас четверо дистрофиков, но тут мы почувствовали неожиданный прилив сил. Довольно быстро выковырнули подставку из промерзшей земли и потащили в институтскую мастерскую. Обработали на станке. Получилось!»

Полученный прибор получил название «прогибограф». Нужно было приступить к экспериментам. «Командование дало нам грузовичок, снабдив полушубками и ватными штанами. Вначале четверо сотрудников Физтеха — П.П. Кобеко, Ф.И. Марей, А.З. Левензон и я — отправились на Ладожское озеро. День был очень холодный. Навстречу нам с Ладоги дул леденящий ветер, но мы возбужденно переговаривались, тесно прижимаясь друг к другу в кузове открытой машины.

Для работы мы разместились на берегу близ железнодорожной станции Ладожское Озеро. Строений там не было, но стояло несколько вагонов. Один из них и служил нам жильем. С помощью солдат установили прогибографы на льду и без промедления приступили к измерениям... Остальные сотрудники тоже прибыли вскоре. Они поставили свои приборы в разных точках.

Мешали, правда, морозы. Проруби, в которых устанавливались приборы, часто замерзали, приходилось прорубать их снова и снова. Софья Владимировна Кобеко (жена Павла Павловича) предложила заливать проруби трансформаторным маслом, которое препятствовало бы замерзанию льда...

Наблюдения за льдом шли успешно. Наконец собрали необходимые данные и на основании их уже могли определить закономерности деформации льда, которых раньше не знали. Стала ясна их зависимость от скорости движения машин. Наиболее опасной оказалась скорость около 35 километров в час. При ней собственные колебания льда совпадали с колебаниями, вызванными идущим по льду автомобилем. Амплитуды как бы складывались, возникал резонанс, и лед не выдерживал...

Отчет о нашей работе подробно обсудили в комиссии по оборонным предложениям и передали командованию фронта. Главные выводы

заклучались в том, что на льду озера надо избегать движения автомобилей со скоростью около 35 километров в час, ездить либо медленнее, либо значительно быстрее. По возможности не вести машины колоннами, не делать обгонов на льду. Часто автомобили двигались по параллельным ледяным дорогам. Мы установили, что в этих случаях расстояние между параллельно идущими машинами не должно быть меньше 70–80 метров, а при высоких скоростях (свыше 35 километров, составлять 150–200 метров. Особую осторожность надо соблюдать у берегов, так как именно там происходит отражение свободных волн и наложение их колебательных движений.

Мы определили, какие динамические нагрузки лед выдерживает при разной толщине, составили таблицы. Эти таблицы пригодились не только на Ладоге, но и во время боев по прорыву блокады в январе 1943 года. С их помощью установили, при каких условиях танки могут форсировать Неву по льду...» [6]. Таблицы нагрузок, составленные физтеховцами под руководством П.П. Кобеко, были использованы для переброски техники по льду Финского залива на Ораниенбаумский плацдарм в январе 1944 года.

Во время блокады в полной мере проявились высокие моральные качества Павла Павловича. А.П. Александров [1] вспоминал: «Павел Павлович был для всех остальных как огонь, от которого замерзшие люди впитывают тепло. Он думал только, как спасти людей, спасти других ленинградцев и отстоять город от врага. Делил с товарищами все лишения, не позволяя себе ни малейшей привилегии: все всем поровну — и тяжелый труд, и блокадная пища». Основная проблема в блокадном Ленинграде — голод. Для поддержки сил голодающих сотрудников Физтеха Кобеко разработал методику очистки олифы от находившихся в ней солей свинца и превращения ее в пригодное для употребления льняное масло. «Установка» для производства масла размещалась на кухонной плите в квартире А.П. Александрова. «Приятно смотреть, когда после нескольких порций такого рациона люди оживали на глазах», — писал Кобеко в одном из писем.

«Сколько людей, буквально стоявших на краю могилы, было спасено и здравствует по сей

день благодаря хлопотам Павла Павловича Кобеко!», — вспоминает Н.М. Рейнов. — Случалось, он отдавал часть своего пайка кому-нибудь из ученых, чье положение становилось угрожающим. Ездил на велосипеде на другой конец города, чтобы узнать о судьбе не вышедшего на работу сотрудника. Многим он просто спас жизнь. Так, воспользовавшись случайной оказией, Кобеко перевез на машине в институт уже неспособного ходить от голода С.Я. Никитина, а затем, бережно уложив его на санки, доставил в стационар Политехнического института...»

За время работы в блокадном Ленинграде Павел Павлович неоднократно попадал под артиллерийские и бомбежки. Несколько раз был контужен, один раз тяжело. Получил повреждение черепа, у него была сломана кисть руки. 17 мая 1944 года Указом Президиума Верховного Совета СССР за самоотверженный труд в блокадном Ленинграде П.П. Кобеко был награжден орденом Ленина. Одним из первых П.П. Кобеко был награжден медалью «За оборону Ленинграда», которой очень гордился. Была награждена и Софья Владимировна Кобеко.

После снятия блокады Павел Павлович Кобеко возвращается к работе, прерванной войной. В 1943–1945 годах П.П. Кобеко — декан физико-механического факультета Политехнического института, принимает активное участие в создании радиофизического факультета, на котором возглавил кафедру физики диэлектриков и полимеров. Возвращается к чтению лекций, которые пользуются прежним успехом; организывает научную работу на своей кафедре. После эвакуации Физико-технического института П.П. Кобеко становится заведующим отделом полимеров, в состав которого входят несколько лабораторий, продолжает сам заниматься наукой. Выполненное им исследование влияния давления на полимеризацию было удостоено премии Президиума АН СССР. Весной 1947 года П.П. Кобеко был назначен заместителем директора ЛФТИ по научной работе. По-прежнему много сил отдает Павел Павлович внедрению своих изобретений, прежде всего эскапона, в промышленность. В 1949 году для координации научной деятельности по исследованию и техническому применению диэлектриков создается специальная комиссия, в состав которой входит и П.П. Кобеко. В 1952 году выходит в свет монография П.П. Кобеко «Аморфные вещества.

Физико-химические свойства простых и высокомолекулярных аморфных тел», получившая высокую оценку специалистов.

«Однако блокада подорвала силы всех, переживших ее, — вспоминает А.П. Александров [1], — А после блокады прежний стиль работы и жизни в Физтехе не был восстановлен. Загруженность работой в области атомной тематики и ее известная специфика поневоле разобщила нас всех, а кроме того, сначала Курчатов и братья Алихановы, а потом и многие другие сотрудники уехали в Москву. Вскоре и я был переведен туда же.

Встречаться мы стали редко. Обстановка в Физтехе осложнилась, работы по полупроводникам были выделены из Физтеха, и вместе со многими сотрудниками наш общий учитель и руководитель А.Ф. Иоффе должен был покинуть Физтех». Покинул Физтех и П.П. Кобеко. С 1 ноября 1952 года он — заведующий лабораторией Института высокомолекулярных соединений.

«П.П. Кобеко тяжело переживал все эти перестройки. Его здоровье, — продолжает А.П. Александров, — подорванное блокадой, резко ухудшилось. Окончательно подкосила его внезапная смерть жены, Софьи Владимировны, от белокровия. После этого Павел Павлович уже не оправился, и скоро мы его потеряли».

Скончался Павел Павлович Кобеко 6 января 1954 года.

Байки О П.П. Кобеко

В молодости П.П. Кобеко любил разные шуточные, остроумные шутки, знал им место, был организатором и душой новых дел, с ним никогда не было скучно. В [2, с. 133–135] приведено несколько забавных случаев, связанных с ним. Здесь мы их воспроизводим.

П.П. на коне Клодта

Однажды после встречи Первая небольшая группа возвращалась по Невскому проспекту домой. Показались Аничков мост и фигуры лошадей Клодта. Под общий смех Павел Павлович взобрался на статую и принялся подбадривать французскими фразами своего скакуна. Видно было, что он знает толк в верховой езде. Вскоре, правда, пришлось прямо с клодтовского рыска объясняться со стражем порядка.

Случай в психиатрической больнице

Однажды, когда один из его студентов заболел и попал в психиатрическую больницу, Павел Павлович решил поговорить с лечащим врачом, пришел туда и сам вызвал у врача подозрения своей рассеянностью. Тот сейчас же спросил Кобеко, какой сегод-



ня день и год, и Павел Павлович назвал прошедший день и прошлый год. Тогда врач спросил, где он работает, и Кобеко назвал себя сотрудником А.Ф. Иоффе. Психиатр был уже совсем убежден, что имеет дело с больным, и чуть было не задержал Павла Павловича, а потом оправдывался, что все его пациенты «всегда ссылаются на высокие личности».

Неудавшаяся заначка

Как-то раз, получив с И.В. Курчатовым гонорар за книги, сговорились утаить от жен по триста рублей на мелкие расходы. Но те по количеству принесенных домой купюр быстро разгадали маневр и потребовали внести в семейные кассы полные суммы.

Недорезанный буржуй

Иронически относился Павел Павлович к своему дворянскому происхождению. В совершенстве владея немецким, английским и французским языками и видя, как товарищи «пролетарского происхожде-

ния» потеют, переводя технические статьи, любил подойти и сказать с усмешкой:

— Дайте-ка посмотреть недорезанному буржую.

Курьезный случай во время защиты докторской диссертации

Во время защиты докторской диссертации П.П. Кобеко в 1935 году на Совете ЛФТИ произошел курьезный случай, который хорошо характеризует Павла Павловича. От его доклада у слушателей создавалось впечатление, будто вся работа была проделана не самим соискателем ученой степени, а его помощниками и учениками. Поэтому председательствующий спросил: «Мы, конечно же, ценим вашу скромность, но скажите же, ради бога, Павел Павлович, что вы-то сделали?». Зал встретил этот вопрос смехом, так как всем было хорошо известно, сколько труда и сноровки было вложено в эти исследования, да и о его работах было широко известно далеко за пределами института [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобеко Павел Павлович [Текст] // В кн.: Физики о себе. — Л.: Наука, 1990. — С. 290—296.
2. Юрченко, Г.Ф. На земле Мстиславщины возвращенный. Очерк жизни и деятельности П.П. Кобеко [Текст] / Г.Ф. Юрченко. — Минск: Наука і техника, 1991. — 144 с.
3. Храмов, Ю.А. Кобеко Павел Павлович [Текст] / Ю.А. Храмов. — Физики. Биографический справочник. — М.: Наука, 1983. — С. 135, 136.
4. Коптев, Ю. П.П. Кобеко [Текст] / Ю. Коптев. — СПб., 1997. — 36 с.
5. П.П. Кобеко (11.VI.1897—6. I. 1954) [Текст] // Журнал технической физики. — 1954. Т. 24, вып. 4. — С. I—IV.
6. Рейнов, Н.М. Физики — учителя и друзья [Текст] / Н.М. Рейнов. — Л.: Лениздат. — 256 с.

УДК 001:66

В.А. Липин

А.К. ВАН-ДЕР БЕЛЛЕН — ЗАБЫТОЕ ИМЯ В ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Имя Александра Константиновича Ван-дер Белена, выпускника металлургического факультета Петербургского (Петроградского) политехнического института, мало или почти ничего не говорит поколению россиян XXI века. Между тем этот человек достоин памяти и уважения за вклад в развитие российской—советской цветной металлургии, а также подготовку кадров для предприятий отрасли.

Архивные документы, как обычно, скупы, но все же позволяют установить факты биографии А.К. Ван-дер Беллена.

Евгений-Александр-Станислав Константинович фон-дер Беллен (таково его полное имя) родился по старому стилю 14 января 1891 года в семье потомков голландцев, переселившихся еще в XVIII веке в Россию. Ван-дер Беллены находились на российской службе с XVIII века, главным образом, по медицинской части, имели привилегии дворянства, играли активную роль в общественно-политической жизни Псковской губернии и прилегающего региона. Достаточно сказать, что последним губернатором г. Пскова был именно Ван-дер Беллен. На территории



Рис. 1. Александр Константинович Ван-дер Белен в предреволюционный период (фотография из личного архива ЕА. Лубны-Герцык)

Псковской губернии, Эстляндии, Германии и др. семейством Ван-дер Беллен была создана сеть аптечных и медицинских учреждений. Дела шли хорошо, и в конце XIX века представители семейства Ван-дер Белленов переселились на Урал, где ими был приобретен ряд золотых приисков [4].

До революции 1917 года Ван-дер Беллены составляли элиту российского общества. В родстве с ними состояли многие известные и влиятельные фамилии той поры, в том числе и военный министр России (1905–1909 гг) Александр Федорович Редигер (1853–1920). Образование представители семейства Ван-дер Белленов получали в области юриспруденции, химии, медицины и лесного дела в петербургских высших учебных заведениях и тартуском университете. Родовое имение в Псковской губернии было по существу превращено студентами и выпускниками Петербургского лесного института и Московского сельскохозяйственного института (впоследствии МСХА им. Тимирязева) в опытный участок для выращивания различных сельскохозяйственных культур. Будущие академики Д.Н. Прянишников (1865–1948), В.Р. Вильямс (1863–1939), Е.Ф. Лискун (1873–1958) были в их числе.

Александр Константинович Ван-дер Беллен, как и его родной брат Владимир (1892 г.р.), вопреки семейным традициям поступил в 1907 году в недавно открытый Санкт-Петербургский политехнический институт имени Петра Великого. Владимир поступил на механический факультет, а Александр — на металлургический. Интерес к химическим производствам, геологическим исследованиям и металлургии, помноженный на незаурядные способности, сыграл свою роль.

В тот период в стенах Санкт-Петербургского политехнического института преподавание на металлургическом факультете вели крупнейшие специалисты и педагоги того времени. Общую химию преподавал Н.С. Курнаков (1860–1941), физическую химию и теоретическую электрохимию — В.А. Кистяковский (1865–1952), общую металлургию, теорию сплавов, теоретический и горнозаводской анализ — А.А. Байков (1870–1946), металлургию стали — В.Е. Грум-Гржимайло (1864–1928), электрометаллургию — П.П. Федотьев (1864–1934) [1].

Еще будучи студентом, А.К. Ван-дер Беллен проявил разносторонние способности, аналитический ум и незаурядную эрудицию. Об уровне и характере научных исследований А.К. Ван-дер Беллена в студенческие годы можно судить по результатам работы, выполненной под руководством А.А. Байкова [5] и опубликованной в 1914 году в журнале Русского металлургического общества, председателем которого был его дядя — Н.А. Иосса. Работа была посвящена исследованию процессов, идущих в шахтных печах при плавке сульфидных руд в присутствии угля и возможности образования вторичных продуктов (CS_2 , H_2S , COS). В частности, в этой работе была установлена роль катализаторов в промышленном осуществлении реакции диспропорционирования монооксида углерода.

18 декабря 1913 года А.К. Ван-дер Беллен окончил курс Санкт-Петербургского политехнического института и был удостоен звания инженера-металлурга [3]. Мало кому сейчас известно, что выпускник с такой квалификацией имел в тот период «право занимать должность штатного преподавателя в специальных учебных заведениях, заведовать фабриками и заводами, составлять проекты зданий и сооружений, производить всякого рода строительные работы» и др. [2].

Лучшей характеристикой А.К. Ван-дер Беллена стал отзыв о нем В.Е. Грум-Гржимайло, написанный несколько лет спустя после окончания института. Он писал: «Я считаю инженера-металлурга Александра Константиновича Ван-дер Беллена одним из самых талантливых молодых инженеров-металлургов. Он имеет прекрасную подготовку, очень начитан, прекрасно владеет иностранными языками. У него хорошие руки в лабораторной работе и хорошая голова при обсуждении полученных результатов».

После окончания института А.К. Ван-дер Беллен был рабочим и практикантом в доменном цехе Биссерского завода на Урале, в мартеновских цехах Надеждинского (ныне Серовского) и Енакиевского заводов, техником на Богословском медеплавильном заводе, был ассистентом Варшавского политехнического института [4].

Произошли изменения и в семейной жизни. В 1914 году А.К. Ван-дер Беллен женился на Елене Эдуардовне Тидебель, родственнице знаменитого мецената-банкира, благодаря финансовой помощи которого стало возможным создание Музея изобразительных искусств им. А.С. Пушкина, и переселился из Петербурга в Москву.

К 1917 году А.К. Ван-дер Беллен выполнил и опубликовал ряд работ по цветной и черной металлургии, свидетельствовавших о его разносторонних интересах и знаниях. Среди них следует отметить «Материальный и тепловой баланс медеплавильной шахтной печи Богословского завода», «Исследование свойств пульного мельхиора», «Влияние примесей в меди на свойства медных снарядных поясков». Понятно, что в условиях Первой мировой войны, в которой с 1914 года участвовала и Россия, совершенствованию технологии получения цветных металлов и увеличению объемов их производства отводилось не последнее место. Поэтому инженер А.К. Ван-дер Беллен видел свою роль именно в этом.

Революция 1917 года поставила перед русской интеллигенцией непростую задачу выбора, разбив русское общество на два лагеря. Большинство представителей семейства Ван-дер Беллен по разным причинам к середине двадцатых годов покинуло Россию. Так, родной брат Александра Константиновича — Владимир, который учился на механическом факультете Политехнического института с 1909 по 1913 год, затем с 1913 по 1916 год — в Лесном институте и позд-



Рис. 2. Александр Константинович Ван-дер Белен в металлургической лаборатории Петроградского политехнического института (фотография из личного архива Е.А. Лубны-Герцык)

нее в 1916 году в Николаевском инженерном военном училище, в 1918 году предпринял наивную попытку восстановиться в Лесном институте [10]. Но, не встретив там поддержки и не найдя себе достойного применения в послереволюционной России, был вынужден в 1924 году эмигрировать в Голландию.

А.К. Ван-дер Беллен был один из немногих представителей этой фамилии, кто остался и искренне направил все свои силы на то, чтобы наладить работу цветной металлургии страны в послереволюционные годы.

1917 год А.К. Ван-дер Беллен встретил на Кольчугинском медеплавильном заводе, где работал заведующим металлургической лабораторией. Он избирается членом президиума Кольчугинского Совета рабочих депутатов, возглавляет Отдел народного образования, занимается всеобщим начальным обучением.

С 1918 года А.К. Ван-дер Беллен работает в секторе цветных металлов Высшего совета народного хозяйства (ВСНХ) — центральном органе по руководству промышленностью страны, где его деятельность прежде всего была направлена на организацию работы предприятий цветной металлургии в новых хозяйственных условиях, национализацию предприятий цветной металлургии, преобразование предприятий. А.К. Ван-дер Беллен обследует ряд предприятий и многие месторождения руд цветных металлов, разрабатывает серию докладов и записок в руководящие органы страны, выступает с предложениями о дальнейших путях развития цветной металлургии послереволюционной России. Основное внимание Александра Константиновича было сосредоточено на предприятиях Восточного Казахстана, где в тот период бурно развивалась вплоть до 1917 года горнодобывающая и горно-заводская промышленность, где разрабатывались богатые месторождения цветных металлов и угля.

Здесь следует подробно остановиться на ситуации в российской горнорудной и металлургической промышленности, сложившейся в предреволюционные годы.

Дело в том, что в начале XX века большинство предприятий горной промышленности, производивших медь, цинк, свинец, золото, уголь и др., находились в руках иностранных акционерных обществ. Так, на территории Казахстана англо-французское акционерное обще-

ство Спасских медных руд, возникшее в 1904 году, владело Спасско-Успенским медным рудником и заводом. В 1911 году было организовано, главным образом с участием английского капитала, Атбасарское акционерное общество медных руд для разработки Джекказганских месторождений.

Одним из главных центров цветной металлургии западного Алтая был рудник в поселке Риддерск, основанном в 1786 году и названном по имени горного офицера Филиппа Риддера (1759—1838), открывшего здесь месторождение полиметаллических руд. Риддеровскими месторождениями полиметаллов до 1917 года владел Джон Лесли Уркварт (1874—1933), английский миллионер и предприниматель. Шотландец по происхождению, он более половины жизни прожил в России, здесь создал свою репутацию и достиг своих величайших успехов [6].

Еще в 1906 году Уркварт организовал Англо-Сибирскую компанию с целью инвестирования в добычу и переработку руд цветных металлов в России. В 1908 году он скупил акции наследников купца Л.И. Расторгуева и завладел Кыштымским горным округом. В 1910 году им был основан Карабашский медеплавильный завод на базе имеющихся месторождений медно-колчеданных руд. Основной сырьевой базой было Александринское месторождение меди. К 1915 году завод был в числе ведущих в России по уровню технической оснащенности и объемам производства.

С 1914 года Англо-Сибирская компания стала контролировать работу предприятий Риддерска. На средства, выделенные Урквартом, велось совершенствование шахт и рудников, строительство обогатительной фабрики, Экибастузского свинцово-цинкового завода, строилась железная дорога, было организовано производство первого в России кокса. В 1917 году планировалось производить 12000 тонн цинка, 8000 тонн свинца и почти миллион тонн угля. Это было самое большое предприятие в России, за исключением металлургических заводов на западе страны.

Компания «Руссо-Азиатик Консолитейед Лимитед», ведомая Лесли Урквартом, до октябрьского переворота контролировала крупнейшие медные, цинковые и железно-рудные рудники на Урале и в Восточной Сибири, общей площадью свыше миллиона гектар, где также добывались



серебро и свинец (их доля составляла 60 % от общего производства этих металлов в России) [6].

Происшедшие после государственного переворота 1917 года события коренным образом изменили ситуацию. Неопытность новой власти, подстрекательства большевиков, негативное отношение к иностранным специалистам и их отъезд привели к тому, что предприятия Риддерска и других объектов цветной металлургии региона к началу 1918 года прекратили свою работу. Восточный Казахстан и Алтай переходили от красных к белым и обратно. В итоге к середине 1919 года некогда крупнейшее предприятие металлургии, которым владел Уркварт, превратилось в страшный скелет, с заводами, подлежащими восстановлению с большим трудом, затопленными медными копиями и разбежавшимся персоналом. Хозяйственная разруха на предприятиях усугублялась из-за того, что в годы после революции их оборудование и механизмы практически не ремонтировались, не заменялись, не реконструировались, и они работали с большими перебоями, остановками, неравномерной нагрузкой. Степень их изношенности превысила 50 %. Кроме того, оборудование, детали зданий и сооружений в той или иной степени были разворованы местным населением. Персонал предприятий фактически остался без работы, были прекращены поставки сырья и производство основной продукции, исключительно важной для страны [6].

Уже с середины 1920 года стал решаться трудный вопрос о сохранении риддерских и других предприятий для их последующего пуска. К тому моменту уже стало однозначно ясно: Советы не станут отдавать Уркварту назад его собственность, что можно было бы рассматривать как признание ими частной собственности. Речь могла идти только либо о концессии, либо о национализации данных предприятий. Решающее слово в данной ситуации было за руководителем советского государства В.И. Лениным (1870–1924), лично руководившим переговорами с предполагаемыми концессионерами, которые продолжались больше года.

В конце 1921 года была создана специальная комиссия при Совете труда и обороны по обследованию в Риддерске и других местах состояния предприятий цветной металлургии. В ее состав в качестве главного технического специалиста

вошел инженер-металлург А.К. Ван-дер Беллен. Целью обследования было установление технического и экономического состояния предприятий на текущий момент и видов на ближайшее будущее, сбор материала для выяснения вопроса о дальнейшей эксплуатации путем восстановления дела своими руками или сдачи в концессию, выяснение организационных задач и работ, которые встанут перед руководителями при организации и восстановлении дела своими средствами.

С ноября 1921-го по январь 1922 года комиссия занималась обследованием предприятий Риддерска и Кыштыма. Позднее непосредственно А.К. Ван-дер Белену было поручено подготовить соображения по восстановлению работы и других предприятий региона.

Изучив архивы акционерных обществ цветной металлургии (Спасского, Атбасарского и Риддерского), Александр Константинович представил в ВСНХ доклад о восстановлении предприятий указанных акционерных обществ и дальнейшем их развитии без привлечения иностранного капитала (концессий). По существу, данные материалы представляют собой подробнейшие технико-экономические выкладки. Отдельные материалы доклада были опубликованы в центральном советском издании — газете «Правда» от 18, 19 и 21 марта 1923 года и вскоре были также напечатаны в виде отдельных брошюр [7, 8].

В том же 1923 году Александр Константинович представил «Проект организации Государственного медно-свинцово-цинкового общества», ставший первой наметкой перспективного плана развития цветной металлургии в стране.

4 февраля 1924 года А.К. Ван-дер Беллен подал доклад Президиуму ВСНХ «Об организации медно-цинко-свинцового дела» и в декабре 1924 года еще раз доложил Президиуму ВСНХ о развитии медных производств Карабаша, закавказских предприятий, о строительстве Карсакпая и Богомолстроя (ныне Красноуральский комбинат). Именно по этому докладу ВСНХ принял Постановление от 4 февраля 1924 года: «Принципиально признать необходимой организацию медно-цинко-свинцового государственного предприятия в составе Кыштыма, Калаты, Таналыка, Риддерска и Экибастуза».

Обширные знания геологии, горного дела и металлургии, умение анализировать и оценивать экономическую сущность рассматриваемых промышленных проблем, непоколебимая убежденность в соответствии своих оценок и предложений интересам Родины, генеральной линии на индустриализацию страны и преимущественное развитие государственной тяжелой промышленности, строго логичная аргументация, страстность в письменном изложении и в устных докладах прокладывали дорогу идеям и предложениям А.К. Ван-дер Беллена. Таким образом, вопрос о развитии этой большой группы предприятий цветной металлургии как государственных получил практическое разрешение и развитие.

В своих публикациях А.К. Ван-дер Беллен констатирует: «Ни одно из русских месторождений свинца и цинка в отношении прибыльности не может быть сравнимо с Риддером и в ближайший период развития русской промышленности Риддер является единственным месторождением, способным обеспечить коммерчески выгодное получение свинца и цинка в масштабе, отвечающем потребности страны» [6].

Именно на риддеровских предприятиях бывшей концессии Лесли Уркварта при техническом руководстве А.К. Ван-дер Беллена были достигнуты наибольшие успехи национализации. С трудом пережив времена полной остановки производства (1918–1921 годы), но тем не менее в наибольшей степени сохранив комплектность оборудования, впоследствии частично отремонтированного и обновленного, задействованного на полную мощь, удалось на этой базе вновь созданному комбинату «Риддерцинк» к 1925 году стать самым передовым предприятием молодого Казахстана. В его составе действовали горный цех с двумя рудниками, золотоизвлекательная фабрика, опытный электролитный цинковый завод, электротехнический цех, химическая лаборатория, строилась обогатительная фабрика; в полном объеме функционировало вспомогательное производство. В результате за первый хозяйственный год (с 1 октября 1924-го по 1 октября 1925 года) было добыто 3644 тонны руды, вдвое больше против прошлого года. 1 ноября 1927 года с пуском передислоцированного из Экибастуза свинцового завода здесь был получен первый казахстанский свинец. В октя-

бре 1928 года впервые в истории Риддерска себестоимость добываемой руды не стала превышать средней годовой сметной себестоимости, и, наконец, в декабре 1929 года Риддерский горно-металлургический комбинат государственного треста «Полиметалл» снизил себестоимость руды на 41 % против прошедшего года. В ходе успешной первой пятилетки и далее Риддерск продолжал производство крупнотоннажного количества серебросодержащего свинца, а Экибастуз и степные хозяйства, до революции арендованные Лесли Урквартом, добычей угля и меди делали существенный вклад в экономику советского государства [6].

В 1925–1926 и в 1932–1934 годы А.К. Ван-дер Беллен работал техническим директором треста «Алтайполиметалл», а затем главным инженером треста «Алтайцветметзолото». Он активно участвовал в освоении селективной флотации полиметаллических руд, в создании первого в стране Риддерского опытного цинкового электролитного завода. Впоследствии в 1937–1938 годах Александр Константинович как консультант Гипроцветмета участвовал в разработке технико-экономической записки по вопросам развития цветной металлургии и энергетики на Алтае. После рассмотрения этой записки было принято постановление Совнаркома СССР и ЦК ВКП(б) от 9 октября 1938 года.

А.К. Ван-дер Беллен много сделал для развития цветной металлургии и в других районах страны. В 1926–1927 годах он обследовал ряд медных и полиметаллических месторождений Южного Казахстана и Средней Азии, выступал с критикой и ревизией установок Геологического комитета и некоторых работников плановых органов, утверждавших непромышленный характер этих месторождений, выдвинул предложение о создании предприятий цветной металлургии в этих районах. Он представил в ВСНХ записку о большом значении медных вкрапленных порфириновых руд Казахстана (1927), разработал по заданию правительства Казахской ССР проект «Первого пятилетнего плана развития цветной металлургии и связанных с ней отраслей хозяйства в Казахстане» (1928 г.).

По его оценке, суммарные промышленные запасы руд разведанных Коунрадского, Джезказганского и других медных месторождений Центрального Казахстана позволяли проекти-

ровать в этом районе выплавку меди в количестве, значительно превышавшем всю выплавку меди в СССР в тот период.

На основании этих данных в полупустынном Прибалхашье был построен и введен в 1938 году в действие крупнейший на тот период горно-металлургический комбинат, сыгравший впоследствии немалую роль в обеспечении страны металлом в годы Второй мировой войны.

В 1929–1930 годах А.К. Ван-дер Беллен работал в Гипроцветмете главным инженером проекта Казмеди (ныне Балхашский горно-металлургический комбинат), выпустил технико-экономическую записку «Плановое задание по строительству Казмеди». Впоследствии он был первым главным инженером треста «Казмедь».

На протяжении ряда лет А.К. Ван-дер Беллен возглавлял технические и научно-технические советы руководящих органов цветной металлургии, участвовал в экспертизе и рассмотрении проектов почти всех предприятий медной и свинцово-цинковой промышленности.

Как эрудированный инженер и экономист, он правильно оценивал проблемы размещения промышленности, неутомимо пропагандировал развитие медной и свинцово-цинковой промышленности в Казахстане и Средней Азии, алюминиевой промышленности в Сибири. Жизнь подтвердила правильность его рекомендаций и прогнозов.

Наряду с руководящей инженерной и экономической работой в промышленности А.К. Ван-дер Беллен с 1923 года работал в высшей школе — сначала доцентом в стенах Московской горной академии, а после выделения факультета цветных металлов в самостоятельный Московский институт цветных металлов и золота в 1930 году — профессором. В рекомендации того же В.Е. Грум-Гржимайло, данной в 1923 году сказано: «А.К. Ван-дер Беллен вполне владеет даром слова... Думаю, что Московская горная академия приобретет в его лице достойного сочлена-преподавателя». В 1934 году он избран деканом инженерно-экономического факультета и заведующим кафедрой организации производства. Среди учеников Александра Константиновича был будущий министр цветной металлургии СССР П.Ф. Ломако (1904–1990), окончивший Московский институт цветных металлов и золота в 1932 году.



Рис. 3. Александр Константинович Ван-дер Беллен в советские годы (фотография из личного архива Е.А. Лубны-Герцык)

А.К. Ван-дер Беллен был непримирим к любым ведомственным, местническим, конъюнктурным, волонтаристским толкованиям и подходам, никогда не боялся оспаривать ошибочные, по его мнению, положения и выводы. Такая принципиальность требовала от него большого напряжения ума и нервов и немалого гражданского мужества. В 1929–1930 годах он вступил в спор с авторитетными геологами, доказал ошибочность их оценки запасов меди в Коунрадском месторождении, добился пересчета и утверждения запасов, в 5 раз превысивших первоначально заявленные.

Человек трезвого мышления и точного расчета, Александр Константинович выступал как против заниженных, так и против завышенных цифр в предложениях, добивался оптимальных решений. Так, 12 мая 1931 года А.К. Ван-дер Беллен обратился в руководящие органы страны с докладной запиской, в которой он вскрыл причины отставания цветной металлургии от требований народного хозяйства, причины возраставшего дефицита цветных металлов, и предложил комплекс мероприятий для преодоления отставания цветной металлургии и смягчения

дефицита цветных металлов, рассчитанный на несколько лет. Некоторые положения его записки, например тезис о необходимости пропорционировать капитальные вложения в черную и в цветную металлургию, представляют интерес и в наши дни. После рассмотрения записки была образована правительственная комиссия, в состав которой был введен А.К. Ван-дер Беллен; этой комиссии было поручено проработать мероприятия для развития производства цветных металлов в стране.

Судьба пощадила Александра Константиновича в годы репрессий тридцатых годов. Лишь его

огромный авторитет и ряд случайных обстоятельств позволили ему с его фамилией и происхождением избежать ареста. Однако очередная «чистка» достигла и его. В 1938 году поступила очередная директива Сталина по кадровым вопросам. Ближайшие соратники арестованы, сам он был полностью отстранен от работы в промышленности. Происходят личные трагедии: смерть дочери, внуки, сестры. В 1940 году А.К. Ван-дер Беллен оставляет преподавание в институте цветных металлов и золота. 5 мая 1944 года он скоропостижно скончался в возрасте 53 лет и был похоронен на Донском кладбище в Москве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЦГИА СПб. Ф. 478. Оп. 4. Д. 78.
2. ЦГИА СПб. Ф. 478. Оп. 25. Д. 81.
3. ЦГИА СПб. Ф. 478. Оп. 1. Д. 155.
4. РГИА. Ф. 1343. Оп. 17. Т. 1. Д. 2429.
5. **Ван-дер Белен, А.К.** К вопросу о плавке сульфидных руд [Текст] / А.К. Ван-дер Беллен // Журн. Рус. металлург. о-ва.— Петроград.— 1914. № 6.— С. 689—724.
6. **Немцев, М.С.** Риддерская концессия Лесли Уркварта [Текст] / М.С. Немцев.— Риддерск: Изд. бюро «Терра», 2008.— 170 с.,
7. **Ван-дер Белен, А.К.** Риддерское свинцово-цинковое дело [Текст] / А.К. Ван-дер Белен.— М.: Высший совет народного хозяйства. Отдел редакционно-издательский, 1923.— 129 с.
8. **Ван-дер Белен, А.К.** К вопросу о «Концессии Уркварта» [Текст] / А.К. Ван-дер Белен.— ВСНХ.— М.: 1923.— 42 с.
9. **Грановский, Б.Л.** У истоков цветной металлургии [Текст] / Б.Л. Грановский // Цветные металлы.— 1967. № 10.— С. 97—99.
10. ЦГИА СПб. Ф. 994. Оп. 5. Д. 1475.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АВОТИН Евгений Викторович — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)534-14-31; (812)534-49-05
kgm-spb@list.ru

АГЕЕВ Вячеслав Олегович — научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории системологии факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
agvo@nm.ru

АЛЕКСАНДРОВ Сергей Евгеньевич — доктор химических наук профессор, заведующий кафедрой физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского института машиностроения.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 297-38-33
salexandrov@spbstu.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии металлов и металловедения Санкт-Петербургского института машиностроения.

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14
(812) 540-01-59

БЕЗУХОВ Андрей Павлович — кандидат технических наук доцент кафедры турбиностроения и средств автоматизации ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)».

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ
(812)540-30-48
bezukhov@mail.ru

БОГОВ Игорь Александрович — доктор технических наук профессор декан турбиностроительного факультета, заведующий кафедрой турбиностроения и средств автоматизации ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)», Заслуженный работник высшей школы РФ.

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ
iabog@mail.ru

БОГУСЛАВСКИЙ Илья Зеликович — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета., Заслуженный деятель науки и техники РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-85-30
b-iz@yandex.ru

БОРИЧЕВА Ирина Константиновна — заведующая лабораторией микроскопии и микроанализа кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-77-67
iboricheva@ftim.spbstu.ru

БРИТВИН Сергей Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук старший научный сотрудник кафедры кристаллографии Санкт-Петербургского государственного университета.

199155, Санкт-Петербург, В.О., пер. Декабристов, д. 16
(812) 350-66-88
sbritvin@gmail.com

БУНДУР Михаил Семенович — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)534-13-88
mmfgak@mail.ru

ВАСИЛЬЕВА Екатерина Сергеевна — кандидат технических наук доцент кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-48-01
katrinfr@inbox.ru

ВОЛКОВИЦКИЙ Игорь Дмитриевич — аспирант кафедры турбиностроения и средств автоматизации ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)».

195197, Санкт-Петербург, Полыстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ

(812)540-30-48
spimash@mail.ru

ВИКТОРОВ Евгений Дмитриевич — кандидат технических наук профессор кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)783-42-62
wiktovrov@mail.ru

ВИНОГРАДОВ Александр Леонидович — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович — научный сотрудник лаборатории нано- и микротехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 550-03-72
togl@mail.ru

ГОЛОВИН Олег Андреевич — кандидат физико-математических наук доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 717-52-56
golovin_44@mail.ru

ГОРЮНОВ Валерий Павлович — доктор философских наук профессор, заведующий кафедрой философии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-87-01

ГРИГОРЬЕВ Борис Семенович — доктор технических наук профессор кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 598-17-43
bsgrigoriev@gmail.com

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — кандидат физико-математических наук начальник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21

(812)-294-47-36

gna@rtc.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях факультета комплексной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 248-91-93

kaf-uzchs@mail.ru

ГУЧИНСКИЙ Руслан Валерьевич — ассистент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-63-03

ДЕМИДОВ Александр Иванович — профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии Санкт-Петербургского политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-63-87

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)534-14-31; (812)534-49-05

kgm-spb@list.ru; dr-idpo@yandex.ru

ДОБУШ Василий Степанович — аспирант кафедры электротехники, электромеханики, электроэнергетики Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

(812) 328-82-70

griimov@yandex.ru

ДОНЦОВ Николай Юрьевич — аспирант кафедры турбиностроения и средств автоматики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)».

195197, Санкт-Петербург, Полустровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ

(812)540-30-48

konezzz@list.ru

ДОРОФЕЕВ Павел Александрович — кандидат физико-математических наук доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-67-50

pavel_dorofeev@inbox.ru

ЗАЙЦЕВ Александр Владимирович — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Горного университета.

199106, Санкт-Петербург, В.О., линия 21-я, д. 2

(812) 595-34-01

zaytsev@lenrdu.so-ups.ru

ИВАНОВ Владимир Георгиевич — инженер директор ООО «Петербургская электротехническая компания».

196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 2

(812) 369-26-61

ИВАНОВ Владимир Николаевич — доктор технических наук научно-технический директор Всероссийского научно-исследовательского института токов высокой частоты имени В.П. Вологодина.

194362, Санкт-Петербург, Шуваловский парк, д.1

(812)-594-81-23

sales@vniitvch.ru

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)-552-76-43

d.ivanov@list.ru

КАГАН Андрей Вадимович — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Горного университета,

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

(812) 328-82-70

kagan_55@mail.ru

КАЧАНОВА Тамара Леонидовна — доктор технических наук профессор кафедры управления проектами факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

kachanova-tamara@mail.ru

КИДАЛОВ Сергей Викторович — кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

(812) 247-93-77

kidalov@mail.ioffe.ru

КЕСАМАНЛЫ Микаил Фагам-оглы — выпускник физико-металлургического факультета Ленинградского политехнического института, учитель физики высшей категории.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

(812) 552-75-31

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

(812) 552-75-31

КИСЕЛЕВ 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

КЛИМОВА Ольга Геннадьевна — кандидат технических наук инженер 1-ой категории кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-06-27

paniolia@list.ru

КОЗЫРЕВ Сергей Васильевич — кандидат физико-математических наук директор Центра перспективных исследований Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, сопредседатель Координационного совета Санкт-Петербургского союза ученых.

195521, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-95-13

kozyrev@spbcas.ru

КОЛЬЦОВА Татьяна Сергеевна — аспирант кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-89-9

annelet@yandex.ru

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
z1dehy97@mail.wplus.net

КОРАБЛЕВ Вадим Васильевич — доктор физико-математических наук профессор советник ректората Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195521, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-20-88
korablev@spbcas.ru

КОРШУНОВ Андрей Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 550-03-72
kite01@mail.ru

КОСОРУКОВ Антон Владимирович — аспирант кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, технический директор ООО «НПФ ЭЛНАП».

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 334-90-93
kosorukov_anton@inbox.ru

КОСТИН Владимир Николаевич — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Горного университета.

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д. 2
(812) 328-82-70
kostin_vn@mail.ru

КОЧКАРЕВ Дмитрий Алексеевич — электроник научно-исследовательского отделения лазерных, опто-электронных и мехатронных систем Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21
(812)-552-33-51
kochdim83@mail.ru

КРЕТУШЕВА Ирина Васильевна — аспирант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, младший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории ФТИМ СПбГПУ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-61-71
kresch86@mail.ru

КУДРЯШОВ Евгений Владимирович — кандидат технических наук заместитель главного инженера ЗАО «Универсал — контактные сети»

199048, Санкт-Петербург, 5-я линия В.О., д. 70, лит. А, пом. 11Н
kev@uks.ru

КУЗНЕЦОВ Михаил Валерьевич — ведущий инженер Российско-Германского центра лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
kuznetsov_mich@mail.ru

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

ЛАГУШКИН Сергей Георгиевич — кандидат исторических наук доцент кафедры истории гуманитарного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-96-91
slagushkin@mail.ru

ЛАТЫШЕВ Дмитрий Викторович — заведующий лабораторией кафедры строительных конструкций Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого.

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41
(8162) 73-06-42

ЛЕСИН Сергей Викторович — младший научный сотрудник кафедры физической и коллоидной химии Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина.

119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 65
(499)233-95-89
LesinSV@gmail.com

ЛИПИН Вадим Аполлонович — доктор технических наук профессор кафедры физической химии, макро- и наноматериалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

192516, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-67-77
Vadim.lipin@km.ru

МАКСАРОВ Вячеслав Викторович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой машиностроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

(812) 370-77-87
maks78.54@mail.ru

МАСЛОВ Владимир Иванович — доктор технических наук профессор кафедры управления конструкторско-технологическими инновациями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

192516, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-07-64
vimaslov@tu.neva.ru

МИТРОФАНОВ Александр Михайлович — кандидат технических наук доцент, директор департамента научно-организационной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 591-65-50
ro.dep@spbstu.ru

МИТЮКОВ Андрей Аркадьевич — мастер строительно-монтажных работ ООО «Технокомплекс».

173008, г. Великий Новгород, ул. Рабочая, д. 59
(8162) 63-23-35

МИШИН Максим Валерьевич — кандидат физико-математических наук доцент и докторант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ

(812) 552-61-71
maximvmishin@gmail.com, mmishin@spbstu.ru.

НИКИТКОВ Николай Валентинович — доктор технических наук профессор кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-76-64
nnvnvi@mail.ru

НИКУЛИНА Светлана Петровна — кандидат физико-математических наук начальник технического отдела научной части Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 297-24-75
(921) 368-66-48
nikulina@spbstu.ru

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич — доктор технических наук заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 335-58-52

ПЕЛЕВИН Никита Александрович — аспирант кафедры гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-13-88
twic@inbox.ru

ПЕТИНОВ Сергей Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-63-03

ПЕТРИЧЕНКО Михаил Романович — доктор технических наук профессор кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-94-60
fonpetrich@mail.ru

ПЕТРОВ Михаил Юрьевич — старший преподаватель кафедры строительных конструкций Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого.

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41
(8162) 73-06-42

ПЕТРОВ Николай Васильевич — член Международного клуба ученых Санкт-Петербурга.

191040, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 44
(812) 325-20-53

ПЕТРОСОВА Дарья Владимировна — старший преподаватель кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-49

ПЕТРОЧЕНКО Марина Вячеславовна — кандидат технических наук доцент кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 297-59-49

ПОЛЯКОВ Павел Александрович — аспирант кафедры технической механики Кубанского государственного технологического университета.

350062, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Кубанский государственный технологический университет
polyakov.pavel2012@yandex.ru

ПОПОВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры художественной и пластической обработки материалов Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого.

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41
(8162)62-66-14

ПРОКОПЕНКО Вячеслав Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-13-88
mmfgak@mail.ru

ПРОТОПОПОВА Вера Сергеевна — аспирант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, младший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории ФТИМ СПбГПУ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-61-71
vera_protopopova@mail.ru

РОГАЧЕВСКИЙ Владимир Самуилович — кандидат технических наук, ООО «Петербургская электротехническая компания».

196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 2
(812) 369-26-61

СЕДЛЕР Мария Ильинична — старший преподаватель кафедры управления конструкторско-технологическими инновациями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

192516, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-07-64
msedler@mail.ru

СИЗОВА Ирина Александровна — студентка IV-го курса кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета..

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-06-27
irin.sizova@mail.ru

СУХАНОВ Владимир Андреевич — аспирант кафедры турбиностроения и средств автоматики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)».

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ — ВТУЗ
(812)540-30-48
sukhanoff@mail.ru

ТЕНДЛЕР Михаил Борисович — профессор лаборатории Alfvén Королевского технологического института в Стокгольме, член Королевской шведской академии инженерных наук, иностранный член РАН, Почётный доктор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Kungliga Tekniska högskolan SE-100 44 Stockholm Sweden
+46 8 790-60-00
tendler@fusion.kth.se

ТИТКОВ Василий Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 334-90-93
kosorukov_anton@inbox.ru

ТРЕТЯК Дина Викторовна — инженер отдела ядерной безопасности и надежности Кольской атомной электростанции.

184230, Мурманская обл., г. Полярные Зори
atanasiya@mail.ru

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук профессор, декан факультета технологий и исследования материалов Санкт-Петербургского политехнического государственного университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
gleb@ltc.ru

ТУРУСОВ Сергей Николаевич — профессор Всероссийского научно-исследовательского и технологического института электромашиностроения (ОАО ВНИТИЭМ).

196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 2
(812) 606-61-74

ФОМИН Борис Федорович — доктор технических наук профессор кафедры управления проектами факультета инноватики Санкт-Петербургского политехнического государственного университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 550-58-20
fomin@acea.neva.ru

ФОМИН Олег Борисович — научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории системологии факультет инноватики Санкт-Петербургского политехнического государственного университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 550-58-20
ofomin@acea.neva.ru

ФУКС Михаил Дмитриевич — аспирант, инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»
191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49
(812) 274-16-19

ХОХРЯКОВ Станислав Владимирович — техник научно-исследовательского отделения лазерных, оптоэлектронных и мехатронных систем Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21
(812) 552-33-51
stanislav.hohryakoff@yandex.ru

ЦЗИ Пугуанг — аспирант кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-48-01
jjipuguang@mail.ru

ЦИБУЛЬСКИЙ Игорь Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского политехнического государственного университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-98-43
igor@lfc.ru

ШАГАНОВ Антон Павлович — аспирант кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер НОЦ физики нанокompозитных материалов и электронной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-73-33
shaganovanton@gmail.com.

ШАКИРОВ Мансур Акмелович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, действительный член академии электротехнических наук РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-72
manshak@mail.ru

ШЕВЫРТАЛОВ Сергей Николаевич — лаборант НОЦ функциональных наноматериалов Инновационного парка БФУ имени И. Канта.
236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14
(4012) 59-55-95 доб. 9027
sshevyrtalov@kantiana.ru

ШЕЛЮХОВСКАЯ Диана Витальевна — ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории лазерной и электронно-лучевой технологии кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского политехнического государственного университета.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
Diana@lfc.ru

ШИРОКОВ Александр Аркадьевич — конструктор научно-исследовательского отделения «Лазерные, оптоэлектронные и мехатронные системы» Федерального государственного автономного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.
(812) 552-33-51
shirokov.alex1989@yandex.ru

ШКЛЯРСКИЙ Ярослав Элиевич — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики и электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (Горный университет).
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
(812) 328-82-70

ЯКУЦЕНИ Павел Павлович — доктор биологических наук главный научный сотрудник Центра перспективных исследований Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.
195521, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
ypp@mail.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Тендлер М. Б., Третьяк Д. В. ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИКИ В XXI ВЕКЕ.

Электрическая энергия во многом определяет технический прогресс, способствует развитию высокоточных технологий, помогает обеспечить благосостояние и жизненный комфорт населения. Однако растущая потребность в электроэнергии вызывает постоянную необходимость в разработке и реализации программ по увеличению эффективности работы энергетических установок и предприятий, а также необходимость поиска путей применения и освоения новых источников энергии.

ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ (ТОПЛИВНЫЙ) БАЛАНС. ЭНЕРГОПОТЕНЦИАЛ. МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ.

Богуславский И. З., Иванов В. Г., Рогачевский В. С., Турусов С. Е. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МДС ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Разработан метод, который предусматривает возможность расчета МДС обмотки статора при произвольной форме токов в фазах; эти токи могут изменяться с периодом $T_{врм}$ по произвольному закону, в том числе и не по гармоническому; например, определенную часть периода их амплитуда может оставаться неизменной. Метод позволяет рассчитывать МДС при указанных токах в фазах обмотки и для конструкции обмотки, в которой ширина ее фазных зон может быть неодинаковой. Приведен пример расчета МДС. Решение получено путем представления МДС в виде гармонического ряда функции двух переменных.

НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ. МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ (МДС). ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКОВ. РАЗЛОЖЕНИЕ В ГАРМОНИЧЕСКИЙ РЯД (РЯД ФУРЬЕ). АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА ВО ВРЕМЕНИ.

Зайцев А. В., Костин В. Н. АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫДЕЛЕНИИ ЭНЕРГОРАЙОНА С ИЗБЫТКОМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ.

Разработана математическая модель восстановления баланса мощности при аварийном выделении энергорайонов с избытком генерируемой мощности и электростанциями различного типа.

АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ. ЭНЕРГОСИСТЕМА. ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРАЙОНА С ИЗБЫТОЧНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Шакиров М. А. ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 2: ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ОБМОТКАМИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ.

Представлены аналитические соотношения по учету влияния конечной толщины обмоток для правильного объяснения принципа действия и работы идеализированного трансформатора в любых установившихся и переходных режимах. Подтверждена достоверность возникновения в стали так называемых «аномальных», т. е. необъяснимых с точки зрения традиционной теории, «сверх- и антипотоков» при КЗ одной из обмоток. Раскрыт смысл понятий сверх- и антипотоков для динамических процессов при внезапных КЗ трансформатора.

ТРАНСФОРМАТОР. ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ ОБМОТКИ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Богов И. А., Безухов А. П., Суханов В. А., Волковицкий И. Д., Донцов Н. Ю. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОТУРБИННЫХ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ.

Приводится описание созданного уникального лабораторного стенда для экспериментального исследования рабочих процессов в паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсационных установках. Рассматриваются технические возможности стенда, позволяющие осуществлять оценку влияния различных геометрических параметров на рабочие процессы.

ПАРОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА. ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМАЯ КОНДЕНСАЦИОННАЯ УСТАНОВКА. ТЕПЛООБМЕННЫЙ МОДУЛЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Иванов В. Н., Иванов Д. В. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ТОКОПОДВОДОВ, ИНДУКТОРА И НАГРЕВАЕМОЙ ДЕТАЛИ.

В статье рассмотрено распространение электромагнитной энергии в системе «токоподводы — индуктор — нагреваемая заготовка». Рассмотрено распространение энергии в зазорах между токоподводящими элементами и между индуктором и нагреваемой заготовкой, а также внутри материала элементов системы.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭНЕРГИЯ. ВЕКТОР УМОВА — ПОЙНТИНГА.

Зайцев А. В., Костин В. Н. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ.

Разработана методология автоматизированной системы контроля эффективности действия АОПЧ для восстановления баланса мощности в районах потенциального выделения с избытком генерации, учитывающая характеристики генерирующего оборудования и позволяющая изменять уставки и направление действия локальной противоаварийной автоматики в режиме реального времени.

АВТОМАТИКА ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ. ЭНЕРГОСИСТЕМА. ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОРАЙОНА С ИЗБЫТОЧНОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС.

Косоруков А. В., Титков В. В. РАСЧЕТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩИХ УДАРАХ МОЛНИИ.

В работе описаны основные положения расчета перенапряжений при последующих ударах молнии. Задача разделена на две процедуры. Первая — расчет электромагнитного поля с помощью FDTD-метода, вторая — расчет переходного процесса в кабельных линиях с помощью метода бегущих волн.

ПОСЛЕДУЮЩИЙ УДАР МОЛНИИ. FDTD-МЕТОД. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ.

Шклярский Я. Э., Добуш В. С. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.

В статье проанализировано влияние энергетических характеристик нелинейной нагрузки на расчет параметров цепи. На основе примера электрической цепи рассчитана погрешность применения схем замещения нелинейной нагрузки с учетом и без учета углов сдвига фаз между током и напряжением на высших гармониках.

НЕЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Каган А. В., Виноградов А. Л. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ АСИММЕТРИИ.

Разработана универсальная математическая модель несимметричной асинхронной машины, учитывающая различные виды асимметрии и их комбинацию. В соответствии с предлагаемым методом расчета несимметрия интерпретируется как параметрический фактор.

АСИНХРОННЫЕ НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МАШИНЫ. ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ ФОРМА МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. МЕТОД РАСЧЕТА.

Латышев Д. В., Митюков А. А., Петров М. Ю., Попов В. А. ОБ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.

Приводятся результаты экспериментальных исследований коэффициента поперечной деформации, обусловленной вязкопластическими свойствами материала. Опыты проводились при нормальной температуре над тонкостенными трубчатыми образцами из хромоникелевой стали в условиях возрастающей и постоянной нагрузок. Установлено, что значения коэффициента, определенные по результатам мгновенного и квазистатического нагружений, а также по отношению вязкопластических составляющих деформаций, сохраняются неизменными и практически не различаются на всем промежутке однородных неупругих деформаций. Значения коэффициентов, установленные по экспериментам на ползучесть при постоянной нагрузке, зависят от уровня нагрузки, при котором производился опыт.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ. ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

Фукс М. Д., Орышенко А. ., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛИТОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА 45X26N33C2B2.

Экспериментально определена длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26N33C2B2 при температуре 1150 °С. Показано, что по этой характеристике он не уступает более легированным никелем и вольфрамом сплавам, что позволяет повысить допустимый температурный интервал его эксплуатации до 1100—1200 °С. Получено уравнение, позволяющее рассчитывать значение длительной прочности сплава 45X26N33C2B2 при различной величине внешнего напряжения.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КРИВАЯ.

Васильева Е. С., Кидалов С. В., Шевырталов С. Н., Кольцова Т. С. ПОЛУЧЕНИЕ И СТРУКТУРА ПОРОШКОВ МЕДИ, ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ДЕТОНАЦИОННЫМИ НАНОАЛМАЗАМИ.

В статье представлен метод получения наноструктурированного композиционного материала Cu/детонационные наноалмазы (ДНА). Содержание ДНА в порошках меди варьировалось в диапазоне 0,5–5,0 масс. %. Средний размер ДНА в суспензии составлял 4–6 нм. Процесс заключался в распылении и высушивании смеси водного раствора медной соли и суспензии наноалмазов с последующей восстановительной термообработкой. Получены наноконпозиционные порошки со средним размером частиц 20–30 мкм и формой близкой к сферической. Исследованы состав и структура материала, его потенциальные области применения и возможности метода.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ. ДЕТОНАЦИОННЫЕ НАНОАЛМАЗЫ. УПРОЧНЕНИЕ ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ. НАНОЧАСТИЦЫ. МЕТОД РАСПЫЛЕНИЯ ИЗ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ.

Цзи Пугуанг, Сизова И.А., Климова О.Г. СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, УПРОЧНЕННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ.

В статье представлен метод получения наноструктурированного композиционного материала Cu/ γ -Al₂O₃. Содержание оксида алюминия в материале варьировалось в пределах 0,2–2,0 вес. %. Путем прессования, спекания и горячего прессования получены образцы дисперсноупрочненного сплава с гомогенным распределением упрочняющих частиц γ -Al₂O₃ размером 30–40 нм в медной матрице. Были проведены исследования механических характеристик и электропроводности материала и сделан вывод, что полученный материал обладает сопоставимыми механическими свойствами и электропроводностью в сравнении с промышленными сплавами.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕДИ. ОКСИД АЛЮМИНИЯ. УПРОЧНЕНИЕ ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ. ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ОТЖИГ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ.

Мишин М. В., Александров С. Е., Кретушева И. В., Боричева И. К. ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР МИКРОМЕТРОВОГО РАЗМЕРА ИЗ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ.

В статье представлены результаты исследования морфологии поверхности фрактальных структур, состоящих из наночастиц диоксида кремния размером 8–16 нм, синтезируемых в низкотемпературной плазме ВЧ-разряда при атмосферном давлении. Фрактальная размерность полученных структур в зависимости от условий процесса синтеза варьировалась в интервале 1,45–2.

ВЧ-РАЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ. ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ. НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА ТИТАНА.

Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Шелюховская Д. В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИЯ В МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ.

В статье рассмотрено влияние параметров режимов лазерно-дуговой сварки на распределение магния по сечению металла шва, а также определен способ устранения порообразования при лазерно-дуговой сварке алюминиево-магниевого сплава.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. МЕТАЛЛЫ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. РЕШЕНИЕ «ОБРАТНОЙ» ЗАДАЧИ.

Протопопова В. С., Александров С. Е., Шаганов А. П., Лесин С. В. ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ НИКЕЛЕВЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ.

В статье представлены результаты исследования морфологии поверхности и состава никелевых слоев, полученных химическим осаждением из газовой фазы металлоорганического соединения бис-(этилциклопентадиенил) никеля в зависимости от температуры осаждения. Было показано, что в диапазоне температур от 640 до 920 К возможно формирование различных слоев, состоящих из отдельных наночастиц, покрытых углеродной оболочкой, из никелевых наночастиц и углеродных наноконусов, плотных покрытий из никелевых частиц с небольшим содержанием Ni₃C, а также «рыхлых» слоев, содержащих углерод в форме графита. Формирование плотных никелевых слоев с небольшим содержанием Ni₃C происходило в узком диапазоне температур вблизи 800 К.

ХОГФ. МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ. БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ. СЛОИ Ni.

Бундур М. С., Прокопенко В. А., Пелевин Н. А. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с модернизацией шпиндельных узлов металлорежущих станков. Представлены сравнительные результаты исследований известных вариантов систем управления гидростатическими подшипниками и рекомендации по повышению их динамического качества посредством радиального смещения шпинделя.

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЗАПАС ПО ФАЗЕ. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС. ДИНАМИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО. СМЕЩЕНИЕ.

Максаров В. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЗА СЧЕТ ЛОКАЛЬНОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ.

Разработан метод, использующий локальное воздействие на поверхность материала, которое приводит к изменению кристаллической решетки в локальной зоне, образованию высокоэнергетических конфигураций и возникновению повышенной метастабильности структуры в этой локальной области. Все это позволяет обеспечить в локальной зоне в процессе резания периодическое изменение условий обработки по сравнению с исходным материалом.

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ. ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ. ЛОКАЛЬНАЯ МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ.

Бритвин С. Н., Глуховской А. В., Коршунов А. В. УСТАНОВКА ДЛЯ ДЕМЕРКУРИЗАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП С ФИЛЬТРАЦИЕЙ РТУТИ НА АДсорбЕНТЕ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА И СЕЛЕНА.

Разработана лабораторная установка для демеркуризации компактных люминесцентных ламп. Установка позволяет очищать технологический воздух от ртути до концентрации $0,002 \text{ мг/м}^3$, что в пять раз ниже ПДК паров ртути в воздухе производственных помещений. Высокая эффективность удаления ртути достигается благодаря использованию в качестве адсорбента ртути нового нанокompозитного материала на основе диоксида титана и селена.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ЛАМПА. РТУТЬ. СЕЛЕН. ДИОКСИД ТИТАНА. АДсорбЕНТ. НАНОКОМПОЗИТ.

Грязнов Н. А., Кочкарев Д. А., Хохряков С. В., Широков А. А. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.

В работе рассматриваются методы измерений геомагнитного поля спутниковыми системами, особенности их применения и возникающие при этом проблемы. Предлагается подход к решению этих проблем за счет создания распределенной спутниковой системы измерения ГМП на основе сверхмалых космических аппаратов (СМКА). Обсуждаются особенности методики и обработки измерений. Новизна предлагаемого подхода состоит в возможности исследования локальных возмущений геомагнитного поля.

КОСМОС. СМКА. НАНОСПУТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ. ДАТЧИК. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ.

Агеев В. О., Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф., Фомин О. Б. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РЕИНЖИНИРИНГА ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ.

Производство металлопродуктов рассматривается как открытая производственная система. По ее эмпирическому описанию методами физики открытых систем автоматически генерируется научное знание о состояниях производственной системы и внутрисистемных механизмах, формирующих изменчивость ее показателей. Полученное знание используется при подготовке реинжиниринга производственного процесса, направленного на обеспечение его воспроизводимости.

ТЕХНОЛОГИИ ГЕНЕРАЦИИ ЗНАНИЯ. ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ. РЕСУРСЫ ЗНАНИЯ. РЕСУРСЫ РЕШЕНИЙ. ОТКРЫТЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РЕИНЖИНИРИНГА. ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛЬНОГО ЛИСТА.

Григорьев Б. С., Головин О. А., Викторов Е. Д., Кудряшов Е. В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

В статье рассмотрено построение математической модели контактной подвески методом конечных элементов. Исследуется ее взаимодействие с токоприемником, движущимся с большой скоростью. Приведены результаты для скорости движения 200 км/ч .

КОНТАКТНАЯ ПОДВЕСКА. ТОКОПРИЕМНИК. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ. УСЛОВИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ.

Никитков Н. В., Дорофеев П. А. ВЫЯВЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО ФАКТОРА, ВЫЗЫВАЮЩЕГО ТРЕЩИНЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ШЛИФУЕМЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.

В статье рассмотрены вопросы силового и теплового взаимодействия вершин режущих алмазных зерен в кругах с поверхностью заготовок из керамики. Обосновано доминирующее действие силового фактора на образование трещин в поверхностном слое материала заготовок.

АЛМАЗНЫЕ КРУГИ. ПОВЕРХНОСТЬ ЗАГОТОВКИ. СИЛЫ РЕЗАНИЯ. ГЛУБИНА ТРЕЩИН.

Авотин Е. В., Добрецов Р. Ю. МЕТОД РАСЧЕТА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ДВИЖЕНИЕ КОЛЕСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ.

Предложены критерии оценки энергопотребления при движении колесного транспортного средства по деформируемому грунту. Получены зависимости для расчета энергозатрат, связанных с формированием силы тяги, вертикальным прессованием грунта и буксованием.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ. КОЛЕСНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ. НАГРУЗКИ НА ГРУНТ. ГЛУБИНА КОЛЕИ.

Поляков П. А. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБОДА ТОРМОЗНОГО БАРАБАНА.

Рассматривается аналитическое решение задачи по определению средних температур обода тормозного барабана. Установлены зависимости между средней температурой обода и геометрическими, термодинамическими параметрами тормозного барабана, а также аналитическая зависимость влияния параметров движения транспортного средства на количество тепла, генерируемое в парах трения.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС. КОЭФФИЦИЕНТ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ. ТЕПЛООБМЕН. КОНВЕКЦИЯ. РАБОЧАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ОБОДА БАРАБАНА.

Гучинский Р. В., Петин С. В. РАЗРАБОТКА УЗЛА КОНСТРУКЦИИ СУДНА ПО УСЛОВИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ.

Приведены результаты расчетов усталости узла конструкции корпуса и надстройки в районе окончания скользящего (расширительного) соединения. Надежность этого узла рассматривается как фактор надежности конструкции корпуса, поскольку продольные стенки надстройки служат продолжением бортовой обшивки. Оценки долговечности узла использованы для выбора вариантов с приемлемыми характеристиками ресурса. Некоторые варианты конструкции узла согласно результатам расчетов по правилам DNV и данным о сопротивлении сталей рассматриваются как недостаточно надежные. Дополнительные расчеты с помощью деформационного метода («Strain Life» по международной классификации), в которых использованы характеристики сопротивления стали, позволили уточнить показатели надежности вариантов конструкции узла. Для осуществления последних разработан прием приведения функции распределения напряжений к блочной схеме, эквивалентной распределению по усталостному повреждению.

УСТАЛОСТЬ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ. РАСШИРИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СТЕНКАХ НАДСТРОЕК. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. РАСЧЕТНЫЕ S-N КРИВЫЕ. НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ. ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА УСТАЛОСТИ.

Маслов В. И., Седлер М. И. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ.

Рассмотрена проблема повышения качества управления процессами редакционной деятельности путем создания автоматизированной системы, оснащенной веб-интерфейсом. Обоснована необходимость разработки. Разработаны IDEF(0) модели процессов регистрации авторов, авторизации пользователя и регистрации статьи, ее рассмотрения ученым секретарем, назначения рецензента и рецензирования статьи.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. ДОСТУП К ИНФОРМАЦИИ. КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ. ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ. ЭЛЕКТРОННОЕ СООБЩЕНИЕ. ДОКУМЕНТИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИЯ. ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ. ОПЕРАТОР ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.

Козырев С. В., Кораблев В. В., Якуцени П. П. НОВЫЙ ФАКТОР ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА: ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ.

Многочисленные исследования показывают, что в поверхностной, подземной питьевой воде часто обнаруживаются активные фармацевтические субстанции или их смеси. Основными источниками этого загрязнения окружающие среды является выделение человеком неизмененных лекарств или выбрасывание неиспользованных упаковок. Измеряемые концентрации оказываются невелики, однако факт наличия



персистирующих и биологически активных загрязнителей вызывает определённое беспокойство с точки зрения угрозы здоровью. Обсуждаются имеющиеся экспериментальные данные, потребности в новых исследованиях и организационных инициативах.

ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА, ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ПИТЬЕВАЯ ВОДА, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Петров Н. В., Гуменюк В. И. ПРИЧИНЫ ТАЯНИЯ ПОЛЯРНЫХ ШАПОК ПЛАНЕТЫ.

В основе всех климатических и погодных условий Земли лежит универсальное свойство: режим жизни планеты и всех обитателей на ней зависит от того, в каком полушарии магнитного поля находится планета относительно Солнца или (и) Солнечная система в целом — относительно магнитных полушарий Зодиака и Галактики.

Современные аномальные процессы таяния льдов полярных шапок, а также образования льдов, вечной мерзлоты, углеводородов в другие временные сроки в этих же местах напрямую связаны с энергетическим дыханием планеты. Физические процессы, идущие над магнитными полюсами Земли, аналогичны процессам в аппаратах струйной энергетики, основанных на эжекции и инжекции, лежащих в основе образования и поддержания индивидуальности вихревых структур. Благодаря достижениям современной космической техники вихревые структуры обнаружены над полюсами Венеры, Юпитера, Сатурна.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ДЫХАНИЕ. АППАРАТ СТРУЙНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. МАГНИТОСФЕРА. ПЛАЗМЕННЫЙ МЕХАНИЗМ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ. ТАЯНИЕ ЛЬДОВ

Гуменюк В. И., Кулинкович А. В. ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ УРАНИЛОВ.

Показана необходимость создания экспрессного метода контроля урана в природных водах ввиду его высокой токсичности. Экспериментально исследовано влияние естественных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах солей урана. Вариационный характер зависимостей наработки кислородных форм соотносится с динамикой обменных процессов в слабых джозефсоновских структурах связанных состояний воды.

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА. СВЯЗАННАЯ ВОДА. СОЕДИНЕНИЯ УРАНА. МЕТАЛЛЫ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ.

Петриченко М. Р., Петросова Д. В., Петроченко М. В. ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС ВОЗДУХОМ КОНСЕРВАТИВНОЙ ПРИМЕСИ (ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛОТЫ) СКВОЗЬ СТЕНУ.

Применение формулы Дюпюи для средней скорости фильтрации с постоянным и с переменным значением и коэффициента фильтрации позволяет перенос консервативной и неконсервативной примеси стилизовать линеаризуемым дифференциальным уравнением. Распределение концентраций связано с решением задачи на минимум положительного функционала. При малых значениях фильтрационного числа Рэлея экстремали мало отличаются от траекторий уравнения переноса. В области «больших» чисел Рэлея существуют экстремали, реализующие минимальное изменение концентрации температуры и теплового потока, т. е. максимальный прогрев стены горячим фильтрующимся воздухом.

ФИЛЬТРАЦИЯ. КОНСЕРВАТИВНАЯ ПРИМЕСЬ. ФОРМУЛА ДЮПЮИ. КОЭФФИЦИЕНТ ФИЛЬТРАЦИИ.

Киселёв В. Г. ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ КОРРОЗИИ.

В статье рассмотрены основные методы оценки защищенности подземных металлических сооружений от коррозии на основе различных методов измерения потенциалов и отмечены тенденции их развития. Повышенное внимание уделено оценке достоверности измерений потенциалов, прежде всего с использованием метода отключения.

МЕТОД ОТКЛЮЧЕНИЯ. МЕТОД МОДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭХЗ.

Лагушкин С. Г. СОВЕТ РЕКТОРОВ ВУЗОВ ЛЕНИНГРАДА: СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (70-е — 80-е годы XX века)

Рассмотрена структура и основные направления деятельности Совета ректоров вузов Ленинграда в период 70-х — 80-х годов XX века. По мнению автора, структура Совета была тесно связана с направлениями

его деятельности, что в значительной степени определило роль в системе управления вузами в регионе. Приведены краткие биографические справки о руководителях Совета того времени, показана роль Политехнического института им. М.И. Калинина в становлении как непосредственно Совета ректоров, так и многих его структурных звеньев.

СОВЕТ. РЕКТОР. РЕГИОН. УПРАВЛЕНИЕ. СТРУКТУРА. КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ С ВЫСШИМ ОБРАЗОВАНИЕМ.

Горюнов В. П. ОБ ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ НА «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ФОРУМЕ — 2012».

Содержится перечень основных мероприятий Санкт-Петербургского образовательного форума 2012 года. Представлен научный обзор докладов на конференции «Развитие инженерного образования в России», изложена основная посылка выступления В.П. Горюнова (докладчика от СПбГПУ) «Единство социального и естественного содержания в инженерном образовании». Сформулирован вывод о поступательном развитии высшего образования в России и лидирующих позициях Политехнического университета среди технических вузов.

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО. НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ. СОЦИАЛЬНАЯ СУЩНОСТЬ ТЕХНИКИ. ОБЩЕСТВЕННЫЙ ПРОГРЕСС.

Митрофанов А. М., Никулина С. П. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ НА НИР В ВУЗЕ.

В статье рассмотрены способы распределения государственного задания на НИР в вузе. Предложены критерии сопоставительной оценки заявок на проведение НИР, обеспечивающие эффективное использование средств государственного задания.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА. ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЗАДАНИЕ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. КРИТЕРИЙ. ОЦЕНКА.

Демидов А. И. ПРОФЕССОР В.Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО О ПРОБЛЕМАХ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ.

Приведен текст малоизвестной статьи профессора Санкт-Петербургского политехнического института В.Е. Грум-Гржимайло «К вопросу о среднетехнической школе» (1916 г.).

ИНСТИТУТ. ОБРАЗОВАНИЕ. СПЕЦИАЛЬНОСТЬ. МЕТАЛЛУРГИЯ. ПЕЧИ.

Кесаманлы М. Ф., Кесаманлы Ф. П. ПОЛИТЕХНИКИ, ПРОСЛАВИВШИЕ НАШУ СТРАНУ. ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ КОБЕКО.

Краткий очерк жизни и деятельности выдающегося ученого-политехника, члена-корреспондента АН СССР П.П. Кобеко

ЛПИ. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ. ЭЛЕКТРОФИЗИКА. ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИЯ. БИОГРАФИЯ.

Липин В. А. А.К. ВАН-ДЕР БЕЛЛЕН – ЗАБЫТОЕ ИМЯ В ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.

В статье приводятся ранее не опубликованные сведения о судьбе и творческой деятельности выпускника металлургического факультета Петроградского политехнического института Александра Константиновича Ван-дер Беллена (1891–1944). На основе архивных материалов, редких и малодоступных публикаций, а также воспоминаний отражены малоизвестные страницы развития цветной металлургии страны в начале XX века и в послереволюционный период.

ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. ИСТОРИЯ. ВАН-ДЕР БЕЛЛЕН. ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ. РИДДЕР. УРКВАРТ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Tendler M. B., Tretiak D. V. FUTURE ENERGY XXI CENTURY.

Electrical energy is largely determined by technical progress, promotes high-precision technology, helping to ensure the welfare and comfort of life of the population. However, the growing demand for electric power is a continuing need to develop and implement programs to increase the efficiency of power plants and enterprises, as well as the need to find ways of using and developing new energy sources.

ENERGY. ENERGY EFFICIENCY. ENERGY SOURCES. ENERGY (FUEL) BALANCE. ENERGY POTENTIAL. MODEL OF ENERGY.

Boguslawsky I. Z., Ivanov V. G., Rogachevsky V. S., Turusov S. N. DETERMINATION STATOR WINDING MMF METHOD OF FREQUENCY CONTROLLED A.C. MACHINES FOR THEIR PERFORMANCE INVESTIGATION.

In article is developed a MMF calculation method for stator winding by arbitrary alternation of currents in phases with the period T_{BPM} , incl. alternation according the not harmonious law; for instance, their amplitudes by some part of T_{BPM} were invariable. This method for MMF calculation is useful also for stator winding construction by different breadth of phases zones. The example of MMF calculation is given. Mathematical solution is achieved by transformation of MMF as a harmonious series (Fourier series) with two variables: space and time harmonics.

NOT SYMMETRICAL MODE. THE ENGINE. MAGNETOMOTIVE FORCE COIL (IBC). A PERIODIC CHANGE OF THE CURRENT. ARRANGED IN A HARMONIC SERIES (FOURIER). APPROXIMATION OF THE DEPENDENCE CURRENT TIME.

Zaitsev A. V., Kostin V. N. AUTOMATIC FREQUENCY LIMITATIONS ACCIDENTAL RELEASE POWER DISTRICT WITH EXCESS POWER GENERATED.

A mathematical model of rebalancing power in an emergency allocation of power district with excess power generated and power plants of various types.

AUTOMATION LIMITED INCREASED FREQUENCIES. THE POWER. THE ALLOCATION OF POWER DISTRICT WITH SURPLUS GENERATION. THE MATHEMATICAL MODEL.

Shakirov M. A. THEORY OF TRANSFORMERS. PART 2: IDEALIZED WINDING TRANSFORMER WITH FINITE THICKNESS.

The analytical relation to mainstream influence of finite thickness of the windings for correct explanation of the principle of action and of an idealized transformer in any steady-state and transient conditions. Confirmed the accuracy of the steel so-called «anomalous», ie inexplicable in terms of the traditional theory of «super — and antipotokov» with short-circuit one winding. Disclosed above, the meaning — and anti-stream for dynamic processes with sudden short circuit transformer.

TRANSFORMERS. PRIMARY AND SECONDARY WINDINGS. THE MAGNETIC FLUX VECTOR DIAGRAM OF SHORT CIRCUIT RESISTANCE.

Bogov I. A., Bezukhov A. P., Sukhanov V. A., Volkovitsky I. D., Dontsov N. Y. STAND FOR RESEARCH WORKFLOWS IN STEAM TURBINE AIR-CONDENSING UNITS.

In the article presented the description of the unique laboratory bench for working procedure experimental investigations in air-cooling steam-turbine units. High technical feasibilities of laboratory test bed, permitting carrying out different geometrical parameters — impact evaluation on operating processing, are considering.

STEAM-TURBINE UNIT. AIR-COOLING CONDENSING UNIT. HEAT-EXCHANGE MODULUS. SIMULATION.

Ivanov V. N., Ivanov D. V. THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC ENERGY IN THE SYSTEM CONSISTING OF CURRENT LEADS, INDUCTOR AND HEATED WORKPIECE.

The paper considers the propagation of electromagnetic energy in a system of current leads—inductor—heated workpiece. The propagation of energy in the gaps between the current-carrying elements and between the inductor and the heated workpiece as well as within the material of the system elements is considered.

INDUCTION HEATING. ELECTROMAGNETIC ENERGY. POYNTING VECTOR

Zaitsev A. V., Kostin V. N. AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE EFFECTIVENESS OF THE AUTOMATIC INCREASE IN THE FREQUENCY LIMITS.

The methodology of the automated system for monitoring the effectiveness of the AOHR to restore the balance of power in areas of potential separation with excess generation, taking into account the characteristics of the generating equipment, and allows you to change settings and the direction of a local emergency control in real time.

AUTOMATION LIMITED INCREASED FREQUENCIES. THE POWER. THE ALLOCATION OF POWER DISTRICT WITH SURPLUS GENERATION. SOFTWARE SYSTEMS.

Kosorukov A. V., Titkov V. V. CALCULATION OF THE SURGE IN THE CONTROL CABLE LINES DURING SUBSEQUENT LIGHTNING STRIKES.

This paper describes the main steps of the calculation of surges during subsequent lightning strikes. The problem was divided into two procedures. First — the calculation of the electromagnetic field using FDTD method, the second — the calculation of the transient in the cable using the method of traveling waves.

SUBSEQUENT LIGHTNING STRIKE. FDTD METHOD. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.

Shkliarsky J. E., Dobush V. S. EFFECT OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE NONLINEAR LOAD TO DETERMINE THE ELECTRICAL PARAMETERS.

The paper analyzes the influence of the energy characteristics of the nonlinear load calculation of the circuit parameters. On the basis of the example circuit is designed error of equivalent circuits with non-linear load and without the phase-angles between the current and voltage at the higher harmonics.

NONLINEAR LOAD. HARMONICS. MODELING. POWER ELECTRONICS. EQUIVALENT CIRCUIT.

Kagan A. V., Vinogradov A. L. MATHEMATICAL MODEL OF INDUCTION MACHINES WITH DIFFERENT TYPES OF ASYMMETRY.

We have developed a versatile mathematical model of a nonsymmetrical machine which takes into consideration various types of non-symmetry and their combination. According to the way of calculations suggested, non-symmetry is treated as a parametric factor.

ASYNCHRONOUS NONSYMMETRICAL MACHINES. ELLIPTICAL GEOMETRY MAGNETIC FIELD. MATHEMATICAL MODEL. METHOD OF CALCULATION.

Latyshev D. V., Mityukov A. A., Petrov M. Ju., Popov V. A. CHANGE THE TRANSVERSE DEFORMATION OF VISCOPLASTIC.

The results of experimental studies of the transverse deformation caused viscoplastic material properties. The experiments were conducted at ambient temperature over a thin-walled tubular specimens of stainless steel in the face of increasing and constant load. Found that the coefficient determined by the results of instantaneous and quasi-static loading, and relative components of viscoplastic strains are kept secure and do not differ on the whole interval of homogeneous elastic deformation. The coefficients established by experiments on creep under constant load, depending on the load at which the experiment was.

THE TRANSVERSE STRAIN. VISCOPLASTIC PROPERTIES.

Fuks M. D., Orischenko A. S., Kondratyev S. Yu., Anastasiadi G. P. LONG-TERM STRENGTH OF CAST HEAT-RESISTANT ALLOY 45Cr26Ni33Si2Nb2.

Experimentally was determined long-term strength of cast heat-resistant alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2 at the temperature of 1150°C. It was shown that on this feature this alloy is not inferior to alloys with more nickel and tungsten, which allows to rise its operational temperature range up to 1100...1200°C. The equation, which allows to calculate the value of long-term strength of the alloy 45Cr26Ni33Si2Nb2 at different values of the external stress was found.

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. LONG-TERM STRENGTH. PARAMETRIC CURVE.

Vasil'eva E. S., Kidalov S. V., Klimov G. G., Shvartalov S. N., Koltsova T. S. PRODUCTION AND STRUCTURE OF COPPER POWDER, DISPERSION-STRENGTHENED NANODIAMONDS DETONATION.

In this paper presents a method for preparation of nanostructured composite material Cu / detonation nanodiamonds (DND). Contents of DND in copper powder were changed from 0.5 to 5.0 wt. %. The average size of DND in suspension is 4-6 nm. The process includes spray-drying the mixture of the aqueous solution of copper salt and nanodiamonds suspension with further subsequent reduction heat treatment of product. The average size of obtained nanocomposite powders is 20-30 micrometers, with a nearly spherical shape. The composition and structure of produced material, potential applications and possibilities of this method were studied.

COPPER-BASED COMPOSITE MATERIALS. DETONATION NANODIAMOND. DISPERSION-STRENGTHENED MATERIALS. NANOCOMPOSITES. SPRAY- DRY METHOD.

Puguang J., Sizova I. A., Klimova O. G. SYNTHESIS, STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON COPPER AND HARDENED BY NANOSIZED INCLUSIONS OF ALUMINUM OXIDE.

This paper presents a method of producing nano-structured composite material Cu- γ -Al₂O₃. The content of aluminum oxide in the material ranged from 0,2–2,0 wt.%. By pressing, sintering and hot pressing obtained dispersion-hardened alloy with homogeneous distribution of hardening particles γ -Al₂O₃ size of 30–40 nm in the copper matrix. Mechanical and electrical characteristics of the material were studied and concluded that the material has comparable mechanical properties and electrical conductivity as compared with industrial alloys.

COMPOSITE MATERIALS BASED ON COPPER. ALUMINUM OXIDE. DISPERSION HARDENING. RECOVERY ANNEALING. MECHANICAL PROPERTIES. ELECTRICAL CONDUCTIVITY.

Mishin M. V., Alexandrov S. E., Kretysheva I. V., Boricheva I. K. FORMATION OF MICROMETER GAUGE FRACTAL STRUCTURES FROM SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES.

Experimental investigation results of morphology of fractal structures were reported for silicon dioxide nanoparticles processed from tetraethoxysilane by atmospheric pressure PECVD. Fractal dimension parameter of bidimensionals agglomerates formed on the substrate surface from nanoparticles were varied in the range 1,45–2.

RF-DISCHARGE. ATMOSPHERIC PRESSURE. FRACTAL DIMENTION PARAMETER. SILICON DIOXIDE NANOPARTICLES.

Turichin G. A., Tsibulskiy I. A., Kuznetsov M. V., Shelyukhovskaya D. V. DISTRIBUTION OF MAGNESIUM IN WELD METALL SEAM AT LASER-ARC WELDING OF ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOYS.

Influence of laser-arc welding parameters on distribution magnesium in welding seam was considered and also method of prevention porosity at laser-arc welding of aluminium-magnesium alloys was define in the publication.

LASER-ARC WELDING. ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOYS. DISTRIBUTION OF MAGNIUM. PREVENTION OF POROSITY.

Protopopova V. S., Alexandrov S. E., Shaganov A. P., Lesin S. V. STUDY OF MORFOLOGY OF MOCVD-PROCESSED NICKEL FILMS FROM BIS-(ETHYLCYCLOPENTADIENYL) NICKEL).

Experimental investigation results of dependence of morphology and chemical composition of the deposition temperature were reported for nickel films processed from bis-(ethylcyclopentadieny) nickel by MOCVD. Formation of dense layer occurs in a narrow range of 800 K.

MOCVD. MORFOLOGY. BIS-(ETHYLCYCLOPENTADIENYL) NICKEL. Ni FILMS.

Bundur M. S., Prokopenko V. A., Pelevin N. A. INCREASE OF EKSPLUTATIONNO-TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE PROCESS EQUIPMENT.

In a paper the questions linked with modernising of head slides of cutting machines are considered. Comparative results of probes of known variants of control systems by liquid bearings and recommendations about heightening of their dynamic quality by means of head slide merging are presented.

THE HYDROSTATIC BEARING. THE CONTROL SYSTEM. THE STOCK ON THE PHASE. TRANSIENT. DYNAMIC QUALITY. DISPLACEMENT.

Maksarov V. V. INCREASE OF CUTTING THROUGH LOCAL METASTABILITY.

Following method allowing effectively to control the cutting process of hard-to-cut materials through implementing local preliminary physical action (LPA), which helps to create local structural metastability on the outer layer that belongs to the processed material. Theoretical and experimental researches showed possibility to control the cutting process and to predict the dynamic stabilization while processing high-precision products. That provides the possibilities for further technological improvement for metal working operation at the wide range of materials and cutting parameters.

CUTTING OF MATERIALS AND CUTTING PROCESSING. DYNAMIC POSITIONING. LOCAL METASTABILITY.

Britvin S. N., Glukhovskoy A. V., Korshunov A. V. INSTALLATION FOR DEMERCURIZATION FLUORESCENT LAMPS WITH MERCURY ON THE ADSORBENT FILTRATIONS OF TITANIUM DIOXIDE AND SELENIUM.

A laboratory-scale system was installed for mercury removal from compact fluorescent lamps. The system reduces mercury concentration in exhaust technological air to as low as 0.002 mg/m³ that is five times lower than technological exposure limit accepted in Russia. High effectiveness of mercury removal is achieved due to use of novel nanocomposite adsorbent based on titanium dioxide and selenium.

FLUORESCENT LAMP. MERCURY. SELENIUM. TITANIUM DIOXIDE. ADS.

Gryaznov N. A., Korenkov A. N., Kochkaryov D. A., Modyagin A. I., Khokhryakov S. V., Shirokov A. A. DISTRIBUTED NETWORK BASED MIDGET SPACECRAFT VOLTAGE MEASURING EARTH'S MAGNETIC FIELD.

The paper deals with methods of measurement of the geomagnetic field (GMF) via satellite systems, peculiarities of their use and associated problems. The approach for overcoming them through the creation of a distributed nano-satellite measurement system is offered. The specific features of the methodology and analysis of the measurements are discussed. The novelty of our approach is the ability to study local perturbations of the geomagnetic field.

SPACE. NANOSATELLITE. MEASUREMENT. SENSOR. GEOMAGNETIC FIELD. DISTRIBUTED NETWORK.

Ageev V. O., Kachanova T. L., Fomin B. F., Fomin O. B. ANALYTICAL PREPARATION FOR REENGINEERING OF MANUFACTURING THE METAL PRODUCTS ON THE BASIS OF SYSTEM KNOWLEDGE.

Manufacturing the metal products is considered here as an open production system. In accordance with empirical description of the system, the scientific knowledge about states of the production system and about its internal mechanisms (that are forming variability of the system parameters) is automatically generated by the methods of the physics of open systems. Obtained knowledge is used in preparation for reengineering of the production process, aimed to support of the process reproducibility.

GENERATION TECHNOLOGY KNOWLEDGE PHYSICS OF OPEN SYSTEMS. RESOURCES. RESOURCES DECISIONS OPEN OPERATING SYSTEMS ANALYSIS TRAINING REENGINEERING PRECISION MANUFACTURING PROCESS. PRODUCTION OF STEEL SHEET.

Grigoriev B. S., Golovin O. A., Wiktorov E. D., Kudryashov E. V. MATHEMATICAL MODELLING OF PANTOGRAPH CATENARY MECHANICAL INTERACTION FOR THE HIGH-SPEED ELECTRIFIED RAILWAYS.

Development of mathematical model of a catenary by finite elements method is considered. Its interaction with pantograph that has a high speed is investigated. Results for speed of 200 km/h are presented.

CATENARY. PANTOGRAPH. METHOD OF FINITE ELEMENTS. WAVE EQUATION. COMPLIMENTARITY CONDITION.

Nikitkov N. V., Dorofeev P. A. REVEALING OF THE DOMINATING FACTOR CAUSING THE CRACKS IN THE SUPERFICIAL LAYER OF GROUND PREPARATIONS FROM FIRM FRAGILE MATERIALS.

In clause questions of power and thermal interaction of tops of cutting diamond grains in circles with a surface of preparations from ceramics are considered. Dominating action of the power factor on formation of cracks in a superficial layer of a material of preparations is proved.

DIAMOND CIRCLES. SURFACE OF PREPARATION. FORCE OF CUTTING. DEPTH OF CRACKS.

Avotin E. V., Dobretsov R. Yu. METHOD FOR MOVING WHEEL ENERGY CONSUMPTION FOR TRANSPORT VEHICLES.

Suggested criteria for evaluation of energy consumption for wheeled vehicle moving on the deformable ground surface. Obtained the characteristics for calculation of energy consumption related to the draft force generation, vertical compression of soil and wheel slipping.

ENERGY COST EVALUATION. WHEELED RUNNING GEAR. SOIL LOADING. TRACK DEPTH.

Polyakov P. A. ANALYTICAL METHOD DETERMINATION OF THE AVERAGE TEMPERATURE OF THE WORKING RIMS DRUM.

Analytical solution of a problem of determination of average temperature of brake drum rim is considered. The dependence of average temperatures of a rim and geometrical thermodynamic parameters of a break drum is found. Analytical dependence of influence of parameters of transport means movement on amount of heat generated in friction couples is revealed.

POWER BALANCE. COEFFICIENT OF INFLUENCE OF HEAT STREAMS. CONVECTION. WORKING SURFACE OF A DRUM RIM.

Guchinsky R. V., Petinov S. V. DEVELOPMENT UNIT CONSTRUCTION SHIP CONDITION FATIGUE LIFE.

The calculation results of fatigue site design hull and superstructure in the end of the sliding (expansion) of the compound. The reliability of this site is naturally considered as a factor in the reliability of the hull structure, as the longitudinal walls are a continuation of the add-on-board siding. Durability evaluation unit used to select options with acceptable characteristics of the resource. Some versions of the construction site on the results of calculations by DNV

rules and data about the resistance has been regarded as sufficiently reliable. Additional calculations using the deformation method («Strain Life» International Classification), which use resistance characteristics were allowed clarify reliability design options node. Developed for the implementation of the latest technique to bring the stress distribution function to the block diagram, the equivalent distribution for fatigue damage.

FATIGUE SHIP STRUCTURES. EXPANSION JOINTS IN THE WALL OF THE SUPERSTRUCTURES. FINITE ELEMENT MODELING. THE ESTIMATED SN CURVE. THE ACCUMULATION OF DAMAGE. DEFORMATION METHOD FOR FATIGUE.

Maslov V. I., Sedler M. I. IMPROVEMENT OF THE QUALITY CONTROL PROCESSES FOR PREPARATION OF SCIENTIFIC ARTICLES FOR PUBLICATION

The article discusses the problem of improving the quality control process of the drafting activities by establishing an automated system, equipped with a web interface. The necessity of development is motivated. IDEF (0) models of the processes of registration of the authors, user authorization and registration of the articles, review articles scientific Secretary, appointment of reviewers and review article are developed.

INFORMATION SYSTEM. ACCESS TO INFORMATION. THE CONFIDENTIALITY OF THE INFORMATION. PROVISION OF INFORMATION. E-MAIL. DOCUMENTED INFORMATION. THE ELECTRONIC DOCUMENT. THE OPERATOR OF AN INFORMATION SYSTEM.

Kozyrev S. V., Korablev V. V., Yakutseni P. P. NEW ENVIRONMENTAL RISK FACTORS: MEDICINAL SUBSTANCES INTO THE ENVIRONMENT AND DRINKING WATER.

Various studies suggest that a vast array of pharmaceuticals and mixtures of pharmaceuticals found in surface water, groundwater and drinking water. The most sources for environmental contamination are elimination of unaltered medicines from living organism, and unused drugs disposal. Detected concentrations are low but the worry is that these persistent biologically active substances pose a danger to humans, as well as aquatic organisms and their habitats are under discussion. Discussions on the research needs and the regulatory implications are also included.

PHARMACEUTICALS, SOURCES, ENVIRONMENT, ECOTOXICOLOGICAL EFFECTS, ECOPHARMACOLOGY.

Petrov N. V., Humeniuk V. I. MELTING POLAR ICE CAUSES THE PLANET.

At the heart of all climate and weather conditions of the Earth is a universal property: mode of life of the planet and all her inhabitants depends on what hemisphere in a magnetic field is the planet to the sun, or (and) the whole solar system on magnetic hemispheres Zodiac and Galaxy. Modern anomalous processes of melting polar ice caps, as well as the formation of ice, permafrost, hydrocarbons in different time periods in the same places, are directly related to the energy of the planet breathing. Physical processes taking place over the magnetic poles of the Earth, similar to the processes in the jet energy devices based on the ejection and injection underlying the formation and maintenance of individual vortex structures. With today Space vortex structures observed over the poles of Venus, Jupiter, Saturn.

ENERGY BREATHING. INKJET POWER UNIT. MAGNETOSPHERE. PLASMA MECHANISMS OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONSHIPS. MELTING ICE CAPS.

Gumenyuk V. I., Kulinkovich A. V. INFLUENCES OF NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELDS ON GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN IN WATER URANIUM SOLUTIONS.

Necessity of creation of an express quality monitoring of uranium for natural waters in view of its high toxicity is shown. Influence of natural electromagnetic fields on generation of active forms of oxygen in water solutions of salts of uranium is experimentally investigated. Variation character of dependences of an operating time of oxygen forms contacts dynamics of exchange processes in weak Josephson structures of the connected conditions of water.

CHEMILUMINESCENT EXPRESS-CONTROL. GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN. CONNECTED WATER. CONNECTIONS OF URANIUM. METALS OF VARIABLE VALENCY.

Petrichenko M. R., Petrosova D. V., Petrochenko M. V. THE FILTRATION TRANSPORT OF AIR CONSERVATIVE IMPURITIES (TEMPERATURE AND HEAT) THROUGH THE WALL.

Application of the formula for the average Dupuis filtration rate constant and variable values of the hydraulic transfer allows styled conservative and non-conservative impurities Linearizability equation. Concentration distribution is linked to the solution of the problem for at least a positive functional. For small values of the filtration Rayleigh number extremal trajectories differ little from the transport equation. In the «big» Rayleigh numbers exist extremals implement minimum concentration change of temperature and heat flow, ie maximum heating of the wall hot air filter.

FILTERING. CONSERVATIVE PRIMA. DUPUIS FORMULA. FILTRATION COEFFICIENT.

Kiselev V. G. ESTIMATION PROBLEMS OF THE PROTECTION OF UNDERGROUND METALLIC CONSTRUCTION FROM THE CORROSION.

In the article are examined the basic methods of evaluating the protection of underground metallic construction ([PMS]) from the corrosion on the basis of different methods of potential measurement and the trends of their development are noted. The increased attention is given to the estimation of the authenticity of potential measurements, first of all, with the use of a method of turning off.

THE METHOD OF TURNING OFF. THE METHOD OF MODEL ELECTRODE. ELECTROCHEMICAL PROTECTION. CATHODE PROTECTION. POTENTIAL MEASUREMENT. CRITERION OF EFFECTIVENESS [EKHZ].

Lagushkin S. G. THE COUNCIL OF RECTORS OF LENINGRAD: STRUCTURE AND PRINCIPAL ACTIVITIES (70–80 TH. TWENTIETH CENTURY.)

The structure and main activities of the Council of Rectors of Leningrad during the 70's — 80's. The twentieth century. The author believes the structure of the Council has been closely associated with its activities, which largely determine its role in the management of higher education institutions in the region. The brief biographies leaders of the Council of the time, the role of the Polytechnic Institute. M.I. Kalinin in establishing itself as the Board of Directors, as well as many of its structural units.

COUNCIL. RECTOR. REGION. MANAGEMENT. STRUCTURE. QUALITY OF UNIVERSITY GRADUATES.

Goryunov V. P. OF ENGINEERING EDUCATION IN THE «ST. PETERSBURG EDUCATIONAL FORUM — 2012».

Contains a list of the main activities at the St. Petersburg Educational Forum 2012. Presented scientific review papers at the conference «Development of Engineering Education in Russia,» stated the basic premise of the presentations from STU V.P. Goryunova «unity of social and natural content in engineering education.» Conclusions on the progressive development of higher education in Russia and the Polytechnic University of the leading positions among the technical universities.

ENGINEERING EDUCATION. ENGINEERING WORK. A NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY. SOCIAL ESSENCE TECHNICAL SOCIAL PROGRESS.

Mitrofanov A. M., Nikulina S. P. IMPROVING OF IMPLEMENTATION EFFICIENCY OF STATE ORDER FOR R&D AT UNIVERSITIES.

The article describes the methods of allocation of state order for R & D at the university. There are the criteria of a comparative assessment of applications for R & D to ensure effective use of state financing.

R & D. STATE ORDER. EFFICIENCY. CRITERIA. ASSESSMENT.

Demidov A. I. PROFESSOR V.E. GRUM-GRZHIMAILO. PROBLEMS OF HIGHER AND SECONDARY SPECIAL EDUCATION IN RUSSIA.

The text of the article a little known professor of the St. Petersburg Polytechnic Institute V.E. Grum-Grzhimailo «On the technical secondary school» (1916).

INSTITUTIONS. EDUCATION. SPECIALTY. METALLURGY. FURNACE.

Kesamanly M. F., Kesamanly F. P. POLYTECHNICS, CELEBRATE OUR COUNTRY. CORRESPONDING MEMBER THE ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR PAVEL KOBEKO.

A brief sketch of the life and activity of the prominent Polytechnic, a corresponding member of the USSR P.P. Kobeko

LPI. PHYSICO-TECHNICAL INSTITUTE. ELECTRO PHYSICS. PHYSICAL CHEMISTRY. ELECTRICAL. BIOGRAPHY.

Lipin V. A. A. K. VAN-DER BELLEN — DISREMEMBER NAME IN HISTORY OF NATIONAL NONFERROUS METALLURGY.

In paper the earlier not published data on destiny and creative activity of graduate of metallurgical faculty of Petrograd Polytechnical Institute namely Alexander Konstantinovich Van der Bellen (1891-1944) are given. On the basis of archival materials, rare and inaccessible publications, and also memoirs little-known pages of development of nonferrous metallurgy of the country at the beginning of the 20th century and during the postrevolutionary period are reflected.

NONFERROUS METALLURGY. HISTORY. VAN DER BELLEN. POLYTECHNIC INSTITUTE. RIDDER. URKVART.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 4 (159) 2012

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Учредитель — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

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

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
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 25.12.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,25. Тираж 1000. Заказ 444.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного составителями,
в типографии Издательства Политехнического университета,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; СТРОИТЕЛЬСТВО; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

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

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- 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