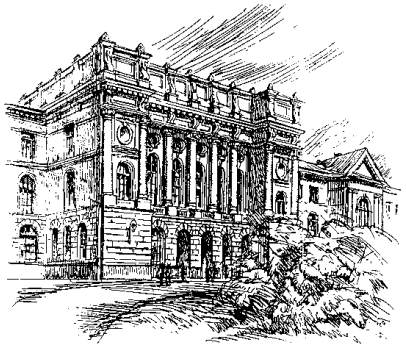
4-1(183)/2013



Научно-технические ведомости СПбГПУ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (председатель);

Алферов Ж.И., академик РАН;

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины;

Костюк В.В., академик РАН;

Лагарьков А.Н., академик РАН;

Лопота В.А., чл.-кор. РАН;

Окрепилов В.В., академик РАН;

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН;

Примаков Е.М., академик РАН;

Рудской А.И., чл.-кор. РАН;

Тендлер М.Б., ин. член РАН (Швеция);

Федоров М.П., академик РАН

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S.— full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (head of the editorial council);

Alferov Zh.I.— full member of the Russian Academy of Sciences;

Zgurovskii M.Z.— foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Scences of Ukraine;

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences;

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences;

Lopota V.V. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences;

Okrepilov V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences;

Paton B.E. — full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine;

Primakov E.M. — full member of the Russian Academy of Sciences;

Rudskoy A.I. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences;

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences (Sweden);

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор);

Акопова М.А., д-р пед. наук, профессор;

Бабкин А.В., к. техн. наук, д-р экон. наук, профессор (зам. главного редактора);

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор;

Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Гуменюк В.И., д-р техн. наук, профессор;

Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор;

Иванов А.В., д-р техн. наук, профессор;

Ильин В.И., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Кузнецов Д.И., д-р филос. наук, профессор;

Рассохин В.А., д-р техн. наук, профессор;

Снетков В.Н., д-р полит. наук, профессор;

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (editor-in-chief);

Akopova M.A. — D.Ed., prof.

Babkin A.V. — candidate of technical sciences, Dr.Sc. (econ.), prof. (deputy editor-in-chief);

Bashkarev A.Ya. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Boronin V.N. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Degtyareva R.V. — Dr.Sc. (history) prof.;

Ivanov A.I. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Il'in V.I. — Dr.Sc. (phys. math.) prof.;

Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Kozlov V.N. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Kuznetsov D.I. — Dr.Phil. prof.;

Rassohin V.A. — Dr.Sc. (tech.) prof.;

Snetkov V.N. — Dr.Sc. (political science) prof.;

Tolochko O.V. — Dr.Sc. (tech.) prof.

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 Научной электронной библиотеки на сайте http://www.elibrary.ru

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

Содержание

Поздравление *Людмиле Алексеевне Вербицкой* 9

Кожевников Н.М. *Организационно-методическая деятельность СПбГПУ по повышению качества преподавания физики* 11

Железняков А.Б., Кораблёв В.В. *Космические программы двух Корей* 20

Энергетика. Электротехника

Федоров М.П., Кривошеев М.В. *Возможности формирования энергобаланса Северо-Запада России на основе местных ресурсов* 31

Арсеньев И.А., Богуславский И.З., Попов В.В., Суханов В.В. *Особенности создания и эксплуатации мощных машин переменного тока в автономных электросетях*..... 41

Скрынник А.В. *Компьютерные технологии автоматизации проектирования энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии* 49

Лапшин К.Л. Газодинамический расчёт характеристик регулирующей ступени паровой турбины 57

Шакиров М.А., Варламов Ю.В. *Картины аномальных магнитных потоков при коротких замыканиях в двухстержневых трансформаторах* 61

Чусов А.Н., Зубкова М.Ю., Кораблёв В.В., Масликов В.И., Молодцов Д.В. *Технология использования в топливных элементах водородосодержащей смеси на основе биогазов для энергообеспечения автономных потребителей* 78

Васильев А.Ю., Козлов В.Н. *Обеспечение управляемости и наблюдаемости энергообъединений при синтезе системы ограничения перетоков активной мощности по линиям*..... 86

Киселёв В.Г. *Снижение потребления тока установками катодной защиты от коррозии*..... 93

Османов В.В. *Градиентные датчики теплового потока для теплометрии в топках котлов* 100

Балунов Б.Ф., Сайкова Е.Н., Сухоруков Ю.Г. *Гидросопротивление зазоров в перегородках регенеративных подогревателей* 105

Свобода Д.Г., Жарковский А.А. *Влияние расчетных параметров на прогнозные интегральные характеристики осевого насоса с быстроходностью $n_s = 570$*..... 111

Елистратов В.В., Кудряшева И.Г., Мирошникова Ю.А. *Обоснование режимов ГАЭС в современных экономических условиях* 120

Кондратьева Е.А., Кондратьев А.А., Сергеев В.В., Симонов А.М. *Выбор параметров тепловых насосов с центробежными компрессорами* 128

Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А. *Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов газоперекачивающих агрегатов единой системы газоснабжения России*..... 136

Метелев А.А., Пономарев А.С., Макарин А.И., Дворцов В.С. *Система управления высокофорсированным автомобильным бензиновым двигателем внутреннего сгорания* 145

Осина Ю.К., Борисова М.Э., Галиханов М.Ф. *Влияние добавок технического углерода на стабильность электретного состояния полиэтилена высокого давления* 151

Сидельников Б.В., Кобяков И.К. *Способы снижения перенапряжений на обмотках возбуждения в нестационарных режимах асинхронизированных генераторов* 158

Шакиров М.А., Андрущук В.В. *Антипотоки и сверхпотоки в двухстержневом трансформаторе в режимах короткого замыкания* 167

Металлургия и материаловедение

Попович А.А., Разумов Н.Г., Попович Т.А., Никифорова О.В., Новиков П.А. *Механохимический синтез сплавов в системе Fe-36Ni* 177

Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Корчагин А.М., Беляев А.А. *Исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке толстого листа* 183

Юркинский В.П., Фирсова Е.Г., Константинова Е.С. *Плотность и электропроводимость водных растворов сульфата железа (II)* 193

Анастасиади Г.П. , Кондратьев С.Ю. , Фукс М.Д. *Высокотемпературное окисление жаропрочного жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2* 199

Колбасников Н.Г., Безобразов Ю.А., Огольцов А.А. *Анализ режимов прокатки толстого листа из высокопрочной трубной стали на стане 2000* 210

Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Ахметов А.Д., Величко О.В. *Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях* 218

Миронова Е.В. *Выбор оптимального режима термообработки титанового сплава ВТ20 с применением количественной металлографии и анализа химического состава фаз* 226

Добротворский М.А., Масликова Е.И., Новиков Е.В. *Влияние структуры материала теплообменного оборудования для переработки нефти на допустимые сроки эксплуатации* 231

Орлов С.В., Ватулин Я.С. *Автоматизированное проектирование оснастки для пластмассовых изделий массового производства* 238

Машиностроение

Барсков В.В. *Выбор оптимальных решений при проектировании газотурбинных установок малой мощности* 244

Русинов Р.В., Румянцев В.В. , Добрецов Р.Ю. *К вопросу эффективности инерционно-резонансного наддува двигателей внутреннего сгорания* 250

Орлов С.В., Хрущев А.С. *Линия автоматизированного счета металлических изделий массового производства* 256

Елисеев К.В., Исполов Ю.Г., Орлова А.М. *Определение сил, возникающих при контакте колесной пары с рельсами* 262

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

Федотов А. И., Лисин С.К. *Синтез параметров нелинейных режимов измерительных систем*..... 270

Китаева Д.А., Рудаев Я.И. *Синергетические представления в механике динамической сверхпластичности* 274

Зубова А.Ф., Зубов В.И., Зубов И.В., Стрекопытов С.А. *Технология построения простых квадратичных систем*..... 284

Эйгенсон С.Н., Корихин Н.В., Головин А.И. *Решение задачи прочности технологического оборудования на базе экспериментального исследования его напряженного состояния* 290

Немова Д.В., Ольшевский В.Я., Цейтин Д.Н. *Гидростатика термогравитационной конвекции в вертикальном канале*..... 295

Воробьев Ю.С., Гецов Л.Б., Мельников Б.Е., Семенов А.С. *Проблемы вибрационного состояния фундаментов, сейсмостойкости и прочности турбомашин. Часть 2* 302

Зысин Л.В., Стешенков Л.П. *Особенности теплообмена при вынужденной конвекции микробиологических сред*..... 320

Зубова А.Ф., Зубов А.В., Зубов В.И., Стрекопытова М.В. *Исследование системы дифференциальных уравнений на сходимость, устойчивость и точность*..... 327

Бабкин К.Д., Певзнер Я.Б., Осипов В.В., Кузнецов А.В. *Триангуляционный датчик наведения для слежения за свариваемым стыком при гибридной лазерно-дуговой сварке сталей* 333

Кудрявцев И.А., Ласкин А.С. *Численное и экспериментальное исследование потока в подводящем тракте цилиндра высокого давления турбины АЭС* 338

Брунман В.Е., Коняшин А.В., Петкова А.П., Смородов А.В., Кочанжи Ф.И. *Разработка принципов адаптивного управления и регулятора установок мембранного электролиза для обеззараживания воды с высоким КПД* 344

Рогалин В.Е., Ценина И.С., Каплунов И.А. *Исследование влияния изотопической чистоты на оптические свойства германия* 353

Техносферная безопасность

Гуменюк В.И., Кулинкович А.В. *Исследование самоиндукции активных форм кислорода в водных растворах соединений урана* 359

Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Синицын В.В. *Распределение пораженных по степеням тяжести при техногенных авариях* 370

Вопросы образования

Акопова М.А., Кабанова Н.А. *Информационно-методическая компетентность преподавателя иностранного языка вуза* 377

Базжина В.А., Лобатюк В.В. *Закрепление молодежи в вузах как основа формирования научно-педагогического кадрового резерва* 386

Хроника событий

К 100-летию со дня рождения Михаила Сергеевича Соломенцева (1913–2008) 392

Васильев Ю.С., Рутберг Ф.Г. *К 100-летию со дня рождения Игоря Алексеевича Глебова (1914–2002)* 395

Утехина И.К., Кугушев А.И. *И.Д. Кугушев — создатель научно-педагогической школы* 401

Евграфов А.Н., Козликин Д.П. *Леонид Владимирович Ассур* 405

Contents

Congratulation. *Lyudmila Alekseevna Verbitskaya* 9

Kozhevnikov N.M. *Organizational and methodical activity OF SPbSPU directed on quality improvement of physics teaching* 11

Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. *Space programs of the two Koreas* 20

Energetics
Electrical engineering

Fedorov M.P., Krivosheev M.V. *The prospects of energy balance formation in North-West of Russian Federation using the local resources* 31

Arsenjev I.A., Boguslawsky I.Z., Popov V.V., Sukhanov V.V. *Features of creation and operation of powerful alternating current machins in off-line power supply networks* 41

Skrynnik A.V. *Computer aided design technology power plants based on renewable energy* 49

Lapshin K. L. *Gas-dynamic calculation of the characteristics of regulatory stage steam turbine* 57

Shakirov M.A., Varlamov U.V. *Pictures anomalous magnetic fluxes at short-circuit of the transformer with two rods* 61

Chusov A.N., Zubkova M.Yu., Korablev V.V., Maslikov V.I., Molodtsov D.V. *The technology of using hydrogen-containing mixtures based on biogas in fuel cells for power supply of autonomous consumers* 78

Vasiliev A.Y., Kozlov V.N. *Controllability and observability of power interconnections for bounded line active-power flow systems design* 86

Kiselev V.G. *Reduction of consumption of current settings cathodic corrosion protection* 93

Osmanov V.V. *Gradient heat flux gauges for measurement in industrial boiler furnaces* 100

Balunov B.F., Saykova E.N., Sukhorukov Y.G. *Gaps hydraulic resistance in regenerative heaters grids* . 106

Svoboda D.G., Zharkovsky A.A. *Influence of parameters on the prognostic characteristics of the axial pump with specific speed* $n_s = 570$ 111

Elistratov V.V., Kudryasheva I.G., Miroshnikova Y.A. *Substantiation of pumped storage power plants regimes in modern economic conditions* 120

Kondratyeva E.A., Kondratyev A.A., Sergeev V.V., Simonov A.M. *Selection of parameters of heat pumps with centrifugal compressor* 128

Zabelin N.A., Lykov A.V., Rassokhin V.A. *Calculation of available heat power of smoke fumes of gasocompressor units of Russia's united gas transmission system* 136

Metelev A.A., Ponomarev A.S., Makarin A.I., Dvortsov V.S. *Control system highly accelerated petrol internal combustion engine* 145

Osina J.K., Borisova M.E., Galikhanov M.F. *Effect of carbon black on the stability of the electret state in high density polyethylene* 151

Sidelnikov B.V., Kobyakov I.K. *Methods of reducing the voltage on the windings of excitation in the unsteady conditions of asynchronous generators* 158

Shakirov M.A., Andrushchuk V.V. *Magnetic super fluxes and anti fluxes in transformers with two rods under short-circuit* 167

Metallurgy and materials technology

Popovich A.A., Razumov N.G., Popovich T.A., Nikiforova O.V., Novikov P.A. *Development of Fe-36Ni powder processed by mechanical alloying* 177

Kolbasnikov N.G., Shishov I.A., Korchagin A.A., Belyaev A.A. *Investigation of the plate temperature field irregularity influence on the metal stress-strain state in the deformation zone during plates rolling* 183

Yurkinsky V.P., Firsova E.G., Constantinova E.S. *Density and electrical conductivity of aqueous solutions of ferrous sulfate (II)* 193

Anastasiadi G.P., Kondrat'yev S.Yu., Fuks M.D. *High-temperature oxidation of the heat resisting heat-resistant alloy 45H26N33S2B2* 199

Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Y.A., Ogoltsov A.A. *Hot rolling schedules analysis of high strength pipeline steel thick sheet on mill 2000* 210

Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Akhmetov A.D., Velichko O.V. *Laser-arc welding in different attitude position* 218

Mironova E.V. *Choice of optimum mode of heat treatment of the titanic BT20 alloy with application of a quantitative metallography and analysis of chemical phases composition* 226

Dobrotvorski A.M., Maslikova E.I., Novikov E.V. *Effects of the heat-exchange material structure on the service life of the oil refinery equipment* 231

Orlov S.V., Vatulin Y.S. *The automated design of equipment for plastic products of mass production* 238

Mechanical engineering

Barskov V.V. *Selection of optimal solutions in the design of low-power gas turbines* 244

Rusinov R.V., Rumiantsev V.V., Dobretsov R.Yu. *To the issue of internal combustion engine inertial supercharging effectiveness* 250

Orlov S.V., Khrushev A.S. *Line of the automated account of metal products of mass production* 256

Eliseev K.V., Ispolov Yu.G., Orlova A.M. *Contact forces between wheelset and rails determining* 262

Mathematical Methods. Modeling. Experimental studies

Fedotov A.I., Lisin S.K. *Synthesis of the nonlinearity parameter mode measuring systems* 270

Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. *Synergetic conceptions in mechanics of dynamic superplasticity* 274

Zubova A.F., Zubov V.I., Zubov I.V., Strecopitov S.A. *The technology of building simple quadrate systems* 284

Eigenson S.N., Korikhin N.V., Golovin A.I. *The solution of the problem of technological equipment strength on the basis of experimental investigation of its stressed state* 290

Nemova D.V., Olshevskyi V.Ya., Tseytin D.N. *Hydrostatics of heat-gravitational convection in the vertical channel* 295

Vorobiov Yu.S., Getsov L.B., Melnikov B.E, Semenov A.S. *Vibration problems of foundations, seismic resistance and strength of turbomachinery. Part 2* 302

Zyssin L.V., Steshenkov L.P. *Features of heat exchange during forced convection of microbiological fluids* 320

Zubova A.F., Zubov A.V., Zubov V.I., Strecopitova M.V. *The investigation of systems differential equations on intimation, stability and precision* 327

Babkin K.D., Pevzner Ya.B., Osipov V.V., Kuznetsov A.V. *Triangulation sensor for weld tracking during hybrid laser-arc welding of steels* 333

Kudryavtsev I.A., Laskin A.S. *Numerical and experimental research of the flow in inlet manifold hpc of the steam turbine for NPP*..... 338

Brunman V.E., Konyashin A.V., Petkova A.P., Smorodov A.V., Kochanzhi F.I. *Development of the principles and system of adaptive control for water disinfection using membrane electolysis with high efficiency*..... 344

Rogalin V.E., Tsenina I.S., Kaplunov I.A. *Effect of isotopic purity on the optical properties of germanium*..... 353

Technosphere safety

Gumenyuk V.I., Kulinkovich A.V. *Research of the self-induction of active forms of oxygen in the uranium compounds water solutions* 359

Gumenyuk V.I., Karmishin A.M., Sinitsyn V.V. *Distribution affected by severity with of technogenic accident*..... 370

Educational issues

Akopova M.A., Kabanova N.A. *Information-methodical competence of teacher of foreign languages university* 377

Bazzhina V.A., Lobatyuk V.V. *Attaching of young people in the universities as a basis of scientific-pedagogical personnel reserve*..... 386

Chronicle of events

The 100th anniversary of his birth Mihail S. Solomentsev (1913–2008) 392

Vasiliev Yu.S., Rutberg F.G. *The 100th anniversary of his birth Igor A. Glebov 1914–2002* 398

Utehina I.C., Kugushev A.I. *I.D. Kugushev — founder of scientific-pedagogical schools* 401

Evgrafov A.N., Kozlikin D.P. *Leonid Vladimirovich Assur* 405

ПОЗДРАВЛЕНИЕ

29 октября 2013 года состоялось общее собрание Российской академии образования, на котором президент Санкт-Петербургского государственного университета профессор Людмила Алексеевна Вербицкая была избрана президентом РАО.

Редакционный совет и коллегия журнала «Научно-технические ведомости СПбГПУ» поздравляют почетного доктора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Л.А. Вербицкую с избранием на пост президента РАО и желают большого успеха на новом поприще.

УДК 378.1:53

Н.М. Кожевников

ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СПбГПУ ПО ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

N.M. Kozhevnikov

ORGANIZATIONAL AND METHODICAL ACTIVITY OF SPbSPU DIRECTED ON QUALITY IMPROVEMENT OF PHYSICS TEACHING

Обсуждаются проблемы преподавания общей физики в российских университетах. Анализируются направления деятельности созданного на базе СПбГПУ Научно-методического совета по физике Минобрнауки РФ. Отмечается координирующая роль совета в разработке примерных программ по физике и организации крупных научно-методических конференций, а также его активность в области учебного книгоиздания. Подчеркивается роль лабораторно-демонстрационной базы в преподавании современного курса общей физики. Показана необходимость усиления пропедевтического компонента и довузовской подготовки абитуриентов.

ПРЕПОДАВАНИЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ. ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ И ПРИМЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ. ЛАБОРАТОРНО-ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ БАЗА УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА.

Problems of general physics teaching in Russian universities are discussed. The directions of Russian Federation Ministry of Science and Education Scientific-methodical council on physics activity on the base of SPbSPU are analyzed. The coordination function of this council in physics model program creation, large scientific-methodical conferences organization and in the field of education text-books publishing is emphasized. The importance of physical laboratories and demonstration lecture experiments is marked. The necessity of propaedeutic component improvement and special school pupils preparation is shown.

GENERAL PHYSICS TEACHING. FEDERAL STATE STANDARDS AND SUBJECT MODEL PROGRAMS. TRAINING LABORATORIES AND LECTURE DEMONSTRATIONS ON PHYSICS.

Среди фундаментальных дисциплин физика занимает особое место, во многом определяя естественнонаучный багаж и менталитет не только инженеров, специалистов, но и всего населения страны. Авторитет России в области преподавания физики признан во всем мире и подтвержден высочайшими научно-техническими достижениями.

Происходящие сейчас сложные процессы в области подготовки профессиональных кадров, в частности переход на «уровневую систему» высшего профессионального образования (ВПО), встраивание России в международное образовательное пространство, изменение приоритетов и критериев оценки качества обучения требуют, с одной стороны, смелых инновационных подходов к содержанию и структуре процесса обучения, с другой стороны, — бережного сохранения того, чем гордилась советская, российская высшая школа [1, 2]. А это, прежде всего, фундаментальность и глубина учебных программ, повышенное внимание к практическим аспектам профессиональной деятельности.

К сожалению, в последнее время в преподавании физики наметились негативные тенденции. Физика в средней школе стала дисциплиной «по выбору», школьники боятся сдавать ЕГЭ по физике, который ориентирован на профильный уровень обучения, а он охватывает не более 15 % школ. Следствием этого стало снижение конкурса поступающих на технические направления ВПО. В примерных программах по многим педагогическим и другим «нефизическим» направлениям физика вообще отсутствует. Там же, где она еще сохранилась, ее трудоемкость в новых стандартах заметно ниже, чем в развитых странах мира. Неудивительно, что наши студенты имеют такую низкую академическую мобильность, а наши вузы — такой низкий рейтинг в мире.

Еще одна проблема связана с тем, что сейчас экспериментальная, наглядная физика стала слишком дорогой и недоступной большинству вузов и средних школ. В преподавании как школьной, так и вузовской физики все большее место занимают теоретические вопросы, компьютерное моделирование [3]. Физика «отрывается» от окружающего нас мира и, можно сказать, становится схоластической дисциплиной.

Преодоление этих и других негативных тенденций, «возвращение» к преподаванию реальной, а не абстрактной физики, повышение методического, педагогического мастерства преподавателей высшей школы — эти и другие насущные задачи российской школы требуют немедленных организационно-методических решений. В предлагаемой статье рассмотрены некоторые направления и результаты деятельности СПбГПУ в этой области.

СПбГПУ — базовый университет Научно-методического совета по физике Минобрнауки РФ

В мае 2012 года исполнилось десять лет Научно-методическому совету (НМС) по физике, сформированному Министерством образования Российской Федерации на базе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [1, 2]. Одновременно появились и другие советы по общим дисциплинам математического и естественнонаучного цикла, в том числе по математике, химии, биологии и другим. Эти советы должны были сыграть важную организационно-методическую роль в системе ВПО. В отличие от учебно-методических объединений (УМО), отвечающих за реализацию основных образовательных программ от начала процесса обучения в вузе до защиты выпускных работ («по вертикали»), НМС контролируют преподавание конкретных дисциплин («по горизонтали»), т. е. определяют требования к содержанию и качеству их преподавания для разных направлений подготовки.

Базовым университетом НМС по физике в 2002 году стал СПбГПУ, а председателем совета был назначен академик РАН Ж.И. Алферов. В состав президиума совета вошли ведущие ученые страны, хорошо известные своей активной позицией по проблемам модернизации ВПО, в том числе шесть представителей СПбГПУ: академики РАН Ж.И. Алферов и Ю.С. Васильев, профессора Д.Г. Арсеньев, В.К. Иванов (заместитель председателя НМС), Н.М. Кожевников (ученый секретарь НМС), А.Э. Фотиади.

В сферу деятельности НМС по физике входит: участие в формировании государственных образовательных стандартов; разработка примерных программ дисциплины «Физика» для различных направлений ВПО; рецензирование учебных изданий с целью присвоения грифа; подготовка и проведение международных конференций, семинаров, совещаний по научно-методическим проблемам преподавания физики; выработка рекомендаций по развитию дистанционных образовательных технологий; участие в формировании перспективных планов издания и переработки существующих учебников и учебных пособий по физике; совершенствование учебного процесса в системе переподготовки и повышения квалификации профессорско-преподавательского состава и многое другое. Фактически речь идет о формировании и координации деятельности научно-педагогического сообщества преподавателей физики — ценнейшего социального капитала страны.

Для достижения этой цели НМС выступает одним из организаторов крупных научно-методических конференций, среди которых, в первую очередь, следует назвать международные форумы «Физика в системе современного образования» (ФССО) и «Современный физический практикум» (СФП). Эти конференции проходят по очереди и собирают сотни участников из всех регионов России и зарубежных стран. Так, конференции СФП проходили в Волгограде (2006),

Заседание Президиума НМС по физике 15 июня 2012 г.

Астрахани (2008), Минске (2010), Москве (2012), а конференции ФССО собирали преподавателей физики в Санкт-Петербурге (2007, 2009), Волгограде (2011), Петрозаводске (2013).

НМС по физике организует ежегодные встречи членов Ассоциации кафедр физики технических вузов (на базе Московского авиационного института — технического университета), активно участвует в семинарах, конференциях, которые проводятся секциями совета «Физика в педагогических вузах», «Физика в классических университетах», а также инициирует встречи преподавателей физики в медицинских, сельскохозяйственных, военных вузах. Например, в 2008 году состоялось совещание-семинар в Сызранском высшем военном училище летчиков [4]. НМС по физике входит в число организаторов и постоянных участников конференции «Образование, наука и экономика в вузах. Интеграция в международное образовательное пространство», которая проводится совместно с НМС по математике и Краковским педагогическим университетом (2006, 2008, 2010 — в Плоцке, Польша; в 2011 году — в Ереване, Армения).

Деятельность НМС по физике широко освещается в научно-методических журналах (в частности, «Физическое образование в вузах»), в регулярно издаваемых Бюллетенях НМС [5], в вузовских многотиражках.

Организационно-методическая поддержка Федеральных государственных стандартов третьего поколения

Нормативной базой перехода на двухуровневую систему ВПО, как известно, служат федеральные государственные образовательные стандарты третьего поколения (ФГОС-3), определяющие компетентностные характеристики выпускников бакалавриата и магистратуры. В отличие от предыдущих стандартов 2-го поколения, ФГОС-3 не определяют ни дидактические единицы дисциплин, ни критерии их усвоения. Фактически в новых стандартах ничего не говорится и о содержании той или иной дисциплины. Нормативно закреплены только интервалы трудоемкости ООП [6, 7]. В этих условиях преподаватели оказались в сложном положении, когда трудоемкость сократилась, а содержание осталось неопределенным. Ситуация усугубляется тем, что при формировании аттестационных педагогических измерительных материалов Росаккредагентство пользуется старыми списками дидактических единиц, на которые сейчас отводится гораздо меньшее, чем раньше, число учебных часов.

НМС по физике решил эту острую проблему, разработав многоуровневую примерную программу по общей физике, согласованную с трудоемкостью физики по новым стандартам, и определив дидактическое содержание дисциплины для разных направлений бакалавриата. В этой программе говорится, что содержание дисциплины (дидактические модули) должно быть аналогичным, а по возможности одинаковым для различных направлений и профилей подготовки, а для реализации необходимой глубины изучения физики предусматриваются три уровня, отличающиеся трудоемкостью: минимальный (8–10 зачетных единиц, ~ 300 академических часов), базовый (10–14 зачетных единиц, ~ 450 часов) и расширенный (14–20 зачетных единиц, ~ 600 часов).

Примерная программа по физике, размещенная на сайте www.fgosvpo.ru и опубликованная в Бюллетене НМС по физике № 4 [5], доступна всем преподавателям физики в вузах России и является бесценным методическим материалом при реализации ФГОС-3 в учебном процессе.

Организационно-методическая деятельность в области учебного книгоиздания

Проблема учебной литературы по физике приобрела в настоящее время особую актуальность. В современных учебниках по физике, как правило, много формул и мало рисунков, много абстрактных рассуждений и мало наглядных примеров из жизни. В связи с этим НМС по физике и издательство «Лань» выступили с инициативой создания серии «Классическая учебная литература по физике», куда бы вошли лучшие учебные издания российских и зарубежных авторов, до сих пор включаемые в списки основной литературы по физике. Для реализации этого проекта был создан редакционный совет серии во главе с председателем НМС по физике академиком Ж.И. Алферовым.

Сейчас в рамках серии уже вышли известные учебные пособия И.В. Савельева, С.П. Стрелкова, И.Е. Иродова, Ч. Киттеля, У. Найта, М. Рудермана, Э. Парселла и др. Всего издано более 30 книг. Издательство «Лань» продолжает получать многочисленные благодарственные отклики из разных городов России, которые испытывают настоящий «голод» в таких пособиях.

В 2009 году серия «Классическая учебная литература по физике» участвовала в престижном конкурсе «Сделано в Санкт-Петербурге» и была отмечена дипломом лауреата в номинации «Продукция».

Заметную роль сыграл НМС по физике в организации подготовки вузов страны к проводимому Росаккредагентством контролю базовых знаний по основным образовательным программам (ООП). Эти проверки обычно проходят в виде централизованного интернет-тестирования в рамках Федерального экзамена в сфере профессионального образования (ФЭПО) [8].

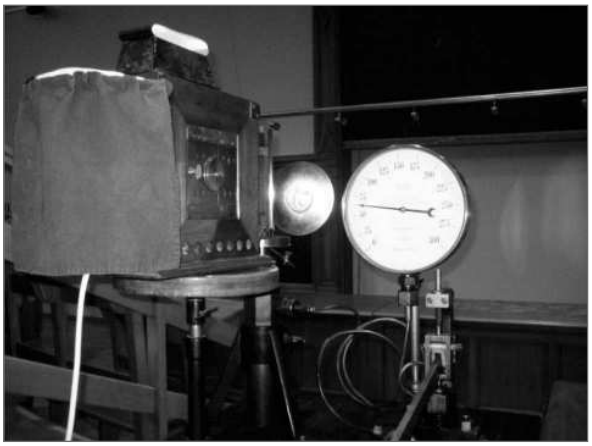
Следует отметить, что вначале интернет-тестирование было встречено достаточно прохладно. Прежде всего, это было связано с весьма низкими результатами ФЭПО, которые преподавателями-предметниками связывались с некорректностью, низким качеством и сложностью тестов. Однако в дальнейшем стало ясно, что причинами низких результатов являются, прежде всего, недостатки в подготовке и проведении ФЭПО. В частности, студентам, завершившим изучение какой-либо дисциплины, через год без всякой подготовки предлагается сесть за компьютер и вспомнить весь материал курса. Вряд ли с этим легко справятся даже отлично успевающие студенты.

В связи с этим особую актуальность приобрела разработка и издание специальных методических пособий, предназначенных для подготовки к интернет-тестированию базовых знаний. Основные принципы таких пособий были выработаны при написании двух первых пособий: по физике и по дисциплине «Концепции современного естествознания» [9, 10]. Сейчас в издательстве «Лань» вышли уже семь таких книг.

Еще одно направление деятельности НМС по физике в области учебного книгоиздания связано с экспертизой и присвоением грифа учебникам и учебным пособиям по физике. Эта работа проводится с 2005 года, причем количество обращений авторов, вузов и издательств постоянно возрастает. С 2005 года гриф НМС по физике получили почти 100 учебных пособий по теоретическому курсу, лабораторному практикуму, по методике решения задач.

Эксперты анализируют содержание и структуру учебного пособия с точки зрения их соответствия требованиям ФГОС-3 для различных направлений подготовки бакалавров и специалистов [11]. Материал вузовского учебника физики должен обладать высоким научным уровнем, отражать новейшие достижения в науке. Еще одним показателем качества является степень освещения практических вопросов, их актуальность. Серьезные нарекания экспертов часто вызывает методический уровень пособия, адаптивность к образовательным технологиям ВПО.

Следует отметить, что далеко не все учебные пособия получают положительную оценку экспертов и, соответственно, не все рекомендуются к присвоению грифа НМС по физике. В то же время процедура грифования позволяет



Пресс Кайете (1902 г.) (слева) и поляризационные эксперименты на лекциях по физике

сформулировать унифицированные требования к содержанию и методическому уровню пособий и, таким образом, способствовать повышению качества преподавания физики в вузах страны.

Разработка и организация лабораторно-демонстрационной базы учебного процесса по физике

Курс общей физики в вузах за последние сто лет претерпел существенные изменения [12]. Если в начале XX века это был огромный, многотомный курс, вмещающий в себя практически все известные сведения о неживой природе, то с появлением квантовой физики все большее место в курсе стали занимать микроскопические механизмы, обусловливающие новые явления в конденсированных средах.

Начиная с середины XX века наблюдается ярко выраженная тенденция к теоретизации курса общей физики, включение в него достаточно развитых модельных представлений, ранее характерных для курсов теоретической физики. При этом объем общей физики уменьшается, она становится все труднее для восприятия вчерашними школьниками. Сейчас положение дел с преподаванием общей физики в вузах подошло к критической черте. Переход на ФГОС-3 сопровождается резким, на 30–50 %, уменьшением трудоемкости, в первую очередь — за счет аудиторных занятий. Слабая школьная подготовка, основанная на формальных знаниях в формате ЕГЭ, требует введения в курс общей физики серьезного пропедевтического компонента. Наконец, отсутствие мотивации к получению знаний, падение престижа инженерно-технических профессий делают традиционные методики обучения малоэффективными.

Эти и другие обстоятельства необходимо приводят к смене парадигмы преподавания физики в вузе. Основным становится не объем фактов из разных областей науки, а логическое осмысление, оценка этих фактов, анализ взаимосвязи фундаментальных положений физики. Главным на лекции, в лабораторном практикуме, на упражнениях становится рассуждение, обоснование, анализ эмпирической и теоретической информации, концептуальной базы физики в целом и отдельных ее разделов.

Современная физика как учебная дисциплина должна повернуться к живому эксперименту. Кафедре экспериментальной физики СПбГПУ удалось сохранить и приумножить уникальный физический кабинет, где собраны сотни лекционных физических опытов. В коллекцию этих опытов входят как действующие демонстрационные установки столетней давности (пресс Кайете для сжижения углекислого газа, проекционный фонарь Лейбольда, камера Вильсона поршневого типа, на которой работал Д.В. Скобельцын, акустический интерферометр Квинке и многие другие), так и самые современные установки с лазерными источниками, электро- и радиоизмерительными приборами, демонстрирующие эффектные голограммы, микропроекции, магнитные домены, интерференционные и дифракционные явления, фазовые переходы.

Кафедра экспериментальной физики одной из первых в стране стала использовать видеотехнику для демонстрации физических опытов. Еще в далеком 1984 году наш видеофильм с опытами по физике был удостоен первого места на Всесоюзном конкурсе учебных фильмов, а в 1985 году демонстрационная установка по динамической голографической интерферометрии экспонировалась на ВДНХ СССР и была отмечена бронзовой медалью выставки. Сейчас демонстрационный кабинет физики СПбГПУ — один из наиболее авторитетных в России, он обеспечивает высокое качество преподавания физики в вузе.

В 2006 году началась масштабная модернизация лабораторного физического практикума, который не обновлялся с 1975 года. В свое время это была одна из лучших в стране лабораторий физики. Сейчас, к сожалению, техническое оснащение тридцатилетней давности часто выглядит анахронизмом. За пять последних лет кафедра экспериментальной физики освоила несколько миллионов рублей, выделенных на приобретение современного российского и зарубежного оборудования, на проведение методической работы по его адаптации к местным условиям. Работа по модернизации физического практикума продолжается.

Организационно-методические разработки, обеспечивающие подготовку студентов по физическим направлениям в СПбГПУ

Подготовка инженеров-физиков традиционно была и остается одной из важных составных частей политехнического образовательного комплекса. Фундамент этого комплекса был заложен на физико-механическом факультете, который по праву считается колыбелью советской, российской физики. Расширение круга решавшихся физиками задач привело в середине XX века к организации новых факультетов. В частности, подготовку научных кадров для Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе и других институтов Академии наук взял на себя физико-технический факультет СПбГПУ, организованный Ж.И. Алферовым и Ю.С. Васильевым в 1988 году. Именно на этом факультете была организована одна из первых в городе базовых кафедр — кафедра космических исследований.

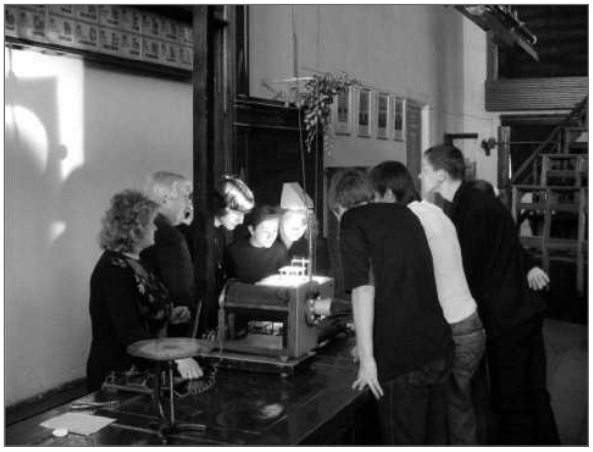
Большой вклад в становление ФТФ вносит заместитель декана профессор А.В. Блинов, который инициировал и воплотил в жизнь модель непрерывного образования в методически согласованной цепочке лицей «Физико-техническая школа» — СПбГПУ (ФТФ) — ФТИ имени А.Ф. Иоффе. После открытия в 1999 году Научно-образовательного центра РАН (Алферовского Центра) ФТФ органично включился в новый учебно-научный комплекс. На еще более высокую ступень интеграции это сотрудничество поднялось после организации Академического университета — Центра нанотехнологий: его магистратуру и аспирантуру в значительной степени пополняли выпускники бакалавриата ФТФ. Сейчас в связи с реорганизацией СПбГПУ физические направления подготовки сконцентрировались в рамках единой структуры — Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций, куда вошли кафедры физико-технического, радиофизического, физико-механического факультетов и факультета медицинской физики. Такая интеграция должна способствовать дальнейшему повышению качества специального физического образования.

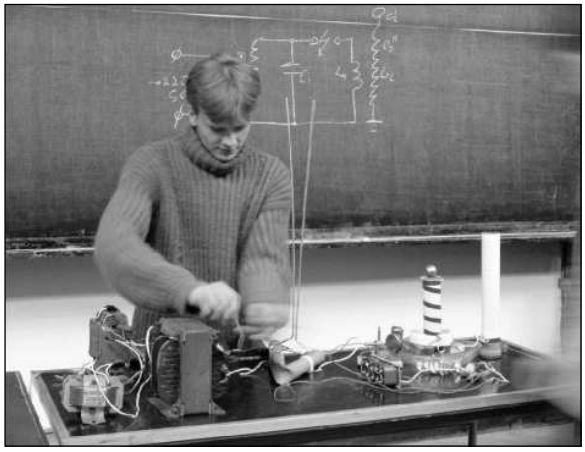
Организация довузовской подготовки, индивидуальная работа со школьниками и студентами

Повышение качества преподавания физики в высшей школе невозможно без организации довузовской работы со школьниками и абитуриентами. Серьезные проблемы в обучении физике в средней школе, связанные с переходом к ЕГЭ, настоятельно требуют, чтобы преподаватели высшей школы активно подключались к формированию контингента студентов, способных воспринять и освоить современный вузовский курс физики.

На кафедре экспериментальной физики СПбГПУ эта работа проходит в форме конкурсов, регулярных обзорных лекций для старших школьников, на которые собираются сотни человек из школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области, специальных уроков по экспериментальной физике, включенных в учебное расписание школ, руководство индивидуальной работой талантливых ребят.

Большое значение имеет участие преподавателей высшей школы в деятельности средних учебных заведений с углубленным изучением математики и физики. Примером может служить тесная связь лицея «Физико-техническая школа» и кафедр Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбГПУ, которые





Школьники в Большой физической аудитории (слева). Демонстрация студенческой разработки «Трансформатор Теслы» на «Неделе науки» (справа)

активно участвуют в создании системы отбора научных проектов среди лицеистов, их взаимодействия с научными руководителями, контроля и оценки результатов работ.

Не менее важна индивидуальная работа с активными студентами младших курсов, которые стремятся реализовать свое увлечение физикой, готовя доклады на студенческой «Неделе науки», посещая факультативы, разрабатывая и изготавливая новые лекционные демонстрации и лабораторные работы по физике.

Следует отметить, что в лучших университетах мира пропедевтике, довузовской работе, уделяется огромное внимание [13]. Там понимают, что готовить специалистов надо задолго до его поступления в университет. Надо сказать, что аналогичная ситуация имеет место в так называемых «творческих» вузах, где будущие абитуриенты стараются проявить себя как можно раньше. Не следует ли поощрять и культивировать это и в инженерных, технических вузах?

В последние годы существенно изменился к лучшему контингент поступающих в СПбГПУ и другие вузы страны. И дело здесь не в том, что абитуриенты стали лучше знать физику, математику, другие школьные предметы. Знания эти, к сожалению, оставляют желать лучшего. Но в вузы теперь приходят люди, гораздо более целеустремленные, мотивированные, чем 10–15 лет назад. Молодежь хочет учиться, хочет найти свое место в жизни и выдвигает требование к выбранному вузу, чтобы качество образования было не хуже, чем в лучших университетах мира. Выполнению этого требования будет посвящена деятельность СПбГПУ в ближайшие годы.

При подготовке настоящей статьи использованы материалы конкурсной работы «Организационно-методические разработки, способствующие повышению качества преподавания физики в высшей школе», выдвинутой в 2013 году на соискание премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования в номинации «Организационные решения по повышению качества подготовки специалистов». Авторы этой работы — профессора СПбГПУ А.В. Блинов, В.К. Иванов и Н.М. Кожевников, стали лауреатами этой престижной премии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алферов, Ж.И.** Деятельность Научно-методического совета по физике в условиях реформирования системы высшего профессионального образования [Текст] / Ж.И. Алферов, В.К. Иванов, Н.М. Кожевников // Физическое образование в вузах.— 2005. Т. 11, № 4.— С. 20–22.

2. **Кожевников, Н.М.** Деятельность научно-методического совета по физике в условиях перехода к «уровневой системе» высшего образования [Текст] / Н.М. Кожевников // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1(142).— С. 277–282.

3. **Кожевников, Н.М.** Исчезновение эмпирического компонента из учебных пособий по физике [Текст] / Н.М. Кожевников // Физическое образование в вузах.— 2007. Т. 13, № 1.— С. 44–48.

4. Бюллетень научно-методического совета по физике [Текст] // 2012. № 4 / Сост. Н.М.Кожевников.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 84 с.

5. **Кожевников, Н.М.** Физика в военном вузе [Текст] / Н.М. Кожевников, А.П. Пелевина, Г.Г. Спирин, В.Г. Уколов // Физическое образование в вузах.— 2008. Т. 14, № 3.— С. 49–50.

6. **Кожевников, Н.М.** Методология оценки трудоемкости дисциплины «Физика» [Текст] / Н.М. Кожевников // Физическое образование в вузах.— 2005. Т. 11, № 4.— С. 69–76.

7. **Кожевников, Н.М.** Компетентностный подход в ФГОС ВПО и примерных программах по общей физике [Текст] / Н.М. Кожевников // «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах»: матер. XIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы.— 18 мая 2009 года, СПб.— Т. 1.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 33–41.

8. **Антонов, В.И.** Федеральное тестирование по физике и математике в российских школах и университетах [Текст] / В.И. Антонов, Н.М. Кожевников // Сб. трудов Междун. науч. конференции «Образование, наука и экономика в вузах. Интеграция в международное образовательное пространство».— 9–14 сентября 2008 г.— Плоцк, Польша.— С. 28–36.

9. **Калашников, Н.П.** Физика. Интернет-тестирование базовых знаний [Текст]: Учебное пособие / Н.П.Калашников, Н.М. Кожевников.— СПб: Изд-во «Лань», 2009.— 160 с.

10. **Горбачев, В.В.** Концепции современного естествознания. Интернет-тестирование базовых знаний [Текст]: Учебное пособие / В.В. Горбачев, Н.П. Калашников, Н.М. Кожевников.— СПб: Изд-во «Лань», 2010.— 208 с.

11. **Кожевников, Н.М.** Критерии оценки качества учебной литературы по физике и их реализация в издательской деятельности [Текст] / Н.М. Кожевников, А.В. Никифоров // Физическое образование в вузах.— 2007. Т. 13, № 4.— С. 25–30.

12. **Кожевников, Н.М.** Эволюция курса общей физики от Хвольсона до наших дней [Текст] / Н.М. Кожевников // Физическое образование в вузах.— 2013. Т. 19, № 3.— С. 46–51.

13. **Кожевников, Н.М.** Подходы к решению проблем в сфере образования и науки в Германии [Текст] / Н.М. Кожевников // Физическое образование в вузах.— 2012. Т. 18, № 2.— С. 30–39.

REFERENCES

1. **Alferov Zh.I., Ivanov V.K., Kozhevnikov N.M.** Deyatelnost Nauchno-metodicheskogo soveta po fizike v usloviyakh reformirovaniya sistemy vysshego professionalnogo obrazovaniya [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2005. T. 11, № 4.— S. 20–22. (rus.)

2. **Kozhevnikov N.M.** Deyatelnost nauchno-metodicheskogo soveta po fizike v usloviyakh perekhoda k «urovnevoy sisteme» vysshego obrazovaniya [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. 2012. T. 142, № 1(142).— S. 277–282. (rus.)

3. **Kozhevnikov N.M.** Ischeznoveniye empiricheskogo komponenta iz uchebnykh posobiy po fizike [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2007.— T. 13, № 1.— S. 44–48. (rus.)

4. Byulleten nauchno-metodicheskogo soveta po fizike [Tekst] // № 4 / Sost. N.M. Kozhevnikov.— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012.— 84 s. (rus.)

5. **Kozhevnikov N.M., Pelevina A.P., Spirin G.G., Ukolov V.G.** Fizika v voyennom vuze [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2008. T. 14, № 3.— S. 49–50. (rus.)

6. **Kozhevnikov N.M.** Metodologiya otsenki trudoyemkosti distsipliny «Fizika» [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2005. T. 11, № 4.— S. 69–76. (rus.)

7. **Kozhevnikov N.M.** Kompetentnostnyy podkhod v FGOS VPO i primernykh programmakh po obshchey fizike [Tekst] // Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: Materialy XIII Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i vysshey shkoly. 18 maya 2009 goda. T. 1.— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009.— S. 33–41. (rus.)

8. **Antonov V.I., Kozhevnikov N.M.** Federalnoye testirovaniye po fizike i matematike v rossiyskikh shkolakh i universitetakh [Tekst] // Sb. trudov Mezhdun. nauch. konferentsii «Obrazovaniye, nauka i ekonomika v vuzakh. Integratsiya v mezhdunarodnoye obrazovatelnoye prostranstvo».— 9–14 sentyabrya 2008 g.— Plotsk, Polsha.— S. 28–36. (rus.)

9. **Kalashnikov N.P., Kozhevnikov N.M.** Fizika. Internet-testirovaniye bazovykh znaniy [Tekst]: Uchebnoye posobiye.— SPb: Izdatelstvo «Lan′», 2009.— 160 s. (rus)

10. **Gorbachev V.V., Kalashnikov N.P., Kozhevnikov N.M.** Kontseptsii sovremennogo yestestvoznaniya. Internet-testirovaniye bazovykh znaniy [Tekst]: Uchebnoye posobiye.— SPb: Izdatelstvo «Lan′», 2010.— 208 s. (rus.)

11. **Kozhevnikoov N.M., Nikiforov A.V.** Kriterii otsenki kachestva uchebnoy literatury po fizike i ikh realizatsiya v izdatelskoy deyatelnosti [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2007. T. 13, № 4.— S. 25–30. (rus.)

12. **Kozhevnikov N.M.** Evolyutsiya kursa obshchey fiziki ot Khvolsona do nashikh dney [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2013. T. 19, № 3.— S. 46–51. (rus.)

13. **Kozhevnikov N.M.** Podkhody k resheniyu problem v sfere obrazovaniya i nauki v Germanii [Tekst] // Fizicheskoye obrazovaniye v vuzakh.— 2012. T. 18, № 2.— S. 30–39. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОЖЕВНИКОВ Николай Михайлович — доктор физико-математических наук профессор заместитель заведующего кафедрой экспериментальной физики Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбГПУ, ученый секретарь Научно-методического совета по физике Министерства образования и науки РФ; заслуженный работник высшей школы Российской Федерации; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nkozhevn@mail.ru.

AUTHORS

KOZHEVNIKOV Nikolay M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nkozhevn@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 629.78

А.Б. Железняков, В.В. Кораблёв

КОСМИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ДВУХ КОРЕЙ

A.B. Zheleznyakov, V.V. Korablev

SPACE PROGRAMS OF THE TWO KOREAS

Дан анализ развития космических программ Корейской Народно-Демократической Республики и Республики Корея. Рассмотрено современное состояние космических отраслей этих стран.

КОСМОС. КОРЕЯ. РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА. КОСМОДРОМЫ. КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ.

Space programs of DPRK and RK have been analyzed. State-of-art of space branches in these countries has been discussed.

SPACE. KOREA. MISSILE TECHNOLOGY. SPACE COMMUNICATION.

В 1945 году по результатам Второй мировой войны Корейский полуостров оказался разделенным на две оккупационные зоны — советскую и американскую. Чуть позже 38-я параллель, первоначально разделявшая войска бывших союзников по антигитлеровской коалиции, стала границей между двумя вновь образованными государствами — Корейской Народно-Демократической Республикой (КНДР) и Республикой Корея (РК). Такая ситуация сохраняется и сегодня.

До 1945 года у обеих Корей была единая культура, общая история. Но вот уже 68 лет каждая из стран идет своим путем: Северная Корея строит социализм и преодолевает серьезные экономические трудности, оставаясь одной из беднейших стран Азии, а Южная Корея, пережив десятки лет диктатуры, стала государством с одной из самых развитых экономик в мире.

Но, несмотря на различный уровень своего развития, оба корейских государства практически одновременно вступили в «Большой космический клуб», запустив со своей территории с помощью собственных космических носителей спутники: северяне сделали это в декабре 2012 года, а южане — в январе 2013 года.

КОСМОНАВТИКА КНДР

В космос с идеями чучхе

Начало работ по ракетно-космической программе в Северной Корее датируется серединой 1970-х годов. Именно тогда северокорейским специалистам были переданы некоторые советские и китайские космические технологии. Это был закономерный результат той «большой игры», которую на международной арене вели сверхдержавы. СССР, Китай и КНДР, несмотря на определенные идеологические расхождения, находились «по одну сторону баррикад». Поэтому и Москва, и Пекин чем только могли помогали своим северокорейским союзникам.

Результатом такого сотрудничества стало появление в КНДР в конце 1980-х годов целого семейства ракетных комплексов малой дальности и создание задела по баллистической ракете средней дальности. Причем копирование советской и китайской ракетной техники в Северной Корее оказалось столь успешным, что вскоре Пхеньян вышел на международный рынок со своей «продукцией» и (по сведениям разведок западных стран) экспортировал ракеты в Сирию, Ирак и ряд других стран.

А в середине 1990-х годов в КНДР началась разработка многоступенчатых ракет большой дальности с отделяемой головной частью. Вероятно, в эти же годы стартовал проект и космического носителя.

Однако работы по ракетам носят в Северной Корее закрытый характер. Поэтому достоверно рассказать о северокорейской космической программе невозможно. Многое из того, что написано о северокорейской космонавтике, в том числе и излагаемое в данной статье, носит предположительный характер.

Имеются данные, что космической программой КНДР руководил физик Сун Сан Вук. Также есть сведения, что в ней принимали и принимают участие специалисты из бывшего Советского Союза, Китая, Пакистана и Ирана, перебравшиеся в Северную Корею как по идеологическим соображениям, так и в погоне «за длинным долларом».

Еще один момент следует отметить, рассматривая северокорейскую космонавтику. Официальной идеологией в КНДР являются «идеи чучхе», провозглашенные в 1955 году тогдашним лидером страны Ким Ир Сеном. На словах идеи чучхе — это «гармоничная трансформация идей марксизма-ленинизма на основе древнекорейской философской мысли». На деле — жестокий тоталитарный режим, контролирующий все и вся в Северной Корее. В том числе и процесс освоения космического пространства.

Вот в таких условиях и рождался первый северокорейский спутник.

Космодром Тонхэ

Если информации о работе инженеров и конструкторов в КНДР «кот наплакал», то данных о северокорейских космодромах и о проводимых испытаниях чуть больше. Ни строительство стартовых сооружений, ни пуски ракет невозможно скрыть от «всевидящего ока» разведок ведущих стран мира. А они очень пристально следят за тем, что происходит в «Пхеньяне и вокруг него».

Если верить их данным, строительство первого северокорейского космодрома Тонхэ, больше известного как ракетный полигон Мусудан, началось ориентировочно в 1982 или 1983 году. Строительство велось военнослужащими 117-го инженерного полка Народной освободительной армии Кореи (НОАК).

Когда перед правительством Северной Кореи встал вопрос о создании центра для запуска ракет, на выбор его местоположения повлиял ряд факторов.

Во-первых, территория КНДР не так уж велика по площади, чтобы испытания образцов ракетной техники могли быть проведены в пределах государственных границ.

Во-вторых, необходимо учитывать военно-политическую ситуацию на Корейском полуострове, отсутствие нормальных отношений с Южной Кореей и присутствие на Корейском полуострове группировки войск США, правительства которых усматривают в развитии северокорейской ракетной программы угрозу безопасности своих стран. Испытательный полигон должен был быть достаточно удален от демилитаризованной зоны, разделяющей КНДР и Южную Корею.

В-третьих, трасса полетов баллистических ракет должна была пролегать таким образом, чтобы исключить или минимизировать их пролет над территорией стран, которые могли бы высказать свои претензии правительству Северной Кореи (Китай, тогдашний Советский Союз, Япония, Южная Корея).

В-четвертых, чтобы и в дальнейшем обеспечивать режим секретности проведения работ, местоположение полигона должно быть изолировано от основной части страны.

В наибольшей степени этим критериям подошел район Мусудан, который и стал местом строительства полигона.

На первом этапе на восточном побережье Северной Кореи неподалеку от городов Нодонг и Таеподонг в округе Квандай провинции Камгуонг в удалении от основных транспортных магистралей страны были построены несколько дорог, соединивших позиции полигона, командный пункт, станцию наблюдения, склады, и проложены средства связи.

Если судить по снимкам, сделанным в 1999 году американским спутником Ikonos-2, полигон обладает минимальной инфраструктурой, необходимой для проведения ракетных испытаний. По оценке экспертов, полигон не приспособлен для проведения широкомасштабной

Рис. 1. Старт северокорейской ракеты Ынха-3

испытательной программы, но тем не менее позволяет осуществлять периодические испытательные пуски. На полигоне не наблюдается признаков постоянной деятельности. Скорее он напоминает бивуак.

Испытательные пуски

Первые испытания на полигоне в Мусудане были зафиксированы в апреле и сентябре 1984 года. Как полагают, испытывалась баллистическая ракета «Квансонг-5», имеющая диапазон стрельбы 200–250 километров. По мнению западных экспертов, ракета создана на базе советской ракеты «Скад-В», закупленной Северной Кореей в Египте в 1981 году. Всего было проведено пять испытательных пусков, из которых два закончились авариями на ранних участках полета.

После проведения первых стрельб в течение длительного времени не было зафиксировано иных запусков. Вместе с тем разведывательные спутники США зафиксировали проведение строительных работ в районе полигона, которые можно было рассматривать как работы по его дальнейшему развитию и модернизации. Они были сосредоточены на площади в девять квадратных километров вокруг деревень Мусудан, Нодонг и Таеподонг. Эти названия в дальнейшем использовались для классификации северокорейских ракет.

Рис. 2. Макет северокорейского многоразового пилотируемого корабля

В период с середины 1980-х годов до начала 1990-х годов были построены новый командный пункт, центр управления, топливохранилище, склады, испытательный стенд. Существенной модернизации подверглись коммуникационные системы. Строительство велось военнослужащими все того же 117-го инженерного полка НОАК.

В 1990 году разведывательные спутники США зафиксировали подготовку к запуску баллистической ракеты, получившей впоследствии наименование «Нодонг». Однако пуск ракеты так и не состоялся, что заставило предположить аварию на старте.

В июне того же года был зафиксирован старт с полигона ракеты, получившей название «Квансонг-6». Иногда ее классифицируют как «Скад-С». Ракета имела дальность стрельбы 250–350 километров.

Следующий запуск ракеты «Квансонг-6» был обнаружен в июле 1991 года; потом наблюдался длительный перерыв, когда работ на полигоне практически не велось. Оживление деятельности наблюдалось в июне 1992 года, когда, как полагают специалисты, состоялось неудачное испытание баллистической ракеты, тип которой идентифицировать не удалось.

29–30 мая 1993 года на полигоне прошла самая интенсивная серия испытаний. Был произведен пуск одной ракеты типа «Нодонг» и три пуска ракет «Квансонг-5/6».

В конце апреля 1994 года вновь была замечена подготовка к очередным испытаниям, но само испытание не состоялось. Обычно это связывают с проходившими в то время американо-северокорейскими переговорами по проблемам нераспространения оружия массового поражения, которые, как считается, заставили КНДР отказаться от проведения очередных испытаний.

Подготовка к испытательным пускам фиксировалась и в октябре 1996 года, но пуски также не состоялись.

Первый северокорейский «спутник»

В течение следующих двух лет американские разведывательные спутники засекли проведение на полигоне работ, но никогда эти работы не рассматривались как подготовка к пускам, а связывались с модернизацией испытательного оборудования. Работы, непосредственно связанные с подготовкой к пуску, были обнаружены лишь 7 августа 1998 года. Одновременно был зафиксирован выход в море северокорейских судов, которые используются для проведения траекторных измерений во время ракетных испытаний. 27 августа американская разведка сочла подготовку к испытаниям завершенной и приступила к наблюдениям в ожидании пуска.

И их ожидания оправдались. Запуск был произведен 31 августа 1998 года в 12 часов 7 минут по местному времени [1]. Американские средства зафиксировали через 95 секунд после старта отделение первой ступени, которая упала в 253 километрах к востоку от полигона. Через 144 секунды после старта произошло отделение головного обтекателя, упавшего в 1090 километрах от места старта к востоку от острова Хонсю (Япония). Через 266 секунд отделилась вторая ступень и затонула в Тихом океане в 1646 километрах от полигона.

Как полагают, третья ступень не отработала положенное время и упала в 4000 километрах от места старта. Запущенная ракета была классифицирована как боевая баллистическая трехступенчатая ракета «Таеподонг-1».

Мы не будем приводить реакцию правительств США, Японии и Южной Кореи на этот пуск. Скажем только, что она была резко отрицательной, все три страны оценили созданную КНДР ракету как угрозу своей безопасности.

И это были не только слова. В течение нескольких следующих лет в Японии были разработаны и выведены на орбиту спутники, задачей которых стало слежение за происходящим на Корейском полуострове.

Вероятнее всего, шум вокруг пуска вскоре бы утих, если бы не заявление, с которым через три дня после испытаний выступило северокорейское правительство. Было официально объявлено, что во время пуска 31 августа 1998 года на околоземную орбиту был выведен первый северокорейский искусственный спутник Земли.

За первым сообщением последовали другие, в которых превозносилось «очередное великое достижение северокорейского народа» и указывались ... параметры орбиты космического аппарата. Вскоре северокорейская почта выпустила серию марок, посвященных этому «эпохальному событию».

Однако, кроме самих северокорейцев, никто другой этот спутник так и не смог обнаружить. Хотя искали его довольно долго и с помощью американских и российских технических средств контроля космического пространства, и силами астрономов-любителей.

В конце концов все специалисты пришли к выводу, что спутника не было. Хотя жители КНДР до сих пор уверены, что в 1998 году был запущен спутник «Кванменсон-1», долгое время транслировавший на Землю патриотические песни.

Вторая попытка

Новую попытку стать космической державой КНДР предприняла утром 5 апреля 2009 года*. В 12 часов 32 минуты по местному времени из Мусудана стартовала ракета-носитель «Ыхна-2», что переводится как «Млечный путь-2», со спутником «Квансменсон-2» («Яркая Звезда-2»).

Дальше все повторилось так, как это уже было в августе 1998 года: успешное отделение первой ступени и ее падение в Японское море, отделение второй ступени и ее падение в Тихом океане, проблемы с работой третьей ступени и ее падение вместе со спутником в 3,5 тысячах километрах от места старта. Как и 11 лет назад, Пхеньян объявил об успешном выводе на околоземную орбиту своего космического аппарата, который начал «передавать на весь мир здравицы в честь великих вождей Кореи Ким Ир Сена и Ким Чен Ира».

И вновь все предпринятые специалистами России и США попытки обнаружить спутник ни к чему не привели — спутника не было. А Северная Корея почти год уверяла всех, что «Квансменсон-2» по-прежнему кружит над планетой.

---

* По данным американской спутниковой разведки в июле 2006 года в КНДР предполагалось запустить ракету-носитель «Ыхна-1», но в силу возникших технических проблем запуск не состоялся, хотя ряд экспертов рассматривает эту попытку как неудачный запуск.

Новый космодром и новая попытка

Несколько лет назад в КНДР приступили к строительству нового космодрома. Располагается он на западном побережье страны, в Сохэ.

Новая стартовая площадка вступила в строй в конце 2011 года. Приблизительно в то же время вступил в строй Центр управления полетами в Пхеньяне.

Именно с космодрома Сохэ и была предпринята третья по счету попытка КНДР вступить в «Большой космический клуб». Запуск состоялся 13 апреля 2012 года.

Состоявшийся старт разительно отличался от первых двух попыток.

Во-первых, на этот раз информация о подготовке ракеты к пуску поступила не из разведывательных источников, а от официальных властей КНДР и широко освещалась северокорейскими средствами массовой информации.

Во-вторых, на космодром и в только что открывшийся ЦУП впервые были допущены иностранные журналисты. Приглашение получили и представители всех космических агентств мира, но они проигнорировали приглашение «по политическим мотивам», ссылаясь на санкции ООН.

В-третьих, северокорейское телевидение вело практически прямую трансляцию с космодрома.

Однако, несмотря на «новшества», результат пуска был все тем же — ракета потерпела неудачу на участке выведения и упала в Тихий океан. На этот раз КНДР не сильно и настаивала, что запустила очередной спутник. Вместо этого было объявлено, что в ближайшее время будет предпринята новая попытка. И это действительно произошло спустя всего полгода.

«Кванменсон-3» и перспективы

Ракета-носитель «Ынха-3» стартовала с космодрома Сохэ 12 декабря 2012 года. Спустя десять минут от последней ступени носителя отделился спутник «Кванменсон-3» и вышел на околоземную орбиту. Еще через двадцать минут северокорейское телевидение объявило об успешном запуске спутника. А еще через два часа факт запуска спутника был подтвержден командованием воздушно-космической обороны США. Сомнений в том, что КНДР стала космической державой, больше ни у кого не осталось.

В КНДР и раньше «с ликованием» встречали успехи своих ракетчиков. Но та эйфория, которая охватила северокорейское общество в декабре 2012 года, не идет ни в какое сравнение с тем, что было в сентябре 1998 года и в апреле 2009 года. И это была искренняя радость. «Чучхе чучхой», но они сделали это. И им было чему радоваться.

А потом были торжественные приемы специалистов, принимавших участие в подготовке и запуске спутника, их награждение высшими государственными наградами КНДР, очередные почтовые марки и ... ядерное испытание в феврале 2013 года. Но это — так, к слову.

Вскоре после запуска «Кванменсон-3» Комитет космических технологий сообщил, что КНДР планирует вывести на орбиту несколько искусственных спутников, «предназначенных для изучения природных ресурсов Земли, прогнозирования погоды и других целей, важных для экономического развития страны». Более того, Северная Корея объявила, что имеет и другие амбициозные космические проекты, включая организацию своими силами запусков геостационарных спутников и пилотируемых кораблей.

Конечно, до этого еще очень далеко. Но то, что Северная Корея имеет такие планы, заслуживает уважения и пристального внимания. Не надо забывать и о ядерной бомбе, которая есть в арсенале Пхеньяна. Да и политика северокорейских лидеров бывает иногда весьма агрессивна и мало предсказуема.

КОСМОНАВТИКА ЮЖНОЙ КОРЕИ

Начало

На юге от 38-й параллели работы по созданию собственной космической промышленности начались в конце 1980-х годов, когда был создан Корейский авиационно-космический научно-исследовательский институт KARI [2]. Он стал частью Агентства по аэронавтике и космосу Республики Корея и полностью принадлежит государству.

Начало разработок космической техники в Южной Корее стало ответом на аналогичные работы, которые чуть раньше начались в Северной Корее.

Кроме этого фактора, внимание к космонавтике инициировали и существенные успехи экономики Южной Кореи, особенно в сфере высо-

ких технологий, а также падение в феврале 1988 года военной диктатуры генерала Чон Ду Хвана и начало демократических преобразований в стране.

Как уже было отмечено, северокорейцы пользовались на начальном этапе своих работ советской и китайской помощью. Южнокорейцы же ориентировались на техническую поддержку со стороны США. Что было вполне естественно, учитывая многолетние и тесные отношения двух стран.

Первыми самостоятельными работами KARI стала разработка геофизических ракет для проведения научных и прикладных экспериментов, а также программа «Корейского многоцелевого спутника» — «Компсат» (Kompsat) — и проект космического аппарата связи.

В 1990-е годы были созданы и эксплуатировались одноступенчатая ракета KSR-1 и двухступенчатая KSR-2. Первая из них была способна доставить полезный груз массой 150 килограмм на высоту 40–55 километров, вторая — груз той же массы, но на высоту 130–150 километров. Состоялось несколько успешных пусков этих ракет.

Опыт создания и запуска одно- и двухступенчатых зондирующих ракет позволил южнокорейским специалистам перейти к разработке ракеты KSR-3 — своего рода промежуточному шагу, ускоряющему разработку ракеты-носителя легких спутников.

Несмотря на то, что разработка ракет в Южной Корее велась не очень стремительными темпами, собственными спутниками страна обзавелась довольно давно. Первый национальный спутник «Китсат-1» (Kitsat-1) был запущен 10 марта 1992 года с помощью ракеты-носителя «Ариан-4» (Ariane-4) с космодрома Куру во Французской Гвиане. Космический аппарат предназначался для дистанционного зондирования Земли и отработки перспективных космических технологий.

Спустя год также из Куру был запущен еще один подобный аппарат, а в 1995 году с американского космодрома на мысе Канаверал стартовал первый южнокорейский спутник связи «Кореасат-1» (Koreasat-1).

Первый космический аппарат, созданный в рамках упомянутой выше государственной программы «Компсат», стартовал 21 декабря 1999 года.

Рис. 3. Спутник STSAT-2C, запущенный южнокорейцами собственными силами

Почти все южнокорейские спутники (а сегодня «в активе» их уже почти полтора десятка) запускались иностранными государствами — Россией, США, Индией, Европой. Лишь один из них запущен собственными силами. Но о нем речь впереди.

Интенсификация работ

Надо отметить, что, несмотря на чрезвычайно развитую экономику и значительные финансовые возможности, денег на космонавтику в Южной Корее выделяется не так уж много. Страна не имеет никаких амбициозных планов, столь характерных для других азиатских космических держав. Поэтому запуски пилотируемых кораблей и полеты к другим планетам в ближайших планах Южной Кореи не значатся. Хотя в отдаленной перспективе южнокорейцы готовы заняться и такими разработками.

Как уже было отмечено, космическая программа в Южной Корее стартовала в конце 1980-х годов. Но стремление попасть в десятку сильнейших аэрокосмических держав мира приняло конкретную форму лишь в апреле 1996 года, в «Основном долговременном плане космических разработок Кореи» [3]. Там же впервые прозвучали конкретные сроки создания собственного космического носителя — где-то после 2010 года.

Вероятно, события и развивались бы так, как это было прописано в «Плане...», если бы не

Рис. 4. Южнокрейский носитель устанавливается на стартовой позиции

попытка Северной Кореи запустить собственный спутник 31 августа 1998 года. На чисто технологические возможности наложился пресловутый «политический фактор», который заставил значительно интенсифицировать работы и поменять местами акценты. Началась космическая гонка двух Корей за право быть первыми (естественно, первыми из двух) в космосе.

Довольно быстро в Южной Корее поняли, что без помощи извне одержать победу в соревновании с КНДР весьма проблематично. Надо было привлекать кого-то со стороны.

Вполне логично, что первый запрос о помощи был направлен США, давнишнему и надежному партнеру и союзнику Южной Кореи. Напомним, что первые южнокорейские геофизические ракеты были созданы с помощью американцев. Однако к просьбе помочь с выходом в космос в Вашингтоне отнеслись весьма сдержано. С одной стороны, и рады бы были помочь, но, с другой стороны, очень не хотелось «раздражать» Пхеньян. Да и у самих работ по космическим проектам хватало. Кроме того, тех средств, которые южнокорейцы готовы были заплатить за оказанную «услугу», американцам показалось маловато.

А вот в России запрос Южной Кореи не отвергли. Наоборот. Возможность участия в разработке южнокорейского космического носителя была встречена с восторгом. Эту работу «вписали» в разработку нового российского носителя «Ангара». Соглашение об участии российских специалистов по созданию южнокорейского космического носителя было подписано в 2004 году.

Россияне взялись изготовить первую ступень ракеты-носителя, получившей название «Наро-1» (Naro-1). Ею должен был стать ракетный модуль УРМ-1, созданный специалистами Центра имени М.В. Хруничева в рамках программы «Ангара».

Старт должен был состояться с космодрома Наро, построенного на острове Венародо в провинции Чолла-Намдо на юго-западе Корейского полуострова.

Кстати, одним из «побочных» проектов российско-южнокорейского сотрудничества стал полет первого космонавта Южной Кореи на космическом корабле «Союз ТМА». Им, точнее, ею стала Ий Сойон*, совершившая свой полет в апреле 2008 года.

* В русскоязычной литературе используется и другое написание ее имени — Ли Со Ен. Однако, Федеральное космическое агентство (Роскосмос) в специальном пресс-релизе от 20 марта 2008 года оговорило этот вопрос и предложило использовать в русском варианте имя Ий Сойон.

Первый пуск «Наро-1»

Свою первую попытку стать космической державой Южная Корея предприняла 25 августа 2009 года. К тому времени в КНДР уже состоялись два аварийных старта. Поэтому в Сеуле готовились к триумфу.

В прямом эфире миллионы корейцев и россиян наблюдали, как белоснежная ракета ушла со старта, заложила крутой вираж в сторону моря и растаяла в вечернем небе. Через 13 минут агентство Йонхап с пометкой «молния» сообщило: «Первая ракета Южной Кореи успешно вывела спутник на околоземную орбиту». Однако репортеры выдали желаемое за действительное, так как ...

Так как к тому моменту «Наро-1» вместе со спутником уже сгорела в плотных слоях земной атмосферы, тем самым похоронив планы южнокорейских политиков опередить в космической гонке своих визави из Северной Кореи.

Причиной аварии стало нештатное отделение створок головного обтекателя. Одна из створок отделилась от ракеты на 216-й секунде полета, а вторая оставалась на носителе до 540-й секунды полета, когда, как предполагается, была «снесена» спутником при его отделении от ракеты. Из-за избыточной массы ступень не развила требуемую скорость и спутник, находившийся под обтекателем, на орбиту не вышел.

В начале 2010 года были обнародованы результаты работы независимой южнокорейской комиссии по расследованию причин аварии ракеты-носителя «Наро-1». Специалисты свели к минимуму возможные причины аварийного пуска, но так и не смогли сказать точно, почему это произошло.

По словам председателя комиссии, Ли Инна, наиболее правдоподобна следующая версия: электрический сигнал на подрыв системы разделения был выдан штатно. Однако по каким-то причинам электрический разряд, который был направлен на пироболты, удерживающие не отделившуюся створку, оказался меньше штатного.

Другая возможная причина — дефекты в механике пиромеханической системы, из-за чего могло произойти заклинивание одной из створок обтекателя, несмотря на то, что взрывчатое вещество было подорвано штатно.

Рис. 5. Ий Сойон — первая кореянка в космосе

Но неоспоримым был тот факт, что вины российской стороны в аварии нет. Хотя в Южной Корее в первые дни после гибели «Наро-1» и звучали голоса, обвинявшие специалистов Центра имени М.В. Хруничева в «крушении южнокорейских надежд». Впрочем, поговорили, поговорили и замолчали. Так как аргументов в пользу этой версии не было. И быть не могло.

Неоднозначность выводов комиссии не помешала южнокорейским специалистам приступить к изменению конструкции ракеты-носителя. Доработки предусматривали внесение изменений в бортовую кабельную сеть и механические устройства с целью предотвратить повторение проблем, возникших в первом пуске ракеты.

При втором пуске эти проблемы действительно не повторились. И не могли повториться, так как следующая ракета погибла еще до того, как наступило время сброса головного обтекателя.

Кто виноват и что делать дальше

Вторую попытку вырваться на космические просторы южнокорейцы предприняли в июне 2010 года. Год, прошедший после первой аварии, был потрачен в основном на совершенствование верхней ступени ракеты-носителя «Наро-1».

Специалисты переделали бортовую кабельную сеть и конструкцию головного обтекателя, упростили систему для снижения вероятности сбоев. В частности, были приняты меры для уменьшения возможности разрядки бортовых аккумуляторов и использованы кабели с лучшей устойчивостью к разряду. Была введена дополнительная защита, гарантирующая одновременный сброс створок головного обтекателя.

Несмотря на то, что истинные причины первой аварии так и не были установлены, южнокорейцы надеялись, что второй старт будет успешным. Как заявил руководитель ракетных разработок в Южнокорейском аэрокосмическом институте Чо Гван Рэ, «подобная авария в этот раз не повторится». Да, на этот раз характер аварии был иным.

Неприятности начались за 3,5 часа до старта, назначенного на 9 июня 2010 года. Внезапно сработала система пожаротушения. Сразу отключить ее не удалось, и на ракету и стартовый стол обрушились тонны пены. В результате первая ступень оказалась почти наполовину скрытой пенной горой. Естественно, старт был отложен.

Рис. 6. Южнокорейский носитель KSLV-1

Его удалось осуществить только вечером следующего дня, когда второй летный экземпляр «Наро-1» «покинул» стартовую площадку. Предполагалось, что на околоземную орбиту будет выведен экспериментальный спутник STSat-2B, близнец спутника, утерянного в результате первой аварии.

Пуск завершился аварией. На 137-й секунде полета на высоте около 70 километров связь с ракетой прервалась. Поначалу была надежда, что ракета продолжила полет и вывела спутник на орбиту, а через пару часов его возьмут на сопровождение. Однако чудес не бывает, и вскоре стало ясно, что и носитель, и космический аппарат погибли. Обломки упали на расстоянии примерно 450 километров от космодрома в воды Японского моря и затонули.

Официальная информация об аварии была скудна и крайне противоречива. Так, на сайте Центра имени М.В. Хруничева в первом опубликованном сообщении речь шла о штатной работе первой ступени «Наро-1», которую разрабатывали российские специалисты. Через пару часов в сообщение внесли коррекцию — из него исчезла фраза о штатной работе первой ступени. И только потом в него была добавлена фраза об аварии.

Впрочем, и южнокорейская сторона не баловала какими-либо подробностями, ограничиваясь лишь признанием самого факта аварии. Что не помешало ряду СМИ и чиновников Южной Кореи уже на следующее утро во весь голос обвинять российскую сторону в срыве пуска. Анонимный источник сообщил журналистам, что есть данные, указывающие на повреждение ракетного двигателя РД-191. Якобы в момент, когда носитель начал отклоняться от курса, наблюдалось значительное падение его мощности.

Естественно, российская сторона отвергла эти обвинения [4]. Через неделю после аварии глава Роскосмоса Анатолий Перминов сказал, что итоги предварительного расследования говорят об отсутствии отклонений в работе всех систем носителя, изготовленных в России. «Я уверен, что и во время первого пуска, и теперь претензий к российской установке быть не может», — сказал он.

Версия о сбое в работе российского двигателя была не единственной, которую рассматривали специалисты. В частности, телеметрия за-

фиксировала повышенный уровень вибраций и других «аномалий» в межступенчатом переходнике, соединяющем первую и вторую ступени. Эти данные легли в основу версии о преждевременном включении двигателя второй ступени. Кстати, о том же говорил и тот факт, что сразу же после этого телеметрия со второй ступени перестала поступать. Если бы авария произошла на первой ступени, то информация от второй как шла, так и продолжала бы идти. В данном случае этого не наблюдалось.

После аварии была создана аварийная комиссия, состоящая из 26 российских и южнокорейских специалистов. Параллельно с ней работали еще несколько комиссий, ведомственных и независимых (ведомственные — в России и Южной Корее, независимые только в Южной Корее). Несмотря на обилие комиссий, ничего толкового они сказать не смогли. Южнокорейцы обвиняли во всех смертных грехах Россию, ну, а россияне, естественно, — своих азиатских партнеров.

Запоздалый успех

Два года ушло на то, чтобы урегулировать разногласия между сторонами и возвратиться к нормальной работе. Тем более, что этого требовала сложная политическая обстановка на Корейском полуострове и предпринятая в апреле 2012 года новая попытка Северной Кореи одержать победу в космической гонке.

На время забыв разночтения о причинах аварии 2010 года, российские и южнокорейские специалисты стали срочно готовить запуск третьей ракеты «Наро-1». Согласно вновь утвержденному графику запуск должен был состояться в октябре—ноябре 2012 года.

Стороны надеялись на успех, поэтому и готовили ракету очень тщательно. Все понимали, что случись авария — и совместному российско-южнокорейскому проекту придет конец. Об этом весьма определенно сказали южнокорейские чиновники, ответственные за финансирование работ.

Поэтому, когда в ходе предстартовой подготовки были выявлены неисправности, запуск был перенесен сначала с октября на ноябрь 2012 года, а потом и на начало 2013 года. Когда принималось это решение, вряд ли кто-нибудь подозревал, что именно в этот момент «выстрелит» Северная Корея. А она это сделала и запустила свой спутник, менее чем на полтора месяца опередив южнокорейцев.

И все-таки Южная Корея тоже вошла в число космических держав. Третий пуск ракеты-носителя «Наро-1» состоялся 30 января 2013 года и был успешным. Без проблем отработали российская первая ступень и южнокорейская вторая ступень. На околоземную орбиту был выведен экспериментальный спутник STSat-2C.

Надо сразу признать, что, несмотря на успех, состоявшийся пуск «всенародной» радости, как в КНДР, в Южной Корее не вызвал. Страна уступила своим северным соседям, на которых всегда смотрела свысока. А подобная ситуация мало кому могла понравиться.

Южнокорейские планы

За месяц до запуска первого южнокорейского спутника правительство Южной Кореи утвердило второй пятилетний план по развитию национальной космической программы, а также измененный план по развитию корейской космической программы на срок до 2021 года. Как следует из этих документов, с 2012 года Южная Корея начнет разработку новых космических спутниковых технологий, а также значительно расширит наземную инфраструктуру для сбора и обработки спутниковой информации.

Основной целью обновленной космической программы было объявлено улучшение качества повседневной жизни граждан за счет более активного использования спутниковых технологий, связанных с метеопрогнозами, наблюдением за дорожной ситуацией, передачей интернет-данных и др. Ввести новые спутниковые технологии Сеул планирует к 2016 году.

В конечном итоге к 2021 году Южная Корея намерена самостоятельно разработать космическую ракету «Наро-2» с собственным двигателем и начать проводить запуски без внешней помощи.

Всего до 2021 года страна намерена потратить на космическую отрасль около 1,55 триллионов корейских вон, или 1,34 миллиарда долларов США по текущему курсу (не так уж и много), поэтому говорит только о научных исследованиях и прикладных космических аппаратах. Но, главное, что Южная Корея останется в космосе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасенко, М.** Северная Корея рвется в космос [Текст] / М. Тарасенко // Новости космонавтики.— 1998. № 19/20.

2. **Афанасьев, И.** Космическая программа Южной Кореи [Текст] / И. Афанасьев // Новости космонавтики.— 2001. № 7.

3. **Гуща, А.** Ракетно-космическая деятельность развивающихся стран и международная безопасность [Текст] / А. Гуща, Н. Ромашкина // Индекс безопасности.— 2009. Т. 14, № 4 (87).

4. **Кирьянов, О.** Россия не виновна в космических неудачах Кореи [Текст] / О. Кирьянов // Российская газета.— 26 июня 2012 г.

REFERENCES

1. **Tarasenko M.** Severnaia Koreia rvetsia v kosmos [Tekst] // Novosti Kosmonavtiki.— 1998. № 19/20. (rus.)

2. **Afanas'ev I.** Kosmicheskaia programma Iuzhnoi Korei [Tekst] // Novosti kosmonavtiki, 2001/ № 7. (rus.)

3. **Gushcha A., Romashkina N.** Raketno-kosmicheskaia deiatel'nost' razvivaiushchikhsia stran i mezhdunarodnaia bezopasnost' [Tekst] // Indeks bezopasnosti.— 2009. T. 14, № 4 (87), (rus.)

4. **Kir'ianov O.** Rossiia nevinovna v kosmicheskikh neudachakh Korei [Tekst] // Rossiiskaia gazeta.— 26 iiunia 2012 g. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович — советник президента Ракетно-космической корпорации «Энергия»; 194064, Тихорецкий пр. 21, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: zheleznyakov@rtc.ru

КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич — доктор физико-математических наук профессор, советник ректората Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: korablev@spbcas.ru

AUTHORS

ZHELEZNYAKOV Alexander B. — Rocket and Space Corporation «Energia», 194064, Tikhoretsky Prospect 21, St. Petersburg, Russia; e-mail: zheleznyakov@rtc.ru

KORABLEV Vadim V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: korablev@spbcas.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.9

М.П.Федоров, М.В.Кривошеев

ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБАЛАНСА СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ РЕСУРСОВ

M.P. Fedorov, M.V. Krivosheev

THE PROSPECTS OF ENERGY BALANCE FORMATION IN NORTH-WEST OF RUSSIAN FEDERATION USING THE LOCAL RESOURCES

Проанализированы возможности обеспечения потребности в энергии Северо-Западного федерального округа за счет местных ресурсов. Обсуждаются возможные пути достижения энергобаланса в Санкт-Петербурге и Ленинградской области.

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ОКРУГ. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. ЭНЕРГОБАЛАНС. ПОТРЕБЛЕНИЕ. ЭНЕРГОРЕСУРСЫ. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.

The results of an analysis of the potentialities of energy balance maintenance in Russian Federations North-West by use of local resources are presented. The possible ways toward the energy balance achievement are discussed as applied to Saint-Petersburg and Leningrad region.

NORTH-WEST DISTRICT OF RUSSIAN FEDERATION. LENINGRAD REGION. SAINT-PETERSBURG. ENERGY BALANCE. CONSUMPTION. ENERGY RESOURCES. RENEWABLE ENERGY SOURCES.

Важное условие устойчивого развития любого региона — возможность обеспечения энергобаланса с включением местных ресурсов, поскольку задачей топливно-энергетического комплекса как системы добычи топлива и производства энергии (электроэнергия и тепло) является удовлетворение потребности общества в источниках жизнеобеспечения.

В статье оцениваются возможности достижения энергетической независимости Северо-Западного федерального округа (СЗФО) и, особенно, такого мегаполиса, как Санкт-Петербург, рассматриваемый совместно с Ленинградской областью.

Северо-Западный федеральный округ

При оценках энергобаланса использовались данные о выработке и потреблении электрической и тепловой энергии за 2010–2011 гг., приведенные в материалах Росстата [1], статистических сборниках отдельных субъектов СЗФО (например, [2]) и в отчетах крупнейших энергетических компаний, мощности которых используются в пределах округа для производства около 85 % электроэнергии: ОГК-2 (Киришская, Псковская, Череповецкая ГРЭС), ОГК-3 (Печорская ГРЭС), «ИНТЕР РАО–Электрогенерация» (Северо-Западная ТЭЦ и Калининградская ТЭЦ-2), ТГК-1 (14 ТЭЦ и 41 ГЭС), ТГК-2 (4 ТЭЦ), ТГК-9 (4 ТЭЦ), ОАО «Концерн Росэнергоатом» (Кольская и Ленинградская АЭС). На тепловых электростанциях указанных компаний в 2010 году произведено более 40 млрд кВт·ч (~40 % электроэнергии, выработанной в СЗФО). На гидроэлектростанциях и атомных станциях в 2010 году

получено соответственно 12 и 35 % электроэнергии (рис. 1 и табл. 1). Остальная часть электроэнергии произведена на мощностях, принадлежащих менее крупным организациям, например на ведомственных ТЭЦ в Санкт-Петербурге, ТЭЦ в Калининградской области, ТЭЦ «Монди СЛПК» и др.). Величины удельного расхода топлива в условных единицах на различных электростанциях сильно различаются (от 326 г у.т./кВт·ч на Печорской ГРЭС до 256 г у.т./кВт·ч на Калининградской ТЭЦ с блоками, работающими по высокоэкономичному парогазовому бинарному циклу). ТЭС обеспечивают также около 50 % поставок теплоэнергии (остальные поставки осуществляют котельные).

За основу при оценке расхода топлива на электрогенерацию в СЗФО были приняты величина удельного расхода топлива, близкая к средней по ТЭЦ Петербурга (из данных по ТЭЦ ТГК-1) — 300 г у.т./кВт·ч, и данные Петростата [3] о расходе топливно-энергетических ресурсов при производстве разных видов продукции и работ в Петербурге и Ленинградской области в 2010 году (см. табл. 2). Исходя из данных об электроэнергии, произведенной в 2010 году всем СЗФО, и о производстве электроэнергии на ГЭС компании ТГК-1 и АЭС определялась величина электрогенерации на ТЭС и ТЭЦ (в предположении, что вклад других источников генерации невелик). Таким образом определено количество топлива (17–18 млн т у.т.), расходуемого на электрогенерацию тепловыми энергоустановками СЗФО (без АЭС).

За базовую цифру расхода топлива на теплогенерацию был принят расход по Петербургу и Ленинградской области согласно данным Петростата [3]. Аналогичный необходимый расход по СЗФО (20–24 млн т у.т.) принимался пропорциональным численности населения СЗФО (с учетом доли городского и сельского населения). Приведенная цифра весьма приблизительна, так как не учитывались такие факторы, как эффективность теплогенерирующего оборудования и потери в теплосетях при централизованном теплоснабжении, различие климатических условий в разных районах СЗФО.

Таким образом, годовые потребности СЗФО в топливе грубо оценены в 37–42 млн т у.т., необходимых для производства электроэнергии, отпущенной электростанциями, работающими на котельно-печном топливе, и теплоэнергии, отпущенной промышленно-производственными котельными. Если же учесть потребность в топливе тепловых электростанций, сооружение которых окажется необходимым для замены АЭС округа — Ленинградской и Мурманской, например в случае отказа от ядерной энергетики, то потребность округа в топливе возрастет примерно на 10 млн т у.т. (до 48–52 млн т у.т./год) при условии, что новые ТЭС будут аналогичны Калининградской ТЭЦ-2.

Основную часть топлива, потребляемого в округе на производство энергии, составляет природный газ (примерно 90–98 % в зависимости от субъекта).

Остальная потребность покрывается главным образом топочным мазутом и каменным углем. Такая структура потребления топлива обусловливает зависимость округа от поставок извне. Местные виды топлива (в основном древесина) используются ограниченно, как и возможности возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из которых существенную роль могут сыграть энергия ветра, тепло земных недр, биомасса и энергия малых водотоков.

Рис. 1. Производство электроэнергии на основных видах генерирующих установок в 2010 году

Таблица 1

Генерирующие мощности и производство электроэнергии и тепла в СЗФО (в 2010 г.)

Тип энергоустановки	Собственник	Регион	Установленная электрическая мощность, МВт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Выработка электроэнергии, ТВт·ч	Выработка тепловой энергии, тыс. Гкал	Удельный расход топлива в условных единицах на производство электроэнергии, г у.т./кВт·ч	Используемое топливо	
								Основное	Резервное
ГРЭС	ОГК-2	ВО, ЛО, ПО	3160	1394	12,33	2833	Нет данных	газ, уголь,	мазут
ГРЭС	ОГК-3	РКо	1060	387	3,65	298	326	газ	мазут
ТЭЦ	ИНТЕР РАО	СПб, КО	1800	1380	7,824	1157	232-256	газ	газ, дизтопливо
ТЭЦ	ТГК-1	СПб, ЛО, МО, РКа	3370	14368	14,24	28818	301,4	газ/ мазут	уголь/торф
ТЭЦ	ТГК-2	АО, ВО, НО	1282	4505	> 2,32	Нет данных		газ, уголь мазут	Нет данных
ТЭЦ	ТГК-9	РКо	690	1499	2,93	2346	Нет данных		
ТЭЦ+ГРЭС всего идентифицировано	–	–	11362	23294	>43,44	>35452	Нет данных		
ГЭС всего	ТГК-1	ЛО, МО, РКа	2905	–	12.92	–	–	–	–
АЭС всего	Росатом	ЛО,. МО	5760	–	38,22	–	–	–	–
Всего идентифицировано	–	–	20027	23294	94,58*	>35452	–	–	–

Обозначения субъектов СЗФО: Республика Карелия — РКа; Республика Коми — РКо; Архангельская область — АрО; Вологодская область — ВО; Калининградская область — КО; Ленинградская область — ЛО; Мурманская область — МО; Новгородская область — НО; Псковская область — ПО; г. Санкт-Петербург — СПб.

*По данным Росстата [1] — 110,73 ТВт·ч.

Таблица 2

Генерирующие мощности, производство энергии (2010 г.) и расход топлива на нужды энергетики в субъектах Российской Федерации Санкт-Петербург и Ленинградская область

Субъект Российской Федерации	Тип энергоустановки	Собственник	Установленная электрическая мощность, МВт	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Выработка электроэнергии, ТВт·ч	Отпуск тепловой энергии, тыс. Гкал	Расход углеводородного топлива на разные нужды [3], тыс. т у.т.		
							Электрогенерация, тыс. т у.т.	Теплогенерация, тыс. т у.т.	Всего на нужды энергетики, тыс. т у.т.
С-Петербург	ТЭЦ	ТГК-1	2563	11896	12.24	22966	Нет данных		
	Малые ТЭЦ		80	Нет данных	0,15	Нет данных	Нет данных		
	С-З ТЭЦ	ИНТЕР РАО	900	700	4,79	1093	Нет данных		
	Всего		3543		17,18	24059	4515	6521	11036
Ленобласть	ТЭЦ	ТГК-1	192	185	0,36	295	Нет данных		
		ОГК-2	2100	1234	6,78	2 635	Нет данных		
	ТЭЦ всего		2292	1419	7,14	2930	–	–	–
	ГЭС	ТГК-1-	677	–	3.41	–	–	–	–
	АЭС	Росатом	4000	–	27,55	-	–	–	–
	Всего		6969		38,1	2930	2817	2908	5725
Суммарно по СПб и области	ТЭЦ		3735	–	24,32	26989	–	–	–
	ГЭС		677	–	3.41	–	–	–	–
	АЭС		4000	–	27,55	–	–	–	–
	Всего		10512	–	55,28*	26989	7332	9429	16761

*По данным Росстата [1] — 56,73 ТВт·ч.

Ресурсы ископаемых углеводородов в СЗФО — это запасы углей, нефти и природного газа на территории Архангельской области (Ненецкий АО) и Республики Коми. Согласно данным [4] обеспеченности СЗФО по доказанным запасам угля Печорского бассейна хватит примерно на 100 лет при вышеуказанном уровне годовой потребности округа. Прогнозные же запасы углеводородов (УВС) с учетом ресурсов Тимано-Печерского региона (нефть, газ) [5] обеспечивают округ на несколько сотен лет, даже без учета запасовУВС на шельфе Баренцева моря.

Современный уровень годовой добычи углеводородов (2010–2011 гг.) достигает 58 млн т у.т. топлива (25 млн т у.т в Архангельской области и около 33 млн т у.т. в Республике Коми [2]), что примерно соответствует годовой потребности округа.

В округе имеются также запасы горючих сланцев, в настоящее время в интересах энергетики не используемые. Перспективными объектами освоения биогенного сланцевого газа на Северо-Западе России считаются отложения в Прибалтийском сланцевом бассейне (Ленинградская область) и верхнеюрские отложения Тимано-Печорского и Вычегодского сланцевых бассейнов.

Таким образом, в принципе возможно обеспечение тепло- и электрогенерирующих предприятий округа собственными ресурсами.

Наряду с субъектами, энергоизбыточными по электробалансу, — Республикой Коми, Ленинградской и Мурманской областями (последние два объекта — благодаря АЭС), в СЗФО имеются и энергодефицитные [1]. Особенно велик разрыв между потреблением и производством электроэнергии в Санкт-Петербурге, Республике Карелия и в Новгородской области.

Санкт-Петербург и Ленинградская область

На субъекты Санкт-Петербург и Ленинградскую область (СПб и ЛО) приходится более половины валового продукта (55–56 %) и около половины (48 %) населения СЗФО. В этих двух субъектах производится около 51 % электроэнергии, генерируемой в СЗФО, и примерно 41 % потребляется (по данным за 2010 год, табл. 2).

Санкт-Петербург — энергодефицитный регион, покрывающий собственные потребности в электроэнергии за счет генерации на ТЭЦ (в основном компании ТГК-1) лишь на 63 %. Донором является Ленинградская область, потребляющая 46 % производимой на ее территории электроэнергии (рис. 2). Основными генерирующими мощностями в области служат АЭС (27,55 ТВт·ч в 2010 г.) и Киришская ГРЭС (6,78 ТВт·ч). Структура электрогенерации в Санкт-Петербурге и Ленинградской области показана на рис. 2.

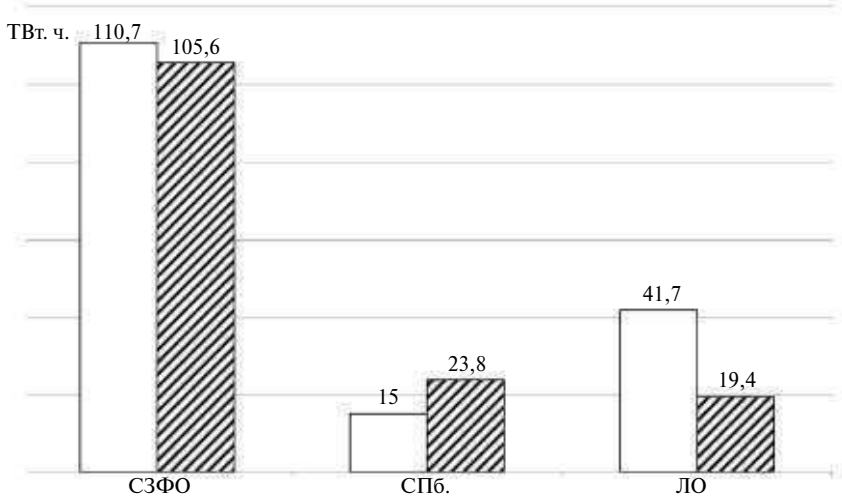


Рис. 2. Электробаланс СЗФО, Санкт-Петербурга и Ленинградской области в 2010 году [1] (— произведено; — потреблено)

Из 19,3 млн т у.т. топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), израсходованных в этих субъектах в 2011 году [3], 87 % (16,8 млн т у.т.) пошло на нужды энергетики. В случае замены Ленинградской АЭС на тепловые электростанции, использующие углеводородное топливо, потребность региона в углеводородном топливе возрастет примерно до 25–26 млн т у.т./год или, если экспорт электроэнергии за пределы области будет прекращен, а замещающие теплоэлектростанции будут оснащены современным оборудованием, отвечающим последним достижениям в области мировой энергетики, до ~21 млн т у.т./год.

В настоящее время практически все потребляемое топливо, 95 % которого составляет природный газ, поступает из других регионов.

Структуры потребления электроэнергии (в процентах) для Санкт-Петербурга и Ленинградской области представлены в табл.3 и на рис. 3. Там же для сравнения приведена структура потребления в России, СЗФО и других округах. Для обеспечения таких потребителей электроэнергии, как добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды, сельское и лесное хозяйства, строительство, транспорт и связь, население, в анализируемом регионе необходимо около 5,5 млн т у.т. Обращает на себя внимание значительная величина потерь в электросетях ЛО и потребление по статье «другие виды экономической деятельности» в СПб и ЛО, заметно превышающие такое потребление в среднем по СЗФО, другим округам и в целом по стране.

Для замещения ввозимых на территорию топлив в Ленинградской области могут использоваться:

возобновляемые источники энергии (гидроэнергия, солнечная энергия, энергия ветра, биомасса);

вторичные энергоресурсы (ВЭР) — тепло сточных вод, твердые бытовые отходы (ТБО), низкопотенциальное тепло систем охлаждения тепловых электростанций;

теплота недр, в том числе приповерхностные геотермальные ресурсы ;

запасы полезных ископаемых на территории Ленинградской области (торф и горючие сланцы).

Промышленные запасы торфа в Ленинградской области оцениваются в 334 млн т у.т., а технически пригодные (извлекаемые) — в 200 млн т у.т. [6]. При уровне ежегодной добычи топливного торфа, которая была достигнута к середине прошлого века (~2 млн т [7]), получаемая при сжигании энергия может составить 0,7–0,8 млн т у.т.

Запасы горючих сланцев Ленинградского месторождения (г. Сланцы) оцениваются от 150 млн т до 1 млрд т [6], [8]. По некоторым источникам [8] комплекс, рассчитанный на переработку 2,5–3 млн тонн сланцевого сырья в год, позволит получать до 350 тыс. тонн жидких сланцевых топливных продуктов и порядка 100 тыс. тонн полукоксового газа ежегодно (0,5–0,65 млн т у.т.). При уровне ежегодной добычи сланцев, достигнутой в середине прошлого века (5 млн т [7]), получаемая при сжигании энергия может составить 1–1,3 млн т у.т. в год при обеспеченности сланцами на 30–200 лет.

Таким образом, за счет ископаемых углеводородов при уже достигавшихся уровнях добычи можно рассчитывать на 2 млн т у.т./год.

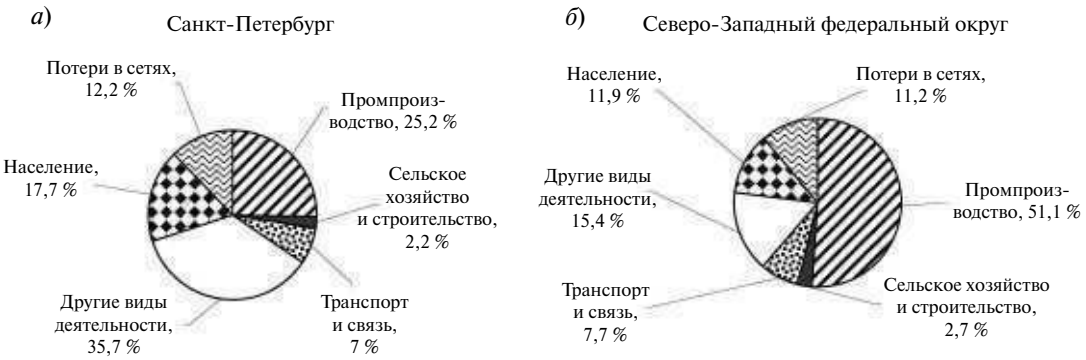


Рис. 3. Структура потребления электроэнергии в Санкт-Петербурге и СЗФО

Таблица 3

Структура потребления электроэнергии в России, федеральных округах и некоторых субъектах СЗФО [1]

Округ, субъект	Произведено электро-энергии, в % от всей потребленной электро-энергии	Потреблено электро-энергии всего, млн кВт·ч	Потребление по группам потребителей, % от всей потребленной в электроэнергии						
			Добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды	Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство, производственные нужды	Строительство	Транспорт и связь	Другие виды экономической деятельности (услуги)	Население	Потери в электросетях
Российская федерация	101,7	1020,63	54,4	1,6	1,0	8,7	11,7	12,4	10,3
Северо-Западный ФО	104,8	105,64	51,1	1,6	1,0	7,6	15,4	11,9	11,2
г.Санкт-Петербург	62,7	23,86	25,2	0,2	2,0	7,0	35,7	17,7	12,2
Ленинградская область	215,4	19,40	51,1	3,2	1,0	8,0	11,5	8,8	16,2
Ленинградская область и г. Санкт-Петербург	131,1	43,26	36,8	1,5	1,5	7,5	24,8	13,7	14,0
г. Москва	100,0	51,95	31	0,0	1,3	6,4	32,6	19	9,3
Центральный ФО	110,6	206,82	45	2	1,2	7,3	16,7	15,9	11,9
Уральский ФО	97,3	180,62	67,7	0,6	1,3	9,5	6,5	7,3	7
Приволжский ФО	104,1	183,01	52,5	1,7	0,8	11,3	12	12,4	9,2
Северо-Кавказский ФО	110	22,813	30	1,5	0,5	2,9	17	24,4	23,2
Сибирский ФО	96,7	218,31	64,4	1,4	0,9	7,4	7	10,3	8,4
Дальневосточный ФО	1-06,4	42,45	41	1,1	1,2	13,1	12	17,2	14,4
Южный ФО	82,9	60,95	39	2,7	1,1	7,9	16,4	17	15,6

В Ленинградской области на ГЭС вырабатывается 3,1–3,4 ТВт·ч в год, что эквивалентно замещению 1,0 млн т у.т. топлива. Технический потенциал малой гидроэнергетики оценен [6] в 0,8 ТВт·ч/год. Наращивание генерации на малых ГЭС может повлиять на решение проблемы энергообеспечения лишь на местном уровне.

Промышленные потенциалы энергии солнца и ветра весьма велики (30–40 млн. т у.т.), [6].

Экономический потенциал солнечной энергии пока оценивается как незначительный и в условиях Ленинградской области не может рассматриваться как существенный, хотя по мере развития работ в этой области такой вывод, возможно, придется пересмотреть.

Северо-Запад России — регион, в котором уровень теоретического (природно-климатического) потенциала ветровой энергии весьма высок [9]. Анализ ветрового режима показал, что ряд площадок для размещения ветроэнергетических установок (ВЭУ) может иметь высокое число часов использования (более 3000), достигая в отдельных случаях 4000–4500 часов. Благоприятные условия для сооружения ВЭС имеются на побережьях и мелководных акваториях Финского залива и Ладожского озера с небольшими глубинами (2–10 м) и высокими среднегодовыми скоростями ветра. В [9] приведены оценки технических ресурсов ветроэнергетики этих районов, сделанные в предположениях о равномерном «шахматном» расположении ВЭУ по территории с расстоянием между агрегатами в 10 диаметров ротора; тогда общая установленная мощность ВЭУ в восточной части Финского залива с учетом мелководных акваторий может составить 11250 МВт при годовой выработке электроэнергии до 25 ТВт·ч/год (~7 млн т у.т.). В районе о. Котлин (г. Кронштадт) ВЭС позволят получить до 100 МВт электрической мощности. Ввиду непостоянного характера этого вида генерации его применение требует решения проблемы аккумулирования энергии (например, с помощью ГАЭС).

Производство энергии из биомассы (биомасса отходов агропромышленного комплекса и лесная — по расчетной лесосеке) предполагает устойчивый характер. Технический потенциал биомассы по Ленинградской области оценен [6] в 0,96–0,97 млн т у.т./год, а экономический — в 0,58 млн т у.т./год. В условиях города одним из источников биогаза служат полигоны твердых бытовых отходов (ТБО), на которых производят захоронение большей части отходов. В г. Санкт-Петербурге ежегодно образуется около 4,5 млн м^3 ТБО. Ориентировочный объем выделения метана при разложении органического вещества свалочных масс оценивается в размере около 50 млн м^3 /год (~ 0,06 млн т у.т./год).

Потенциал замещения органического топлива за счет использования тепла сточных вод, низкопотенциального тепла и тепла грунта составляет 0,4 млн т у.т. (технический) и 0,2 млн т у.т. (экономически оправданный) [6].

Таким образом, ВИЭ (включая «большую» гидроэнергетику) могут обеспечить до 9–9,5 млн т у.т /год, т. е. 50–60 % потребности региона (при наличии электрогенерации на ЛАЭС), что может существенно улучшить надежность энергоснабжения.

При таких обстоятельствах важное значение с точки зрения обеспечения энергонезависимости приобретает энергосбережение, потенциал которого в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, потребляющих до 45 % расходуемого в округе топлива, особенно значителен.

Соласно «Региональной программе Петербурга в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [10] и исходя из утвержденного Комитетом по энергетике и инженерному обеспечению Санкт-Петербурга целевого показателя по снижению энергоемкости валового регионального продукта не менее чем на 17 % к 2015 году и не менее чем на 40 % к 2020 году (по сравнению с 2007-м), годовая экономия первичной энергии может составить не менее 3,7 млн т у.т. к 2015 году и 8,7 млн т у.т. — к 2020 году за счет совершенствования наружного освещения, реализации мер по энергосбережению и повышению энергетической эффективности при реконструкции газопроводов, сокращения потерь и эксплуатационных затрат в газораспределительной системе Санкт-Петербурга, снижения среднегодового энергопотребления на транспортировку воды, уменьшения неучтенного расхода и потерь воды. Модернизация генерирующего оборудования, сокращение до 7–8 % потерь в электросетях (которые сегодня достигают 12,2 % в Петербурге и 16 % в области) может дать годовую экономию топлива на нужды электрогенерации в 0,8–1,0 млн т у.т.

Таким образом, если удастся достаточно полно реализовать потенциал экономии (4,5–9,5 млн т у.т.) и потенциал замещения углеводородного топлива возобновляемыми источниками энергии (9–9,5 млн т у.т.), представляется реальным обеспечение энергонезависимости СПб—ЛО при сохранеии электрогенерации на ЛАЭС.

В случае выведения из эксплуатации атомной станции потребуются меры по наращиванию в 2,5–5 раз мощностей по добыче и переработке ископаемого топлива.

Проведенный анализ показал, что в целом по СЗФО энергобаланс может быть обеспечен за счет местных ресурсов углеводородов, однако по ряду субъектов округа, в том числе Санкт-Петербургу и Ленинградской области, для достижения баланса необходимо развивать как разработку местных ископаемых топлив, так и использование возобновляемых источников энергии.

Оценки, на основе которых сделаны эти выводы, — предварительные, но дают представление о масштабах проблемы. Дальнейшими этапами работы должно стать проведение комплексных исследований, включающих технико-экономические оценки с использованием уточненных данных о энергопотреблении, в том числе его динамике, перспективах реализации мероприятий по энергосбережении.

Такое исследование может быть выполнено с привлечением специалистов, объединяемых Научным советом по проблемам энергетики Санкт-Петербургского научного центра РАН.

Статья подготовлена по итогам работы Объединенного научного совета по проблемам энергетики СПб НЦ РАН, в 2010–1012 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельская область в 2010 году: статистический ежегодник [Текст] / Федер. служба гос. статистики, Территор. орган Федер. службы гос. статистики по Архангельской. обл. (Архангельскстат). — Архангельск: Архангельскстат, 2011.— Российский статистический ежегодник. 2011 г. [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики (Росстат).— Российский статистический ежегодник, 2011, http://www.gks.ru/free

2. Статистический ежегодник Республики Коми. Статистический сборник 2012 Официальное издание [Текст] / Комистат.— Сыктывкар: Изд-во Комистата, 2012.

3. Использование топливно-энергетических ресурсов в организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области в 2011 году: Статистический бюллетень [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. Территориальный орган по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области (Петростат).— Сайт Петростата. 2012. Адрес доступа: http://petrostat.gks.ru/public/DocLib2/SB11INT.htm

4. Уголь [Электронный ресурс]/ Информационно-аналитический центр «Минерал».— Сайт информационно-аналитического центра «Минерал». 2008. Адрес доступа: http://www.mineral.ru/Facts/russia/131/297/index.html

5. Запасы нефти в России выросли на 160 миллионов тонн за год. [Электронный ресурс]/ Lenta.Ru— Телеграфистъ.— 2013. Адрес доступа: http://telegrafist.org/2013/01/22/36459/

6. Постановление Правительства Ленинградской области от 27 июля 2010 г. № 191 «Об утверждении региональной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности Ленинградской области на 2010–2015 годы и на перспективу до 2020 года» (с изменениями от 15 июля 2011 г.) [Электронный ресурс]. http://bazazakonov.ru/doc/?ID=2854110

7. Народное хозяйство Ленинграда и Ленинградской области в десятой пятилетке: Статистический сборник [Текст].— Ленинград: Лениздат, 1981.

8. **Сергеев, А.** Сланец — забытое богатство Северо-Запада России. [Электронный ресурс]/ А. Сергеев— 2001.— http://www.kapitele.ru/articles/157

9. **Елистратов**, **В.В.** Развитие потенциала возобновляемой энергетики на Северо-Западе России [Текст] / В.В. Елистратов, И.Н. Григорьев, Я.Н. Сколяров.— Сб. докл. междунар. научно-практ. конф. «Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы».— 4–6 ноября 2003 г.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003

10. **Постановление** Правительства Санкт-Петербурга от 27 июля 2010г. № 930 «О региональной программе Санкт-Петербурга в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности (в ред. Постановления Правительства СПб от 24.02.2011 № 232) [Электронный ресурс]/ Администрация Санкт-Петербурга.— Региональная программа Санкт-Петербурга в области энергосбережения.— 2011.— http://gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2012/08/05/Postanovlenie_SPb_N930.pdf

REFERENCES

1. Arkhangelskaya oblast v 2010 godu: statisticheskiy yezhegodnik [Tekst]/ Feder. sluzhba gos. statistiki, Territor. organ Feder. sluzhby gos. statistiki po Arkhangelskoy. obl. (Arkhangelskstat).— Arkhangelsk: Arkhangelskstat, 2011. Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik 2011g [Elektronnyy resurs]/ FederalnayA sluzHba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat)— Rossiyskiy statisticheskiy yezhegodnik. 2011.— http://www.gks.ru/free (rus.)

2. Statisticheskiy yezhegodnik Respubliki Komi. Statisticheskiy sbornik 2012 Ofitsialnoye izdaniye [Tekst] /Komistat.— Syktyvkar: Izd-vo Komistat, 2012 (rus.)

3. Ispolzovaniye toplivno-energeticheskikh resursov v organizatsiyakh Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti v 2011 godu/ Statisticheskiy byulleten [Elektronnyy resurs] / Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Territorialnyy organ po g. Sankt-Peterburgu i Leningradskoy oblasti (Petrostat).— Sayt Petrostata.— 2012.— http://petrostat.gks.ru/public/DocLib2/SB11INT.htm (rus.)

4. Ugol′ [Elektronnyy resurs]/ Informatsionno-analiticheskiy tsentr «Mineral».— Sayt informatsionno-analiticheskogo tsentra «Mineral». 2008.— http://www.mineral.ru/Facts/russia/131/297/index.html (rus.)

5. Zapasy nefti v Rossii vyrosli na 160 millionov tonn za god. [Elektronnyy resurs]/ Lenta.Ru— Telegrafist. 2013/ (rus.)

6. Postanovleniye Pravitelstva Leningradskoy oblasti ot 27 iyulya 2010 g. № 191 «Ob utverzhdenii regionalnoy programmy «Energosberezheniye i povysheniye energeticheskoy effektivnosti Leningradskoy oblasti na 2010–2015 gody i na perspektivu do 2020 goda» (s izmeneniyami ot 15 iyulya 2011 g.).— [Elektronnyy resurs].— http://bazazakonov.ru/doc/?ID=2854110 (rus.)

7. Narodnoye khozyaystvo Leningrada i Leningradskoy oblasti v desyatoy pyatiletke. Statisticheskiy sbornik [Tekst].— Leningrad: Lenizdat, 1981. (rus.)

8. **Sergeyev A.** Slanets — zabytoye bogatstvo Severo-Zapada Rossii. [Elektronnyy resurs]/ A. Sergeyev.— 2001.— http://www.kapitele.ru/articles/157 (rus.)

9. **Elistratov, V.V.. Grigoryev N., Skolyarov Ya.N.** Razvitiye potentsiala vozobnovlyayemoy energetiki na Severo-Zapade Rossii [Tekst].— Sb. dokl. mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konf. «Vozobnovlyayemaya energetika 2003: sostoyaniye, problemy, perspektivy». 4–6 noyabrya 2003 g.— Sankt-Peterburg: Izdatelstvo SPbGPU, 2003 (rus.)

10. **Postanovleniye** Pravitelstva Sankt-Peterburga ot 27 iyulya 2010g. № 930 «O regionalnoy programme Sankt-Peterburga v oblasti energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti (v red. Postanovleniya Pravitelstva SPb ot 24.02.2011 N 232) [Elektronnyy resurs]/ Administratsiya Sankt-Peterburga.— Regionalnaya programma Sankt-Peterburga v oblasti energosberezheniya.— 2011.— http://gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2012/08/05/Postanovlenie_SPb_N930.pdf (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДОРОВ Михаил Петрович — доктор технических наук профессор, советник ректора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; академик РАН; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: M.Fedorov@spbstu.ru

КРИВОШЕЕВ Михаил Васильевич — кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник помощник ректора Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: mvkrivos@yandex.ru

AUTHORS

FEDOROV Mikhail P. St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: M.Fedorov@spbstu.ru

KRIVOSHEEV Mikhail V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: mvkrivos@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.311

И.А. Арсеньев, И.З. Богуславский,
В.В. Попов, В.В. Суханов

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОЩНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

I.A. Arsenjev, I.Z. Boguslawsky,
V.V. Popov, V.V. Sukhanov

FEATURES OF CREATION AND OPERATION OF POWERFUL ALTERNATING CURRENT MACHINS IN OFF-LINE POWER SUPPLY NETWORKS

Рассмотрены особенности электромагнитных процессов в мощных машинах переменного тока, работающих в составе автономных сетей. Выработаны рекомендации по эксплуатации, расчету и проектированию таких машин, учитывающие эти особенности.

КОЭФФИЦИЕНТ ИСКАЖЕНИЯ. НЕЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА. ВЫСШИЕ ВРЕМЕННЫЕ ГАРМОНИКИ. ДОПУСТИМАЯ МОЩНОСТЬ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК В ЗАЗОРЕ. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ. ВНЕЗАПНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ НАГРУЗКИ. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

Peculiar properties of electromagnetic processes of high-powered alternating current machines, functioning within off-line networks, are presented. Recommendations for operation, calculation and designing, worked out with account of specific characteristics of machines are proposed.

DISTORTION FACTOR. NON-LINEAR LOAD. HIGH TEMPORARY HARMONIC. POWER CARRYING CAPACITY. FLUX IN THE AIR-GAP. HANDLIND OF SPEED OF ROTATION. SUDDEN LOAD EXTENSION. VOLTAGE CHANGE.

В последние годы в энергетике находят широкое распространение автономные сети, в которых применяется преобразовательная техника. В связи с этим возникают проблемы оптимизации режимов мощных высокоиспользованных машин переменного тока при их эксплуатации в автономных сетях и учета особенностей их проектирования [1].

Практика решения этих проблем выдвигает прежде всего следующие задачи: определение допустимых режимов работы таких машин при эксплуатации; выбор оптимальных законов регулирования низкочастотных двигателей с целью обеспечения максимального КПД; ограничение провала напряжения при внезапных изменениях нагрузки и др. Рассмотрим результаты решения некоторых из этих задач и сформулируем вытекающие из них рекомендации по проектированию.

Выбор номинальной мощности машины переменного тока при работе в нелинейной сети

Опыт эксплуатации синхронных генераторов, асинхронных и синхронных двигателей, предназначенных заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, подтверждает, что мощность $P_{лин}$ этих машин, указанную в каталоге, оказывается необходимым снизить до величины $P_{доп}$, если эти машины эксплуатируются в нелинейной сети с коэффициентом искажений $k_{иск} > 0{,}05$.

Мощность генератора или двигателя, которые выпущены заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, мы назовем модельной — $P_{мод}$, а допустимую для нее мощность $P_{доп}$ с учетом указанного влияния высших временных гармоник — номинальной; ее величина зависит

при одной и той же модельной мощности от амплитуды этих высших гармоник. Далее изложены методы для определения допустимой (номинальной) мощности этих машин в зависимости от характеристики нелинейности сети.

В последние годы при большом объеме поставляемых заказчикам однотипных машин, предназначенных для работы в нелинейной сети, целесообразно проектировать и изготовлять такие машины, определяя их номинальную мощность с учетом параметров сети, которые обычно указываются в технических условиях на поставку. Особенности проектирования таких машин также излагаются далее.

Допустимая мощность машины с учетом коэффициентов искажения по току и напряжению.

В рамках решения этой задачи обычно различают следующие возможные режимы работы машин:

работа генераторов только на нелинейную нагрузку (например, преобразователи частоты или выпрямители) и двигателей, питающихся от преобразователей частоты;

работа генераторов на смешанную нагрузку, состоящую из линейной (например, осветительной) и нелинейной (например, частотно-регулируемые двигатели).

Работа генераторов и двигателей в сети только с нелинейной нагрузкой. При наличии в сети преобразователей частоты актуальна проблема влияния высших временных гармоник на потери в машине, ее нагрев, шумы и вибрации. Эти гармоники индуктируют в обмотке и активной стали статора ЭДС и токи частотой $f_{стат} = f_{сет}N$, где $f_{сет}$ — частота первой гармоники тока (основная частота сети), N — порядок временных гармоник. Среди них различают гармоники порядков $N_1 = 1; 7; ..., (6k - 5)$ и порядков $N_2 = 5; ...; 6\cdot k - 1$ ($k = 1; 2; ...$). Первые из них создают вращающий момент машины, а вторые — тормозной. В контурах ротора синхронной машины обе «соседние» гармоники (например, $N_1 = 7$ и $N_2 = 5$; $N_1 = 13$ и $N_2 = 11$) индуктируют ЭДС и токи одинаковой частоты $f_{рот} = f_{сет}(N_1 - 1) = f_{сет}(N_2 + 1)$. В длительном эксплуатационном режиме асинхронной машины (при скольжениях $s < 0{,}01$) частоты ЭДС и токов, индуктируемых обеими «соседними» гармониками, близки по величине. Например, при частоте сети $f_{сет} = 50$ Гц и $s = 0{,}075$ эти частоты равны $f_{рот\,1} = 296{,}25$ Гц (при $N = N_2 = 5$), $f_{рот\,2} = 303{,}25$ Гц (при $N = N_1 = 7$).

Отметим, что для генераторов малой и средней мощности, работающих в сетях промышленной частоты (50 Гц), стандартами [2] предусмотрен коэффициент мощности, равный $\cos\varphi = 0{,}8$; однако, если в автономной (например, судовой) сети имеются нелинейные элементы, а ее основная частота составляет $f_{сет} = 50$ Гц (то есть, $N = 1$), то для генератора в такой сети обычно $\cos\varphi < 0{,}8$.

Рассмотрим предварительно для примера нелинейную сеть с высшими временными гармониками порядков $N = 5$ и $N = 7$, представляющими наибольший практический интерес. Оценим их влияние на допустимую мощность синхронного генератора, который предусмотрен заводом-изготовителем для работы в промышленной сети. Примем дополнительно, что коэффициент Фильда обмотки статора этого генератора при основной частоте $f_{стат} = 50$ Гц ($N = 1$) равен $K_{F1} = 1{,}2$. Тогда из-за высших гармоник основные и добавочные потери в обмотке статора этого генератора увеличатся согласно [3] в $Q^*_{общ\,N} \approx 1{,}25 - 1{,}3$ раза (в зависимости от формы кривой тока). Увеличатся также потери в активной стали статора и ротора. Соответственно, чтобы сохранить перегрев обмотки статора, согласно [2] необходимо снизить мощность генератора в нелинейной сети примерно в 1,15 раза только из-за потерь и перегрева обмотки статора.

Перейдем к общей задаче определения допустимой мощности машины в нелинейной сети [3]. Эту мощность $P_{доп}$ удобно в практических расчетах представить в относительных единицах ($P^*_{доп}$), т. е. в долях ее модельной мощности $P_{мод}$, определяемой заводом-изготовителем для работы в линейной сети. В [3] показано, что она может быть представлена в виде

$$P^*_{доп} = P^*_{обм} P^*_{серд}. \qquad (1)$$

Здесь $P^*_{обм}$ — отношение допустимой мощности машины при работе в нелинейной сети к модельной при одинаковых токах и потерях в обмотке статора; $P^*_{серд}$ — аналогичное отношение потерь в активной стали статора и ротора. Отметим, что выражение (1) предполагает для асинхронных машин с фазным ротором дополнительную проверку перегрева обмотки ротора

в соответствии с требованиями стандартов [2], а для асинхронных с короткозамкнутым ротором — проверку нагрева стержней (их перегрев стандартами не нормируется); обычно для асинхронных машин перегревы обмотки ротора при этой дополнительной проверке удовлетворяют требованиям эксплуатации: в связи со снижением мощности согласно (1) они не превосходят допустимых значений. Расчеты показывают, что такая проверка перегрева обмотки ротора необходима и для синхронных машин, если в нелинейной сети $\cos\varphi < 0{,}7$. Для проверки удобно воспользоваться диаграммой Потье [4], представленной аналитически.

Выражение для $P^*_{\text{обм}}$ получено в [3] в виде

$$P^*_{\text{обм}} = \sqrt{\frac{K_{F1}}{\sum Q^*_{\text{осн}\,N} + \sum \Delta Q^*_{\text{осн}\,N}}}\,. \qquad (1')$$

Здесь $\sum Q^*_{\text{осн}\,N}$ — сумма основных потерь; $\sum \Delta Q^*_{\text{осн}\,N}$ — сумма дополнительных потерь; K_{F1} — коэффициент Фильда [4, 10]. Оба вида потерь выражены в относительных единицах, как и мощность $P^*_{\text{обм}}$:

$$\sum Q^*_{\text{осн}\,N} = 1 + \ldots + \left(\frac{K_5}{K_1}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{K_N}{K_1}\right)^2 + \ldots; \quad (2)$$

$$\sum \Delta Q^*_{\text{осн}\,N} =$$

$$= \Delta K_{F1}\left[1 + \ldots + \left(\frac{K_5}{K_1}\right)^2 (5)^2 + \ldots + \left(\frac{K_N}{K_1}\right)^2 (N)^2 + \ldots\right], \quad (3)$$

где $\Delta K_{F1} = K_{F1} - 1$; K_N — отношение амплитуды гармоники порядка (N = 1; 5; ...) к амплитуде несинусоидального фазного тока.

Выражение (1) для $P^*_{\text{серд}}$ согласно [3] имеет вид

$$P^*_{\text{серд}} = \frac{1}{\sqrt{\sum W^*_{N\,\text{ст}}}}, \qquad (4)$$

где $\sum W^*_{N\,\text{ст}} =$

$$= 1 + \left(\frac{s_5 K_5}{s_1 K_1}\right)^2 (5)^{1,3} + \ldots + \left(\frac{s_N K_N}{s_1 K_1}\right)^2 (N)^{1,3}; \quad (4')$$

$s_N = \dfrac{F_{N\,\text{рез}}}{K_{\text{нас}\,N} F_{N\,\text{ст}}}$; $F_{N\,\text{рез}}$ — амплитуда гармоники МДС результирующего поля в зазоре порядка N; $F_{N\,\text{ст}}$ — амплитуда МДС обмотки статора того же порядка; $K_{\text{нас}\,N}$ — коэффициент насыщения магнитной цепи, определяемый из характеристики холостого хода. Отметим, что для временной гармоники порядка $N = 1$ синхронной машины величина s_N обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению X_{AD}; для гармоник порядка $s_N > 1$ она может быть вычислена согласно схеме замещения для соответствующей гармоники МДС [4]. Для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором из этой схемы получаем

$$s_N = \frac{1}{1 + \dfrac{Z_{\text{М}}}{Z'_2}}, \qquad (5)$$

где $Z_{\text{М}}$ — полное сопротивление намагничивающего контура, а Z'_2 — приведенное сопротивление вторичного контура (номер гармоники N у обоих сопротивлений опущен). У асинхронных машин, используемых в автономных сетях, для гармоник порядка $N > 1$ коэффициент насыщения $K_{\text{нас}\,N} \approx 1$, а величина $s_N < 0$. Это означает, что беличья клетка ротора в значительной мере экранирует поле высших временных гармоник взаимоиндукции (поля в зазоре). Поэтому с достаточной для практики точностью выражение для s_N при $N > 1$ может быть использовано и для расчета режимов синхронных машин, если стержни демпферной обмотки расположены равномерно по периферии ротора.

В табл. 1 для примера приведены результаты расчета мощности $P^*_{\text{доп}}$ асинхронной машины с формой фазного тока в виде трапеции с различной шириной ее верхнего основания $b_{\text{в}} = \text{var}$ при ширине нижнего основания $b_{\text{н}} = 180$ гр. эл.; расчеты проведены для трех значений коэффициента K_{F1}: 1,075 (вариант 1); 1,15 (вариант 2); 1,25 (вариант 3).

Из табл. 1 следует, что при изменении верхнего основания трапеции до значений $b_{\text{в}} \le b_{\text{н}} \cdot 2/3$ вследствие уменьшения амплитуд высших гармоник можно увеличить мощность машины до $P^*_{\text{доп}} \approx 0{,}93$–$0{,}95$. Такому снижению амплитуды ряда гармоник (с порядком N = 5; 7; 17; 19;...) способствует и использование «двенадцатипульсной» схемы инвертора.

Для синхронных машин при $\cos\varphi < 0{,}7$ дополнительно требуется определить ток ротора

Таблица 1

Мощность $P^*_{доп}$ при форме фазного тока в виде трапеции с различной шириной верхнего основания ($b_в$= var)

Параметр $b_в$ трапециидальной формы тока, эл. град.	$P^*_{доп}$, о. е., при трех значениях коэффициента K_{F1}		
	1,075	1,15	1,25
140	0,90	0,88	0,85
120	0,93	0,92	0,91
100	0,95	0,94	0,93

$i_{рот\ нел}$, который соответствует мощности $P_{доп}$. Если $i_{рот\ нел} > I_{рот\ лин}$, то мощность $P_{доп}$ необходимо снизить дополнительно, чтобы обеспечить допустимый по [2] уровень перегрева обмотки ротора; здесь $I_{рот\ лин}$ — ток ротора, соответствующий мощности $P_{мод}$ машины, предназначенной заводом-изготовителем для работы в линейной сети (при коэффициентах искажения $K_{иск} \le 0{,}05$ согласно [2]).

Работа генераторов на смешанную нагрузку. Оценим теперь допустимые режимы синхронных генераторов при работе на смешанную нагрузку, состоящую из линейной ($Z_{лин}$) и нелинейной ($Z_{нел}$). Решение этой задачи [3] — частный случай предыдущей. Особенность решения состоит в том, что обе нагрузки отличаются не только амплитудами токов и их гармоническим составом, но и значениями cosφ (для нагрузки $Z_{нел}$ значение cosφ вычисляется при $N = 1$). Поэтому предварительно необходимо определить эквивалентный коэффициент мощности $\cos\varphi_{экв}$ на выводах генератора (для $N = 1$). Практика расчетов показывает, что в этих режимах достаточно часто оказывается, что $\cos\varphi_{экв} < 0{,}7$, и тогда допустимая мощность генератора определяется как потерями и нагревом обмотки и активной стали статора, так и потерями и нагревом обмотки ротора.

В последние годы широкое применение в промышленности находят преобразователи частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Характерно, что работа этих преобразователей отрицательно воздействует на пазовую изоляцию обмотки статора электрических машин, в связи с чем их дополнительно комплектуют фильтрами высших гармоник (порядков $N > 20$) [1, 5].

Частный случай: машина проектируется для работы в автономной сети с нелинейными элементами. Обычно в практике проектирования такой машины выбирают один из двух путей:

1. За базу принимают машину с той же по величине модельной мощностью (предназначенной для работы в линейной сети). В ее конструкцию вносят изменения в соответствии с результатами расчета по соотношениям (1)–(5); их используют как исходные данные для вентиляционного и теплового расчетов. Обычно такие изменения сводятся к следующим: повышению эффективности вентиляции машины; увеличению сечения меди обмотки статора и размеров паза; увеличению сечения меди витков ротора (для синхронной машины при низких значениях cos φ); увеличению сечения стержней короткозамкнутой обмотки ротора (беличьей клетки, демпферной обмотки).

Весьма часто эти изменения связаны с переводом машины в больший габарит [4].

2. За базу принимают машину из каталога завода-изготовителя, у которой на 20–25 % модельная мощность больше номинальной (предназначенной для работы в нелинейной сети). В соответствии с результатами расчета по соотношениям (1)–(5) в конструкцию машины вносят, если необходимо, изменения, которые аналогичны перечисленным в п. 1.

Выбор оптимальных законов регулирования низкочастотных синхронных двигателей с целью обеспечения максимального КПД

Для таких двигателей с номинальным моментом на валу свыше 100 т·м (например, для двигателя в автономной системе электродвижения ледокола — 12000 кВт, 110 об/мин) актуаль-

ной оказывается проблема обеспечения КПД в режимах, когда скорость вращения меньше номинальной ($n_{вр} \le n_{ном}$), т. е. при регулировании скорости вращения «вниз».

Обычно при частотном регулировании скорости синхронного двигателя с электромагнитной системой возбуждения (статической или бесщеточной) напряжение на выводах $U_{дв}$ и его частота $f_{дв}$ выбираются такими, чтобы выполнялось условие

$$U_{дв} = U_{ном} \frac{f_{дв}}{f_{ном}}, \qquad (6)$$

где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение двигателя. Для низкочастотных двигателей (при номинальной частоте $f_{ном} < 16$ Гц) индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора оказывается сопоставимым с омическим, поэтому вместо соотношения (5) более корректно следующее:

$$E_{дв} = E_{ном} \frac{f_{дв}}{f_{ном}}.$$

Здесь $E_{дв}$ — ЭДС обмотки статора. Из последнего выражения следует, что при изменении скорости вращения результирующий поток Ф в расточке и степень насыщения магнитной цепи двигателя сохраняются постоянными:

$$\Phi = \Phi_{ном}. \qquad (5')$$

Исследования показывают [6], что сохранение условия (5′) для низкочастотных двигателей оказывается неоптимальным, если механизм, сочлененный с валом двигателя, имеет квадратичную зависимость момента сопротивления $M_{сопр}$ от скорости $n_{дв}$. При этом следует принимать во внимание следующие особенности режимов работы двигателей с такими механизмами:

мощность двигателя P_2 при изменении скорости вращения $n_{дв}$ изменяется по кубическому закону

$$P_2 = k_p n_{дв}^3; \qquad (6)$$

ток статора $I_{ст}$ при изменении напряжения согласно соотношению (5′) изменяется по квадратичному закону $I_{ст} \approx k_I n_{дв}^2$ (k_p, k_I — коэффициенты пропорциональности [4]);

потери $Q_{КЗ}$ короткого замыкания (в обмотке статора и добавочные)

$$Q_{КЗ} = k_Q n_{дв}^4, \qquad (7)$$

где k_Q — коэффициент пропорциональности [4].

Одной из особенностей мощных низкочастотных двигателей является структура потерь: доля потерь короткого замыкания и омических потерь в обмотке ротора составляет свыше 85–90 % общих потерь в машине.

Анализ выражений (6)–(7) показывает, что в эксплуатационных режимах при уменьшении скорости вращения $n_{дв} < n_{ном}$ и, соответственно, $f_{дв} < f_{ном}$, потери короткого замыкания резко уменьшаются по сравнению с потерями возбуждения. Вместе с тем в пределах ограничений по перегреву обмотки статора и по насыщению магнитной цепи возможно для каждого эксплуатационного режима ($P_2 = \text{idem}$, $n_{дв} < n_{ном}$) получить примерное равенство потерь $Q_{КЗ} \approx Q_{возб}$. Нетрудно показать, что этому равенству соответствует максимальное значение КПД при малых потерях холостого хода, что справедливо при низкой частоте $f_{дв} < f_{ном}$.

Для того чтобы обеспечить это равенство потерь, достаточно вместо соотношения (5) и соответственно (5′) выполнить следующие:

$$U < U_{ном} \frac{f}{f_{ном}}; \quad \Phi < \Phi_{ном}. \qquad (8)$$

При уменьшении потока $\Phi < \Phi_{ном}$ величина $F_{МЦ} = k_{F\,МЦ}(\Phi)$ тоже уменьшается (по сравнению со значением в номинальном режиме) согласно характеристике холостого хода.

Одновременно для выбранного режима при $P_2 = \text{idem}$ возрастают МДС $F_{ст}$ и потери $Q_{КЗ}$. В результате выполнение соотношений (8) приводит к изменению обеих составляющих потерь — $Q_{КЗ}$ и $Q_{возб}$.

При определенном соотношении МДС $F_{ст}$ и $F_{рот}$ для напряжения U согласно (8) можно получить примерное равенство потерь $Q_{КЗ}$, $Q_{возб}$ и максимальное значение КПД.

Нелинейные зависимости МДС обмоток от скорости вращения, а потерь — от напряжения позволяют лишь приближенно найти аналитическое решение задачи поиска значений напряжения $U \le U_{ном} f / f_{ном}$ для обеспечения максимального КПД при $P_2 = \text{idem}$, $n_{дв} = \text{idem}$. Однако численная реализация ее дает возможность получить результаты при условии строгого учета указанных нелинейных зависимостей, а также падения напряжения в активном сопротивлении и в индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки статора.

В табл. 2 приведены для примера значения КПД низкочастотного двигателя (номинальные данные — 20 мВт; 5,8 кВ; 140 об/мин; 11, 67 Гц), спроектированного для системы электродвижения судна [6]; диапазон изменения скоростей вращения — $40 \le n_{\text{дв}} \le 70$; мощность P_2 изменяется согласно (6).

Таблица 2

Зависимость оптимальных значений КПД низкочастотного двигателя от частоты вращения

$n_{\text{дв}}$, об/мин	КПД, %	
	При $U = \text{var}$ согласно (8)	При $U = \text{var}$ согласно (5′)
70	97,9	97,8
65	97,8	97,6
60	97,7	97,4
55	97,6	97,1
50	97,5	96,6
45	97,3	95,9
40	97,0	94,9

При использовании условия (8) изложенный метод поиска максимального КПД низкочастотного двигателя в эксплуатационных режимах (при $n_{\text{дв}} < n_{\text{ном}}$) может быть применен и при иной зависимости мощности P_2 от частоты вращения n, например квадратичной.

Динамические характеристики генераторов

В соответствии с требованиями стандарта [7] генераторы, работающие в автономных сетях, должны иметь определенные ограничения величины ΔU переходного отклонения напряжения по сравнению с номинальным при внезапных набросах и сбросах нагрузки; ограничено и время переходного процесса восстановления напряжения. Отметим, что генераторы для потребителей, работающих в автономных сетях, часто выполняются на низкое напряжение (400 В, 690 В). Подробные исследования показывают [8], что величина ΔU определяется эквивалентным индуктивным сопротивлением генератора X^*, причем $X''_D \le X^* \le X'_D$, где X''_D, X'_D — соответственно сверхпереходное и переходное индуктивные сопротивления генератора по продольной оси. Величины X''_D, X'_D зависят от индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора X_S. Одним из конструктивных мероприятий, позволяющих снизить сопротивления X_S и, следовательно, X^*, является применение для низковольтных машин однослойных обмоток, выполняемых по типу двухслойных с равномерным шагом [9, 10]. Уравнение для расчета сопротивления X_S, о. е., может быть представлено в виде [4, 10]

$$X_S = (AS/B_{\text{заз}})\cdot[K_1 h/(\Delta\tau) + K_2\tau/L_{\text{акт}}], \qquad (9)$$

где AS — линейная нагрузка статора; $B_{\text{заз}}$ — амплитуда индукции в зазоре; K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности, определяемые параметрами обмотки (сокращением шага и др.); h — высота паза статора; Δ — отношение ширины паза к зубцовому делению статора; τ, $L_{\text{акт}}$ — соответственно полюсное деление и длина активной стали статора. Отметим, что оптимальное значение отношения Δ лежит в пределах $0{,}4 \le \Delta \le 0{,}5$. Из уравнения (9) следует, что «вынесение из паза второго слоя» двухслойной обмотки с одновременным удвоением числа пазов статора позволяет снизить величину h и, следовательно, уменьшить пазовое рассеяние машины.

Изложенные особенности электромагнитных процессов в машинах, работающих в составе автономных сетей, необходимо учитывать как при их эксплуатации, так и при проектировании.

При эксплуатации машин:

1. Номинальную мощность $P_{\text{лин}}$ машины переменного тока, предназначенной заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, необходимо снижать до величины $P_{\text{доп}}$, если эта машина эксплуатируется в нелинейной сети с коэффициентом искажений $K_{\text{иск}} > 0{,}05$. Степень снижения мощности $K_P = P_{\text{доп}}/P_{\text{лин}} < 1$ определяется нелинейностью сети; например, при коэффициентах искажения в ней $K_{\text{иск}} \approx$ $\approx$ 0,18–0,25 величина K_P может составить $K_P \approx 0{,}85$–$0{,}9$. Мощность $P_{\text{доп}}$ для синхронной машины может быть дополнительно снижена, если коэффициент мощности на ее выводах $\cos\varphi_{\text{нел}} < \cos\varphi_{\text{лин}}$.

2. Для машин, работающих с преобразователями частоты, построенными по принципу широтно-импульсной модуляции, следует принимать дополнительные меры по уменьшению

амплитуды высших временных гармоник (устанавливать фильтры и др.).

3. При скоростях вращения менее номинальной у мощных частотно-регулируемых двигателей с электромагнитной системой возбуждения целесообразно для повышения КПД уменьшить насыщение магнитной цепи (по сравнению с ее насыщением в номинальном режиме) до уровня, при котором потери в обмотках ротора $Q_{\text{возб}}$ и статора $Q_{\text{КЗ}}$ составят отношение $Q_{\text{КЗ}}/Q_{\text{возб}} \approx 1$.

При проектировании машин:

1. Для машин, предназначенных для эксплуатации в нелинейной сети ($K_{\text{иск}} > 0{,}05$), необходимо предусмотреть более низкие значения коэффициента Фильда обмотки статора, чем для машин общепромышленного назначения ($K_{\text{иск}} \le 0{,}05$); соответственно должна быть усилена короткозамкнутая обмотка ротора (беличья клетка, демпферная обмотка).

2. Для синхронных генераторов, чтобы обеспечить их динамические режимы (величины переходного отклонения напряжения ΔU при внезапном изменении его нагрузки согласно [7]), необходимо принимать меры по снижению индуктивного сопротивления X''_D до уровня $X''_D \approx 0{,}18–0{,}22$; для этого целесообразным оказывается применение однослойных обмоток для машин низкого напряжения (400 В и 690 В).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богуславский, И.З.** Проблемы создания машин переменного тока для работы в сетях с нелинейными элементами [Текст] / И.З. Богуславский, Я.Б. Данилевич, В.В. Попов, Г. Кусс (ФРГ) // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2006. № 2(44).

2. **ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60 034–1–2004).** Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики [Текст] / Госстандарт России.— М., 2004.

3. **Богуславский, И.З.** Метод определения допустимой мощности двигателя переменного тока при работе в нелинейной сети [Текст] / И.З. Богуславский // Электротехника.— 2009. № 5.— С. 22а–28.

4. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов.— М. — С.-Петербург: Питер, 2006.

5. **Ватаев, А.С.** Высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором [Текст]: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / А.С. Ватаев / СПбГПУ.— СПб., 2009.

6. **Богуславский, И.З.** Метод минимизации потерь мощных низкочастотных двигателей в эксплуатационных режимах при нелинейной зависимости момента сопротивления от частоты вращения [Текст] / И.З. Богуславский // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 5.— С. 172–175.

7. Российский морской Регистр судоходства [Текст]: Т. 1–3.— М., 2012.

8. **Boguslawsky, I.Z.** Generators for independent power plants: performance and trends [Text] / I.Z. Boguslawsky // Archiv fuer Elektrotechnik.— 2006. № 5.— Springer Verlag, Berlin.

9. **Кручинина, И.Ю.** Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований [Текст]: Автореф. дис. ...докт. техн. наук.— Изд-во Лема, 2013.

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

REFERENCES

1. **Boguslavskiy I.Z., Danilevich Ya.B., Popov V.V., Kuss G. (FRG).** Problemy sozdaniya mashin peremennogo toka dlya raboty v setyakh s nelineynymi elementami [Text] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2006. № 2(44). S. 37–47. (rus.)

2. **GOST R 52776–2007 (MEK 60 034–1–2004).** Mashiny elektricheskiye vrashcha¬yushchiyesya. Nominalnyye dannyye i kharakteristiki [Tekst] / Gosstandart Rossii.— Moskva, 2004. (rus.)

3. **Boguslavskiy I.Z.** Metod opredeleniya dopustimoy moshchnosti dvigatelya peremennogo toka pri rabote v nelineynoy seti [Text] // Elektrotekhnika.— 2009. № 5. (rus.)

4. **Voldek A.I., Popov V.V.** Elektricheskiye mashiny [Text]. M. — S.-Peterburg: Piter, 2006.— T. 1–462 s. T. 2–575 s. (rus.)

5. **Vatayev A.S.** Vysokochastotnyye elektromagnitnyye protsessy i perenapryazheniya v chastotno — reguliruyemykh asinkhronnykh dvigatelyakh s korotkozamknutym rotorom [Tekst]: Avtoreferat dissertatsii ... kand techn nauk.— SPb.: Izdatelstvo SPbGPU, 2009. (rus.)

6. **Boguslavskiy I.Z.** Metod minimizatsii poter moshchnykh nizkochastotnykh dvigateley v ekspluatatsionnykh rezhimakh pri nelineynoy zavisimosti momenta soprotivleniya ot chastoty vrashcheniya [Tekst] // Izvestiya RAN. Energetika.— 2006. № 5. (rus.)

7. Rossiyskiy morskoy Registr sudokhodstva [Tekst] // Vol. 1–3.— Moskva, 2012. (rus.)

8. **Boguslawsky I.Z.** Generators for independent power plants: performance and trends / [Text] // Archiv fuer Elektrotechnik.— 2006. № 5.— Springer Verlag, Berlin. (rus.)

9. **Kruchinina I.Yu.** Vysokoispolzovannyye elektricheskiye mashiny dlya sovremennoy energetiki: problemy sozdaniya i issledovaniy [Tekst]: Avtoreferat dissertatsii ... dokt. techn nauk. Izdatelstvo Lema, 2013. (rus.)

10. **Titov V.V., Khutoretskiy G.M., Zagorodnaya G.A., Vartanyan G.P., Zaslavskiy D.I., Smotrov I.A.** Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiya [Tekst] / Pod red. N.P. Ivanova, R.A. Lyutera.— L.: Energiya, 1967.— 895 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРСЕНЬЕВ Игорь Александрович — ведущий программист кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

БОГУЛАВСКИЙ Илья Зеликович — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; заслуженный деятель науки и техники РФ; Senior Member of IEEE; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: B-IZ@yandex.ru

ПОПОВ Виктор Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; заслуж. деятель науки и техники РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: em@eef.spbstu.ru

СУХАНОВ Виктор Васильевич — кандадат технических наук доцент кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: V.Suchan@rambler.ru

AUTHORS

ARSENJEV Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

BOGUSLAWSKY Il'ja Z. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: B-IZ@yandex.ru

POPOV Viktor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

SUKHANOV Viktor.V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: V.Suchan@rambler.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.92:627.8.04

А.В. Скрынник

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

A.V. Skrynnik

COMPUTER AIDED DESIGN TECHNOLOGY POWER PLANTS BASED ON RENEWABLE ENERGY

В статье рассмотрены вопросы применения современных компьютерных технологий в области проектирования гидроэлектростанций. Изложены основные тенденции автоматизации проектирования гидроэлектростанций с использованием трехмерного компьютерного моделирования, параметризации, систем виртуальной реальности.

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. САПР. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. СИСТЕМА ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.

In clause deals with the application of modern computer technology in the design of hydro power plants. The article describes the main trends in computer aided designing of hydro power plants using three-dimensional computer modelling, parametrization, virtual reality systems.

HYDRO POWER PLANTS. DESIGN. CAD SYSTEM. THREE-DIMENSIONAL MODEL. PARAMETRIC MODEL. VIRTUAL REALITY SYSTEM.

Энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) являются наиболее важными источниками электроэнергии, обеспечивающими рациональное природопользование, экологическую безопасность и энергоэффективность. Научно обоснованное развитие возобновляемой энергетики невозможно без совершенствования технологий проектирования. Одно из направлений внедрения прогрессивных методов — применение современных компьютерных технологий в процессе проектирования, строительства и эксплуатации объектов на основе ВИЭ.

Эффективное использование компьютерных технологий позволяет сократить количество ошибок на стадии проектирования, снизить сроки подготовки проектной документации, обеспечить совместную работу проектировщиков, строителей и эксплуатирующих организаций и тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемого проекта [1].

Автоматизированная система проектирования (САПР), основанная на современных компьютерных технологиях, должна обеспечивать автоматизацию выполнения как графических, так и расчетных проектных процедур [2].

Предлагаемая автором технология предполагает использование трехмерной модели объекта для проведения технико-экономического анализа, расчета прочностных, гидравлических, энергетических, экономических и прочих характеристик элементов проектируемого объекта, а также создания проектной документации. Важной составляющей современной технологии проектирования является методика автоматизированного создания трехмерной модели энергетической установки [3]. Существенные результаты в разработке САПР ГЭС были достигнуты на кафедре возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики СПбГПУ. В частности методология автоматизированного, в том числе трехмерного, моделирования гидроэнергетических установок была развита на кафедре ВИЭГ под руководством академика РАН Ю.С. Васильева и профессора Л.И. Кубышкина. Под их руководством выполняли научную работу О.С. Морозов

(автоматизация графических процедур), С.В. Светозарская (параметрическое моделирование) и др. В настоящее время на кафедре продолжаются исследования и разработки в области автоматизации проектирования объектов возобновляемой энергетики, ведется работа в рамках научно-образовательных программ.

Автоматизация построения трехмерной модели энергетической установки достигается за счет использования базы данных, включающей параметрические модели оборудования и сооружений установок на основе ВИЭ, и прикладного программного обеспечения для расчета параметров проектируемого объекта, а также систем визуализации [4].

Системы автоматизированного проектирования играют ключевую роль в процессе проектирования ГЭС. Более того, цифровая модель, создаваемая при разработке проекта, в дальнейшем может сопровождать гидроэнергетический объект на стадиях строительства и эксплуатации, в том числе может быть использована при реконструкции сооружений и модернизации оборудования. На рис. 1 представлена блок-схема, укрупненно отображающая основные процессы, выполняемые на этапе проектирования гидроэлектростанции. Данная схема соответствует стадии «Технический проект» и является одним из вариантов организации проектных работ.

Существует множество факторов, влияющих на последовательность выполнения тех или иных операций (загруженность сотрудников другими проектами, бюджет проекта и т. д.), и соответственно блок-схема может выглядеть иначе. Данная блок-схема показывает, насколько значимое место в проектировании ГЭС занимают процессы анализа возможных вариантов конструкции и принятых решений, взаимоувязки оборудования и сооружений гидроузла. Для данных целей могут быть эффективно использованы технологии трехмерного компьютерного моделирования, которые в современных системах автоматизированного проектирования имеют основополагающее значение.

Важное звено САПР — библиотека параметрических моделей оборудования и элементов строительных конструкций. В настоящей работе под параметрическими моделями оборудования или сооружений понимается компьютерная трехмерная модель, в которой при изменении одного или нескольких геометрических размеров (управляющие параметры) происходит автоматическая перестройка всей геометрии по заданным зависимостям.

Модель ГЭС представляет собой составную модель, включающую несколько отдельных деталей — компонентов энергетической установки, расположение которых определяется зависимостями и ограничениями.

Параметрические модели проектируемого объекта создаются в среде AutoDesk Inventor [1] на основе математического обеспечения, разработанного для описания этих моделей. Ниже приведено математическое описание некоторых конструктивных компонентов оборудования и сооружений ГЭС [5].

Рабочее колесо обратимой гидротурбины. В качестве базового параметра, управляющего размерами модели рабочего колеса гидротурбины, был выбран его диаметр D_1, величина которого может быть определена исходя из приведенных ниже зависимостей.

Диаметр рабочего колеса турбины определяется по формуле

$$D_1 = \frac{n'_{I\,\text{опт}}\sqrt{H_\text{р}}}{n}.$$

Здесь $n'_{I\,\text{опт}}$ — приведенная частота вращения турбины при максимальном КПД; $H_\text{р}$ — расчетный напор гидротурбины, соответствующий оптимуму универсальной характеристики турбины; n — нормальная частота вращения гидротурбины, определяемая при помощи выражения

$$n = \frac{n_S H^{3/4}}{3{,}65\sqrt{Q_\text{р}}};$$

где $Q_\text{р}$ — расход воды, соответствующий расчетному напору; n_S — коэффициент быстроходности гидротурбины,

$$n_S = 3{,}65\frac{n\sqrt{Q_\text{р}}}{H_\text{р}^{3/4}} = 3{,}65 n'_{I\,\text{опт}}\sqrt{Q'_{I\,\text{опт}}};$$

$Q'_{I\,\text{опт}}$ — приведенный расход турбины, соответствующий максимальному КПД.

Приведенная частота вращения турбины и расход при максимальном КПД могут быть определены по таблицам систематизированных данных.

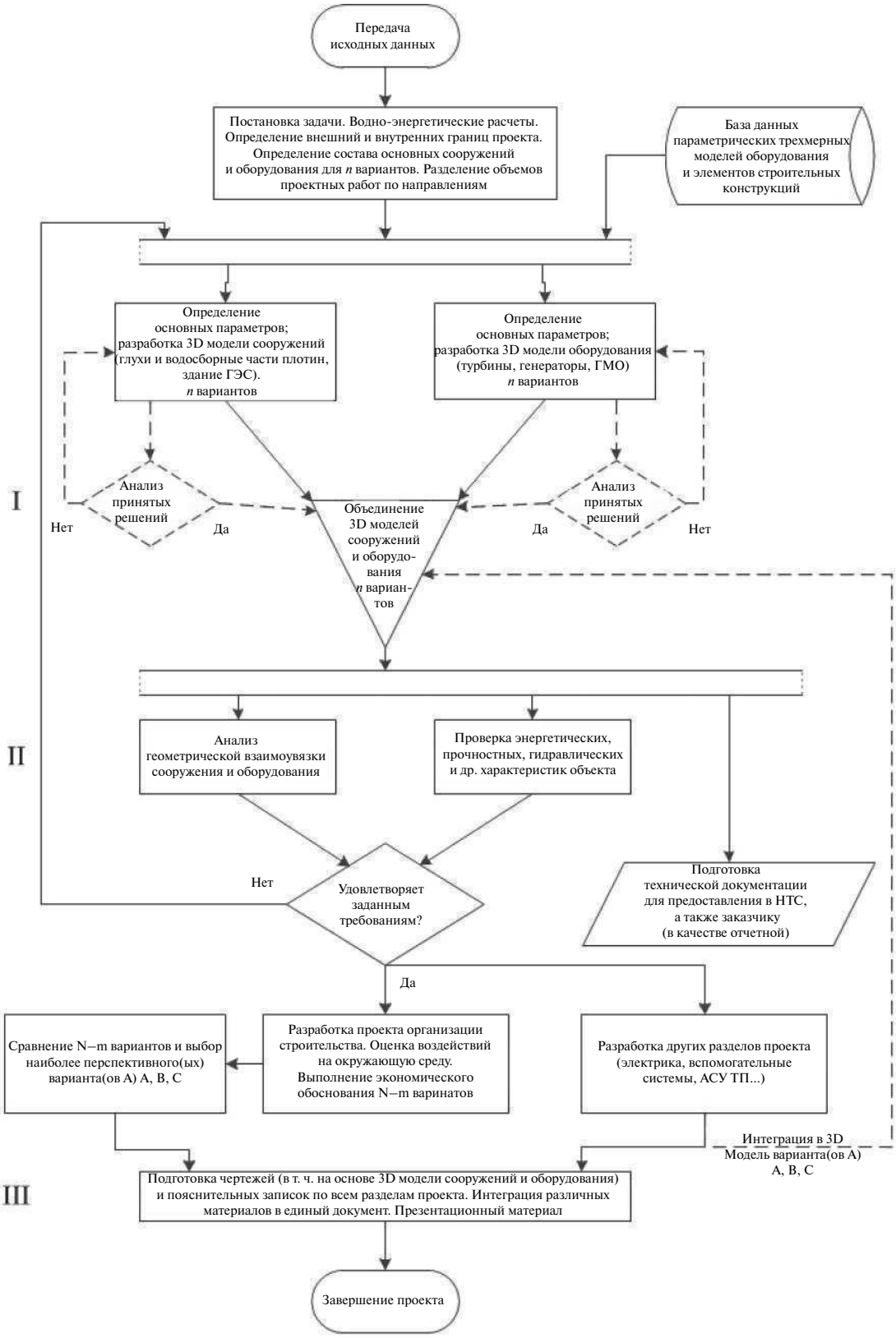


Рис. 1. Основные процессы, выполняемые в ходе проектирования ГЭС

Гидрогенератор. Базовые параметры обратимого гидрогенератора — диаметр его ротора и высота активной стали. Параметры гидрогенератора определяются в соответствии с рекомендациями, представленными в работе. Диаметр ротора гидрогенератора D_i определяется следующим выражением:

$$D_i = \frac{\tau^* 2p}{\pi},$$

где $2p$ — число пар полюсов генератора, зависящее от синхронной частоты вращения; τ^* — длина внешней дуги обода ротора, приходящаяся на один полюс; S^* — удельная нагрузка, приходящаяся на один полюс.

Высота активной стали вычисляется по формуле

$$l_a = \frac{30 C_a S_p}{\pi n_c D_i^2},$$

где C_a — коэффициент машины, зависящий от удельной нагрузки S^*на полюс; S_p — расчетная мощность; n_c — синхронная частота вращения.

Математические зависимости, определяющие остальные размеры гидрогенератора, приведены в таблице.

Подобным образом осуществляется математическое описание других конструктивных элементом: спиральной камеры, отсасывающей трубы, статора турбины, напорных трубопроводов и т. д.

Расчет экономически наивыгоднейшего диаметра трубопровода должен производиться с учетом повышения давления при гидравлическом ударе, величина которого может быть определена по «цепным» уравнениям.

Поскольку средства графического пакета Autodesk Inventor не дают возможности провести расчеты, необходимые для определения диаметра рабочего колеса D_1 и экономически наивыгоднейшего диаметра трубопровода $D_{эк}$, то для этих расчетов были созданы на базе MS Excel специальные программы, связанные с графическим пакетом Autodesk Inventor.

Для расчета диаметра рабочего колеса гидротурбины исходными данными могут быть выбраны такие параметры, как тип, расчетный напор, расчетный расход турбины. При задании исходных данных в автоматическом режиме из таблицы систематизированных данных [6] выбираются соответствующие заданному напору приведенная частота вращения $n'_{I\,опт}$ и приведенный расход турбины при максимальном КПД $Q'_{I\,опт}$. По полученным данным рассчитывается коэффициент быстроходности n_Sи частота вращения гидротурбины n. Далее автоматически выбирается ближайшая синхронная частота вращения и рассчитывается диаметр рабочего колеса турбины D_1.

В результате расчета формируется таблица Excel, содержащая набор основных геометрических размеров будущей трехмерной модели. Данные из этой таблицы экспортируются в систему Autodesk Inventor как управляющие параметры,

Параметры элементов гидрогенератора

Элемент генератора	Параметр	Формула
Статор	Высота корпуса $h_{ст}$, м	$1{,}8l_a$
	Диаметр корпуса $D_{ст}$, м	$(1{,}05+0{,}0017\cdot n_0)\,D_i$
Верхняя крестовина	Высота $h_{вк}$, м	$(0{,}1–0{,}12)\,D_i$
	Диаметр лучей $D_{вк}$, м	$D_{ст}$
Подпятник	Высота $h_{п}$. м	$(0{,}15–0{,}2)\,D_i$
	Диаметр кожуха $D_{п}$, м	$(0{,}4–0{,}5)\,D_i$
Шахта	Диаметр шахты $D_{ш}$, м	$D_i–0{,}5$
Надстройка	Диаметр D_0, м	$(0{,}3–0{,}5)\,D_i$
	Высота h_0, м	(0,3–0,4)м
Кратер	Диаметр $D_{кр}$, м	$(1{,}4–1{,}5)\,D_i$

которые совместно с заданными геометрическими зависимостями служат входными данными для автоматического построения трехмерной компьютерной модели.

Для возможности многократного использования и накопления информационного материала отдельные элементы трехмерной модели целесообразно объединять в единый массив данных [7].

Построение общей трехмерной модели станции осуществляется объединением моделей, включенных в базу данных проекта, ее отдельных элементов. Объединение моделей осуществляется путем наложения зависимостей (ограничений), определяющих местоположение конструктивных компонентов установки. Полученная модель может быть легко преобразована путем изменения состава и типов конструктивных компонентов оборудования и сооружений, редактированием исходных данных и параметров моделей.

Представленная здесь методика автоматизации создания 3D моделей была апробирована на примере Ленинградской ГАЭС, Мокской ГЭС и др. [1]. Для проведения технико-экономического обоснования проектных решений достаточно создать укрупненную модель станции, позволяющую с необходимой степенью точности определить объемы основных строительно-монтажных работ, и на основании полученных данных принять окончательное решение о составе и компоновке проектируемого объекта.

На следующем этапе возможно повышение детализации трехмерной модели. Детализированная модель используется для проведения прочностных расчетов, гидравлических исследований и т. д., составления документации и презентационных материалов. В процессе проведения проектных исследований параллельно с совершенствованием проектируемых сооружений проводится редактирование модели и автоматическое обновление созданных на ее основе документов.

С развитием компьютерных технологий, а также благодаря созданию соответствующих математических алгоритмов появилась возможность решать сложные дифференциальные и интегральные уравнения. В частности, широкое распространение получили метод конечных элементов и метод контрольных объемов [8]. В совокупности с компьютерной графикой развитие данных технологий привело к созданию расчетных комплексов, позволяющих автоматизировать процесс выполнения прочностных, гидродинамических тепломассообменных расчетов и т. д. Большие возможности для проектирования оборудования и ГТС ГЭС представляют современные методы вычислительной гидродинамики [9]. Так, например, моделирование потока в рабочем колесе позволяет определить параметры скорости и давления во всех точках, а значит, установить величину механической энергии на валу, а также возможную кавитацию, потери и КПД рабочего колеса. В последнее время наблюдается устойчивая тенденция вытеснения классических натурных гидравлических испытаний компьютерным моделированием гидравлических процессов, в том числе высокого уровня сложности. Многие гидравлические лаборатории, если не заменили полностью, то, по крайней мере, перенесли значительную часть испытаний (моделирование гидравлических процессов на водосбросных сооружениях, в гидротехнических туннелях, водоводах ГЭС, проточном тракте турбины и рабочем колесе) с физической модели на компьютерную.

Не менее важным этапом построения компьютерной трехмерной модели является визуализация проектных решений. Существует большое множество программных пакетов, позволяющих добиваться высококачественной визуализации трехмерных моделей. Для моделей гидроэнергетических объектов, основной программной средой создания которых являются CAD-системы, общий алгоритм экспорта трехмерных моделей из CAD-систем и последующей их визуализации представлен на рис. 2.

Общая трехмерная модель гидроэнергетического природно-технического комплекса получается путем объединения моделей сооружений и оборудования ГЭС или ГАЭС с моделью рельефа участка строительства станции. Для высокого качества визуализации и придания ей реалистичного вида полученная модель может быть экспортирована в специализированный графический пакет, например AutoDesk 3D MAX. В последующем трехмерная модель может быть адаптирована для визуализации в системах виртуальной реальности. На рис. 3 представлена модели Лен ГАЭС и Мокской ГЭС, отредактированные в системе 3D MAX.

Рис. 2. Алгоритм экспорта трехмерных моделей
из CAD систем для последующей визуализации

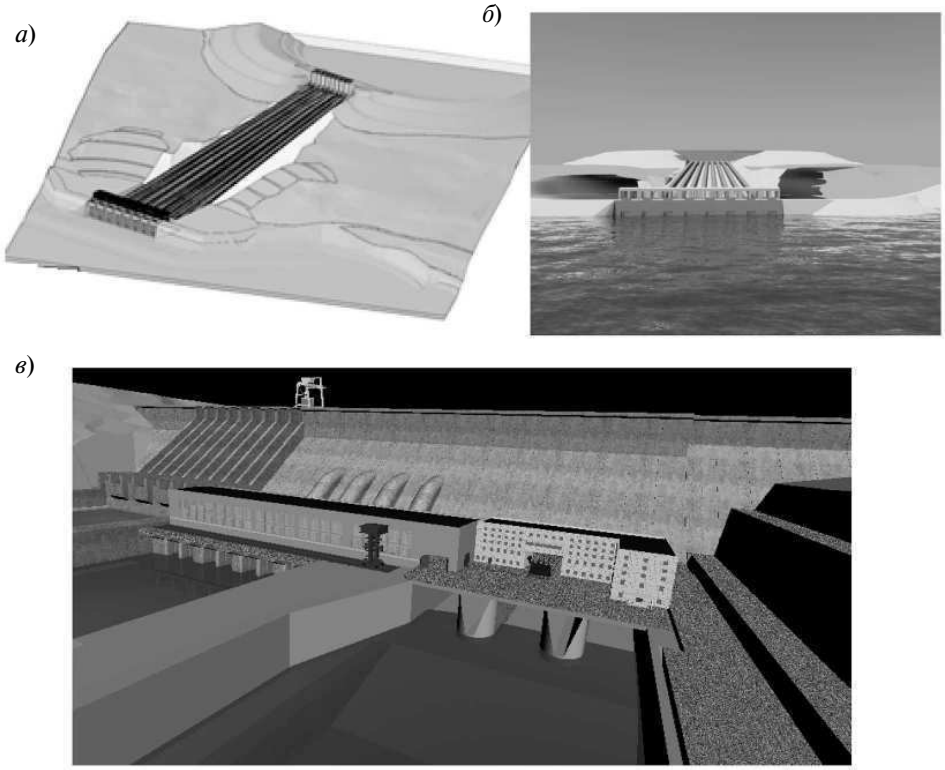


Рис. 3. Трехмерные компьютерные модели Ленинградской
ГАЭС (*а*, *б*) и Мокской ГЭС (*в*)

Программные пакеты, используемые для визуализации модели, создания презентационного материала (иллюстрации и видеоролики), не позволяют работать с готовой моделью в интерактивном режиме. Для придания трехмерной модели интерактивности необходимо преобразовать ее в формат, используемый браузерами систем виртуальной реальности. Виртуальная реальность — мир, создаваемый техническими средствами и передаваемый человеку через его привычные для восприятия материального мира ощущения, интерактивный трехмерный мир, по которому пользователь может перемещаться и выполнять предусмотренные в программе действия [10].

Во время экспорта в формат виртуальной реальности имеется возможность конфигурировать некоторые важные параметры, такие, как экспорт анимации, тип описания геометрических граней, настройка камер и начального вида, начальный способ навигации в трехмерной сцене и другие.

После экспорта модели в формат виртуальной реальности ее можно просматривать в интерактивном режиме с помощью браузера (например Cortona VRML Client, BS Contact VRML/X3D, Octaga Player, Flux Player, Covise OpenCover).

На рис. 4 показано, как отображается 3D модель в системе виртуальной реальности, базирующейся на программном обеспечении Covise Open Cower.

При разработке изделия применение подобной технологии обосновано следующими соображениями:

возможностью в интерактивном режиме изучать и анализировать как общие (компоновка гидроузла), так и частные (узлы, механизмы) конструкторские решения, представленные в реальном пространстве, что дает более эффективное взаимодействие с 3D моделью по сравнению с визуализацией на плоском мониторе;

Рис. 4. Представление 3D модели Мокской ГЭС в виртуальной реальности

возможностью визуализации результатов гидравлических, аэродинамических, тепловых, прочностных расчетов;

созданием высококачественного презентационного материала.

Системы виртуальной реальности позволяют добиваться необходимого качества погружения в окружающую среду и работать с виртуальными мирами с высокой степенью интерактивности.

Результаты данного исследования могут использоваться организациями при проведении проектных и научно-исследовательских работ, для обоснования принимаемых решений, проведения прочностных, гидроэнергетических, сметных и прочих расчетов, моделирования аварийных и чрезвычайных ситуаций, получения проектной документации и составления презентационных материалов.

Статья написана в рамках работы научно образовательного центра ВИЭ (соглашение №14. В37.21.0302/240103201 от 30.07.2012г. между Минобрнауки России и ФГБОУВПО СПбГПУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрынник А.В.** Создание 3D моделей гидроузлов и их представление в системе виртуальной реальности [Текст] / А.В. Скрынник, Л.И. Кубышкин // XXXVII Неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.— С. 64–64.

2. **Васильев, Ю.С.** Разработка чертежей зданий ГЭС методом пространственного компьютерного моделирования [Текст] / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, О.С. Морозов // Гидротехническое строительство.— 1998. № 11.— С. 7–11.— М: Энергопрогресс, 1998.

3. **Васильев, Ю.С.** Компьютерные технологии в научных исследованиях и проектировании объектов

возобновляемой энергетики [Текст]: Учебное пособие / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, И.Г. Кудряшева.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 262 с.

4. **Кубышкин, Л.И.** Моделирование гидроэнергетического оборудования [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская // XXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С.59–60.

5. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. В 2 т. [Текст]: Справочное пособие / Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева.— Т. 1. Основное оборудование гидроэлектростанций.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 400 с.

6. **Кубышкин, Л.И.** Создание библиотеки параметрических моделей гидроэнергетического оборудования [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская // XXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 57–59.

7. **Кубышкин, Л.И.** Параметрическое моделирование объектов возобновляемой энергетики [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2010.— №4 (110).— С. 42–50.

8. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред [Текст] / О. Зенкевич, И. Чанг.— М.: Недра, 1974.— 240 с.

9. **Anderson, J.D.** Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications [Text].— McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1 edition (February 1, 1995).

10. **Малюх, В.Н.** Введение в современные САПР [Текст]: Курс лекций / В.Н. Малюх.— М.: ДМК Пресс, 2010.— 192 с.

REFERENCES

1. **Skrynnik A.V., Kubyshkin L.I.** Sozdanie 3D modelei gidrouzlov i ikh predstavlenie v sisteme virtual'noi real'nosti [Tekst] // XXXVII Nedelia nauki SPbGPU. Mate-rialy Vserossiiskoi mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov.— S-Petersburg: pub-lishing SPU.— 2008. (rus)

2. **Vasil'ev Yu.S., Kubyshkin L.I., Morozov O.S.** Razrabotka chertezhei zdanii GES metodom prostranstvennogo komp'iuternogo modelirovaniia [Tekst] // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo.— 1998. № 11.— Moscow: Energoprogress.— P. 7–11. (rus)

3. **Vasil'ev Yu.S., Kubyshkin L.I. Kudriasheva I.G.** Komp'iuternye tekhnologii v nauchnykh issledovaniiakh i proektirovanii ob»ektov vozobnovliaemoi energetiki [Tekst] // Uchebnoe posobie.— S-Petersburg: publishing SPU, 2008.— 262 p. (rus)

4. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Modelirovanie gidroenergeticheskogo oborudovaniia // XXVIII nedelia nauki SPbGPU: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. I.— S-Petersburg: Publishing SPU, 2009. (rus)

5. Gidroenergeticheskoe i vspomogatel'noe oborudovanie gidroelektrostantsii [Tekst]: Spravochnoe posobie: V 2t. / Pod red. Yu.S. Vasil'eva, D.S. Shchaveleva.— T. 1. Osnov-noe oborudovanie gidroelektrostantsii.— M.: Energoatomi-zdat, 1988.— 400 p. (rus)

6. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Sozdanie biblioteki parametricheskikh modelei gidroenergeticheskogo oborudovaniia [Tekst] // XXVIII nedelia nauki SPbGPU: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. I.— S-Petersburg: Publishing STU, 2009.— P. 57–59. (rus)

7. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Parametricheskoe modelirovanie ob»ektov vozobnovliaemoi energetiki [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №4(110). — S-Petersburg: publishing SPU, 2010.— P. 42–50. (rus)

8. **Zenkevich O., Chang I.** Metod konechnykh elementov v teorii sooruzhenii i mekhanike sploshnykh sred [Tekst].— M.: Nedra, 1974.— 240 p. (rus)

9. **Anderson J.D.** Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications [Text].— McGraw-Hill Science / Engineering / Math; 1 edition (February 1, 1995).

10. **Maliukh, V.N.** Vvedenie v sovremennye SAPR [Tekst]: Kurs lektsii.— Moscow: DMK Press, 2010.— 192 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

СКРЫННИК Антон Владимирович — аспирант кафедры водохозяйственного и гидроэнергетического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: av.sknk@gmail.com

SKRYNNIK Anton V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: av.sknk@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.165 001.2

К.Л. Лапшин

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

K.L. Lapshin

GAS-DYNAMIC CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF REGULATORY STAGE STEAM TURBINE

Рассмотрены особенности формирования математических моделей и компьютерных программ, предназначенных для газодинамического расчета характеристик регулирующей ступени паровой турбины. Представлены основные результаты проверочных расчетов регулирующей ступени теплофикационной паровой турбины в широком диапазоне режимов.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. РЕГУЛИРУЮЩАЯ СТУПЕНЬ.

Considered are the peculiarities of creation of mathematical models and computer programs intended for gas-dynamic calculation of characteristics of the stage steam turbine. Main results of test calculations regulatory stage steam turbine in a wide range of modes.

STEAM TURBINE. REGULATORY STAGE.

Современные мощные паровые турбины тепловых электрических станций с сопловым парораспределением обычно в качестве первых имеют регулирующие ступени, работающие в широком диапазоне режимов с переменными параметрами пара за счет его дросселирования в клапанах на входе в сегменты сопел и с переменной степенью парциальности. На этапе проектирования турбины важно иметь возможность выполнить газодинамический расчет характеристик регулирующей ступени в заданном диапазоне режимов.

В последнее время бурное развитие получили трехмерные (3D) методики для расчета потока пара в проточных частях паровых турбин, использующие систему уравнений газовой динамики в форме Навье — Стокса. На основе этих методик можно даже создавать виртуальные стенды для исследования характеристик турбин. Уместно, однако, отметить, что 3D методики пока недостаточно применяются для расчета характеристик парциальных регулирующих ступеней; в основном это связано с необходимостью решать нестационарную задачу, сложностью создания расчетной сетки и трудностями корректной постановкой граничных условий. Кроме того, такие расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и больших затрат машинного времени, т. е., по существу, являются штучными. Поэтому до сих пор не потеряли своего значения для инженерной практики традиционные одномерные проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени паровой турбины.

Инженерные одномерные проверочные газодинамические расчеты регулирующей ступени в контрольных сечениях перед и за лопаточными венцами, предназначенные для определения ее характеристик в широком диапазоне режимных параметров, также представляют собой сложную вычислительную задачу. Существенные сверхзвуковые скорости за направляющими лопатками (НЛ) при пропуске пара через один или два клапана и значительные градиенты параметров пара во всей области течения при переменной парциальности осложняют построение устойчивого вычислительного алгоритма, обеспечивающего стабильный процесс сходимости последовательных приближений в расчетных сечениях.

В этой связи целесообразно построить проверочный газодинамический расчет парциальной регулирующей ступени «с хвоста», т. е. от

выходного сечения к входному, против направления движения пара, и применить оригинальные способы достижения сходимости итерационных процессов. В одномерном проверочном расчете используется система уравнений и математическая модель потерь кинетической энергии, изложенные в работах [1, 2]. В монографии [1] представлены результаты экспериментальных исследований профильных потерь в широком диапазоне углов атаки, вторичных потерь, концевых потерь у периферии необандаженных рабочих лопаток, потерь от протечек у корня перед НЛ, через уплотнение диафрагмы и над бандажом РЛ для турбинных ступеней как обычного типа, так и со сниженным градиентом степени реактивности. На основе этих исследований, выполненных в натурных или в близких к натурным условиях и учитывающих эффекты от неравномерности, нестационарности и турбулентности набегающего на лопаточные венцы потока, сделаны полуэмпирические и эмпирические обобщения, которые составляют основу универсальной методики расчета потерь в проточной части паровой турбины. На основе этой методики разработаны алгоритмы и программы расчета характеристик парциальных ступеней паровых турбин в одномерной постановке задачи. При этом потери, обусловленные наличием парциального подвода пара, вычислялись по методике МЭИ [3]. При формировании математической модели учитывались также результаты экспериментальных исследований парциальных турбинных ступеней, выполненных в БИТМ [4]. В этих опытах было установлено, что при уменьшении степени парциальности уменьшается степень реактивности на активном участке подвода пара. Свойства водяного пара определялись по методике ВТИ.

Для выполнения проверочных газодинамических расчетов регулирующей парциальной ступени паровой турбины в контрольных сечениях перед и за лопаточными венцами в широком диапазоне режимных параметров автором были разработаны математические модели, алгоритмы и программы в среде ТУРБО ПАСКАЛЬ для персонального компьютера.

Программа PARZ1 предназначена для выполнения одномерного проверочного газодинамического расчета регулирующей ступени паровой турбины при условии полного открытия одного или нескольких регулирующих клапанов при заданных начальных параметрах пара (давление и температура торможения) перед соплами и противодавлении за ступенью. Массовый расход пара через регулирующую ступень определяется в результате расчета.

Программа PARZ2 служит для определения массового расхода пара, протекающего через сегмент сопел с дросселированием пара (или без него) в клапане, при заданных начальных параметрах пара (давлении и температуре торможения) перед соплами и противодавлении за ступенью.

Программа PARZ3 определяет давление торможения пара перед соплами при заданных значениях энтальпии торможения перед соплами, противодавления за ступенью и массового расхода пара.

Комбинация этих программ открывает возможность проверочного газодинамического расчета регулирующей ступени паровой турбины в широком диапазоне режимных параметров.

В качестве объекта расчетных исследований была принята одновенечная регулирующая ступень теплофикационной паровой турбины средней мощности.

На этапе 1 проводились проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени при полностью открытых одном, двух, трех и четырех клапанах. Для этой цели привлекалась программа PARZ1. Для получения дроссельных характеристик давление и температура торможения перед соплами на всех режимах поддерживались постоянными, а давление в потоке за регулирующей ступенью варьировалось.

Основные результаты расчетов иллюстрируют зависимости массового расхода пара G перед соплами и внутреннего КПД η регулирующей ступени от противодавления p_2 за ступенью (рис. 1).

На рисунке видно, что для всех рассмотренных режимов работы регулирующей ступени точки, соответствующие уровню внутреннего КПД η, удовлетворительно располагаются на одной кривой.

На этапе 2 выполнялись проверочные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени при дросселировании пара в клапанах. Для этой цели привлекались программы PARZ2 и PARZ3.

Практически последовательность расчетов характеристик регулирующей ступени осуществлялась следующим образом. Сначала по программе PARZ2 выполнялся расчет потока пара от клапана 1. Затем, если работают два клапана, то для расчета потока пара от клапана 2 привлекалась программа PARZ3. Если включены три клапана, то для расчета потоков пара от клапанов *1* и *2* использовалась программа PARZ2, а для расчета потока пара от клапана *3* — программа PARZ3. И, наконец, если включены четыре клапана, то для расчета потоков пара от клапанов *1*, *2* и *3* привлекалась программа PARZ2, а для расчета потока пара от клапана *4* — программа PARZ3.

Для определения осредненных показателей регулирующей ступени на переменных режимах с дросселированием применялась программа PARZSUM. Программа PARZSUM предназначена для осреднения потоков пара, когда одна или несколько групп сопл открыты полностью, а перед одной или несколькими группами сопл пар дросселируется, или когда перед всеми включенными группами сопл пар дросселируется. Для вычисления параметров осредненного потока используется система уравнений сохранения массы, импульса и энергии при условии полного смешения потоков пара за ступенью.

Основные результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2. На нем выделены режимы, начиная с которых в расчетах

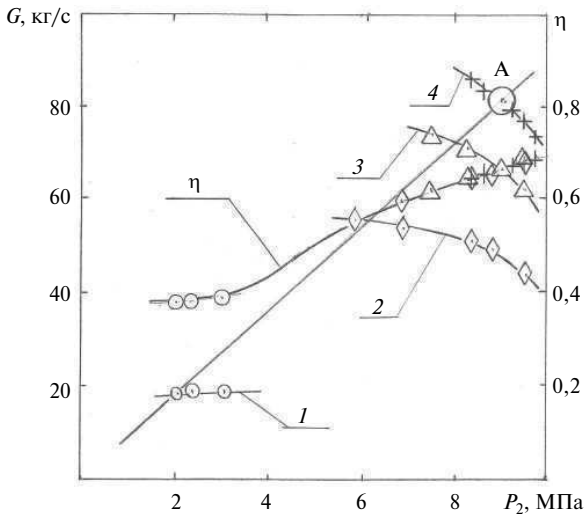


Рис. 1. Дроссельные характеристики регулирующей ступени при разном числе полностью открытых клапанов:
× — 4 клапана; Δ — 3 клапана; ◊ — 2 клапана;
○ — 1 клапан; А — номинальный режим

учитывалось открытие следующего клапана: второго, третьего и четвертого. Естественно, что после открытия клапана внутренний КПД η регулирующей ступени уменьшается, в основном из-за значительного дросселирования пара в открывающемся клапане. При полностью открытых двух, трех и четырех клапанах внутренние КПД практически совпадают с уровнем КПД на режимах с дросселированием (см. рис. 1), хотя и вычислены различными

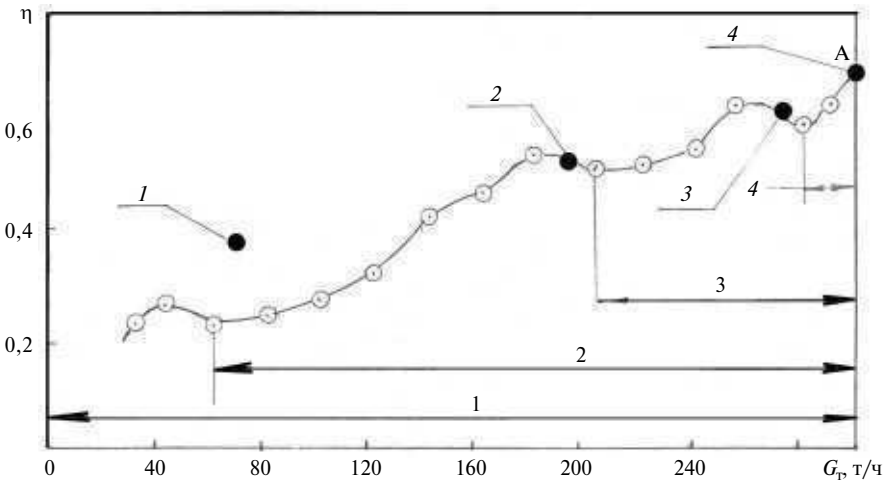


Рис. 2. Зависимость внутреннего КПД η регулирующей ступени от расхода пара $G_т$ на турбину:
○ — режимы с дросселированием, ● — клапаны полностью открыты

способами. Полностью открытый клапан *1* развивает более высокий КПД, чем клапаны *1* и *2* при совместной работе со значительным дросселированием. Зато при полностью открытом клапане *1* изгибные напряжения в рабочих лопатках регулирующей ступени достигают максимальных значений.

Выполненные детальные газодинамические расчеты характеристик регулирующей ступени на переменных режимах позволили получить неочевидные результаты. Так, например, в диапазоне массовых расходов пара $G_т = 140–180$ т/ч число Маха за сопловыми лопатками сегмента сопел клапана *2* изменяется в диапазоне $M_{c_1} = 1{,}4–1{,}5$, а термодинамическая степень реактивности на этом сегменте приобретает глубоко отрицательные значения $\rho_T = -(0{,}5–0{,}6)$. Последнее обстоятельство приводит к тому, что давление p_1 перед рабочими лопатками оказывается существенно ниже, чем давление p_2 за ними, что полезно учитывать при расчете осевых усилий, действующих на ротор турбины на режимах дросселирования.

Анализируя результаты проверочных газодинамических расчетов регулирующей ступени в широком диапазоне режимных параметров, можно сделать следующие выводы:

Внутренний КПД η регулирующей ступени на номинальном режиме, вычисленный двумя различными способами (первый — программой PARZ1 при полностью открытых четырех клапанах, второй — программами PARZ2 и PARZ3 по каждому из клапанов по отдельности с последующим осреднением программой PARZSUM) практически одинаков (см. рис. 1 и 2). Этот расчетный факт указывает на корректность и эффективность методики, развитой для определения характеристик регулирующей ступени паровой турбины в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Наибольшие изгибные напряжения в рабочих лопатках регулирующей ступени, как и следовало ожидать, будут возникать на режимах работы с одним и двумя открытыми клапанами.

На режимах расхода пара на турбину от 140 до 180 т/ч на секторе подвода пара от второго клапана давление p_1 перед рабочими лопатками существенно ниже, чем давление p_2 за ними. Это обстоятельство следует учитывать при оценке осевых усилий, действующих в этих режимах на ротор турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Лапшин, К.Л.** К расчету осевых тепловых турбин на переменных режимах [Текст] / К.Л. Лапшин, В. Рисс // Теплоэнергетика.— 1992. №5.—С. 64–66.

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

4. **Гоголев, И.Г.** Аэродинамические факторы и надежность турбомашин [Текст]: Монография / И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов, А.Е. Зарянкин.— Брянск, 1993.— 168 с.

REFERENCES

1. **Lapshin K.L.** Optimization of flowing parts of steam and gas turbines [Text]: Monograph / Kirill L. Lapshin.— SPb., 2011.— 177 s. (rus.)

2. **Lapshin K.L., Riss W.** To the Calculation of the axial thermal turbine at variable modes [Text // Teploenergetika.— 1992. №5.— S. 64–66. (rus.)

3. **Sheglaev A.W.** Steam turbines [Text]: Monograph.— 1976.— 368 s. (rus.)

4. **Gogolev I.G., Drokonov A/M., Zarjankin A.E.** Aerodynamic factors and reliability of turbo machines [Text]: Monograph.— Brjansk, 1993.— 168 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЛАПШИН Кирилл Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kirill.lapschin@gmail.com

LAPSHIN Kirill L. — St.Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str,29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kirill.lapschin@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.372.001

М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов

КАРТИНЫ АНОМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ДВУХСТЕРЖНЕВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

M.A. Shakirov, U.V. Varlamov

PICTURES ANOMALOUS MAGNETIC FLUXES AT SHORT-CIRCUIT OF THE TRANSFORMER WITH TWO RODS

Изложена методология построения картин магнитных полей в стали и окне двухстержневых трансформаторов в режимах короткого замыкания с использованием пакета отечественной программы *ELCUT*. Представлены оригинальные картины магнитных полей, подтверждающие явления возникновения сверх- и антипотоков в этих трансформаторах.

ТРАНСФОРМАТОР. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯРМО. ОБМОТКА. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

The methodology of constructing of the magnetic fields in a steel box and window of 2-rod transformers in the short-circuit mode using the software package ELCUT is proposed. Presents the original paintings of magnetic fields, confirming the phenomenon of super-and reverse fluxes in that transformers.

TRANSFORMER. MAGNETIC CURRENT. YOKE. WINDING. SHORT CIRCUIT. FINITE ELEMENT METHOD

Трансформаторы — важнейшие элементы линий электропередач. Поэтому совершенствованию их конструкций и свойств всегда уделялось пристальное внимание. В последнее время выяснилось, что, несмотря на более чем столетнюю историю, теория трансформаторов нуждается в существенном пересмотре вплоть до уточнения принципа их действия [1]. Толчком к этому послужило установление факта возникновения в стержне и боковом ярме короткозамкнутого броневого трансформатора *сверх-* и *антипотоков*. Сверхпотоком в данной части трансформатора называется поток в ней при коротком замыкании (КЗ) трансформатора, если он выше, чем поток при холостом ходе (ХХ), а под антипотоком — этот поток при КЗ, если он оказывается направленным встречно потоку при ХХ (при одном и том же напряжении на зажимах трансформатора в обоих режимах, т. е. в режимах ХХ и КЗ). Строгое теоретическое обоснование этим явлениям и вывод новых схем замещения броневого трансформатора, способных учитывать сверх- и антипотоки при КЗ, приведены в [2]. Возникновение сверх- и антипотоков в броневых трансформаторах было подтверждено экспериментально на базе магнитных систем трансформаторов типа ОСМ-1МУ3 [3], а также численными расчетами и построениями картин осесимметричных магнитных полей методами конечных элементов (МКЭ) для трансформаторов с *цилиндрическими* боковыми ярмами (аналогичными конструкции ярма в трансформаторах известной фирмы «Brown Bovery Company») [4]. Эта же конструкция была положена в основу всех аналитических соотношений теории [2], границы применимости которой, строго говоря, ограничены указанным видом геометрии ярма однофазных броневых трансформаторов.

Вместе с тем из общих физических соображений вытекает, что сверх- и антипотоки должны возникать при КЗ в силовых трансформаторах любой другой конструкции, в том числе

в весьма распространенном типе — однофазных *двухстержневых* трансформаторах. Цель статьи — подтвердить существование этих потоков в короткозамкнутом двухстержневом трансформаторе путем численного расчета его магнитных полей с помощью МЭК. Исследуется магнитное поле прототипа реального трансформатора, созданного на кафедре ТОЭ СПбГПУ, который позволяет экспериментально наблюдать эти явления с помощью измерительных витков в установившихся режимах КЗ. Термин *прототип* подразумевает, что задача расчета поля рассматривается в упрощенной плоскопараллельной постановке для *идеализированного* двухстержневого трансформатора при пренебрежении потерями в стали и активными сопротивлениями обмоток.

Описание лабораторной установки, моделирующей силовой двухстержневой трансформатор

Использовалась описанная в [3] магнитная система с О-образным раздвижным железным сердечником (рис. 1, *а*), на левую и правую части которого намотано по 6 цилиндрических катушек из медного провода толщиной $\Delta = 2{,}5$ мм (рис. 1, *б*).

Каждая из катушек — (A_1, A_2), (B_1, B_2), ..., (a_1, a_2), (b_1, b_2), ... — образует слой с числом витков, равным 55. Слои обмоток вплотную прилегают друг к другу. Поэтому за толщину слоя принимается диаметр провода $\Delta = 25$ мм. Сопротивление слоя постоянному току $R_\Delta = 0{,}1$ Ом. При значении воздушного зазора $\delta_{заз} = 0$ (рис. 1, *б*) высота окна — $h_{окн} = 175$ мм, а его ширина — $\Lambda = 49$ мм. Высота обмотки катушек — $h_{об} = 0{,}874 h_{окн} = 153$ мм. Длина пути по средней линии железа равна 0,76 м, а поперечное сечение сердечника квадратного сечения — $S_{Fe} = 5 \times 5{,}7 = 28$, см^2. Допустимый ток в обмотках равен 10 А. Установка позволяет моделировать двухстержневые трансформаторы с различными числами витков *внутренней* и *внешней* (наружной) обмоток.

Пример такого трансформатора, рассматриваемого в первой части статьи, показан на рис. 2. В нем, в отличие от макета (рис. 1, *б*), высота обмоток принята равной высоте окна ($h_{об} = h_{окн}$). Во второй части рассматриваются поля трансформатора с укороченными обмотками ($h_{об} < h_{окн}$). Внутренняя обмотка каждого стержня содержит по три катушки, последовательно подключенные друг к другу с помощью соединительных проводников, расположенных за пределами обмоток; ее ширина равна $a = 3 \times 2{,}5 = 7{,}5$ мм. Внешняя обмотка стержня также содержит по три последовательно соединенные катушки; ее ширина $b = 3 \times 2{,}5 = 7{,}5$ мм. Таким образом, рассматривается трансформатор с одинаковыми внутренней и внешней обмотками. Каждая обмотка содержит $w_1 = w_2 = 2 \times (3 \times 55) = 330$ витков. Коэффициент трансформации $n = w_1 / w_2 = 1$. Зазор между внутренней и внешней обмотками равен $\delta = 2{,}5$ мм. Расстояние между внешними обмотками левого и правого стержней равно 4 мм. Зазоры между сердечником и внутренними обмотками равны с одной стороны 10 мм, а с другой — 5 мм. На рис. 2 показаны также

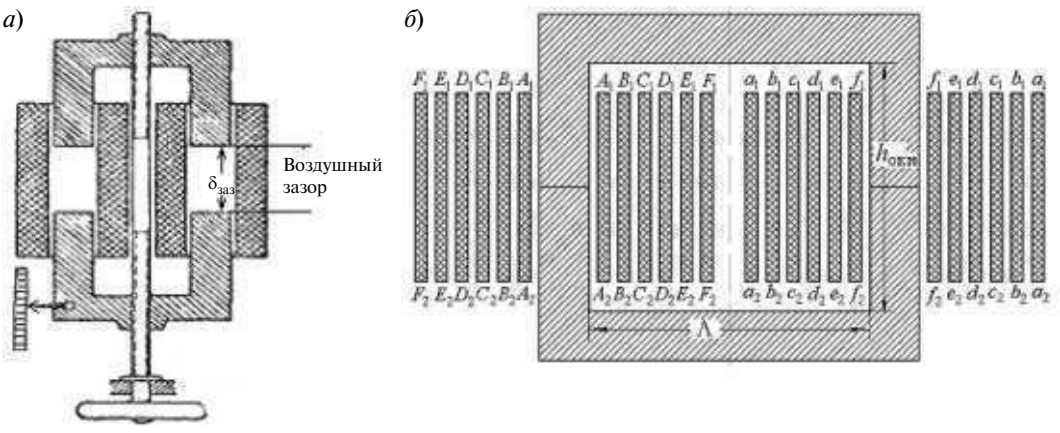


Рис. 1. Макет двухстержневого трансформатора (*а*) и послойная геометрия его обмоток (*б*)

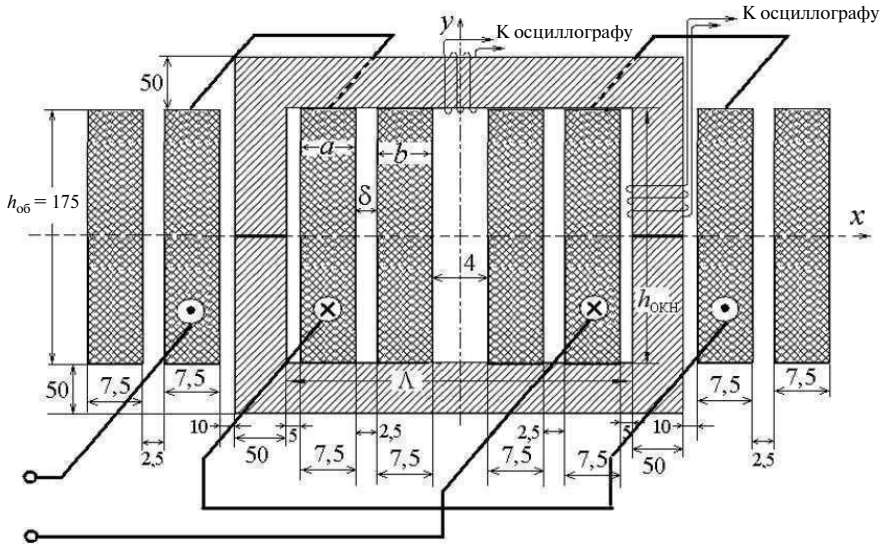


Рис. 2. Двухстержневой трансформатор при высоте обмоток, равной высоте окна ($h_{об} = h_{окн}$)

измерительные витки, подсоединяемые к осциллографу; они позволяют контролировать изменения магнитных потоков в различных частях стали трансформатора.

Результаты экспериментальных исследований

В отличие от броневого, двухстержневой трансформатор не имеет бокового ярма. Поэтому режимы КЗ в них выглядят по-разному. Согласно [2], если в одной части магнитопровода броневого трансформатора при КЗ наблюдается сверхпоток, то в другой его части одновременно должен возникать антипоток, что и было экспериментально подтверждено в [3]. Вопрос о возможности экспериментального наблюдения одновременно сверх- и антипотока в двухстержневом трансформаторе при КЗ до последнего времени оставался открытым. Следует также иметь в виду, что применение полученных для броневого трансформатора [2] формул для *коэффициентов магнитного состояния* (КМС) в средней части стержней двухстержневых трансформаторов в виде

$$\dot{k}_{ст}^{КЗ\ внеш} = \left.\frac{\dot{\Phi}_{ст}^{КЗ\ внеш}}{\dot{\Phi}_0}\right|_{\dot{U}_{внут}^{XX}=\dot{U}_{внут}^{КЗ\ внеш}} \approx$$

$$\approx 1+\frac{a}{2a+6\delta+2b}; \qquad (1)$$

$$\dot{k}_{ст}^{КЗ\ внут} = \left.\frac{\dot{\Phi}_{ст}^{КЗ\ внут}}{\dot{\Phi}_0}\right|_{\dot{U}_{внеш}^{XX}=\dot{U}_{внеш}^{КЗ\ внут}} \approx$$

$$\approx -\frac{b}{2a+6\delta+2b} \qquad (2)$$

требует оговорок, поскольку в них, в частности, не учитывается влияние конечной длины двухстержневого трансформатора в направлении оси *z*. Здесь в выражениях (1), (2) и далее верхние индексы «КЗ внеш» и «КЗ внут» указывают, какая из обмоток — *внешняя* или *внутренняя* — находится в закороченном состоянии; Φ_0 — поток ХХ при том же напряжении U^{XX}, при котором рассматривается режим КЗ трансформатора ($U^{КЗ}$). Подставив в (1) и (2) значения a, b, δ, приведенные на рис. 2, получаем для *плоскопараллельного* трансформатора

$$k_{ст}^{КЗ\ внеш} \approx 1+\frac{7,5}{2\cdot 7,5+6\cdot 2,5+2\cdot 7,5}=1,17; \qquad (3)$$

$$k_{ст}^{КЗ\ внут} \approx -\frac{7,5}{2\cdot 7,5+6\cdot 2,5+2\cdot 7,5}=-0,17. \qquad (4)$$

В экспериментах с описанным выше реальным трансформатором (конечной длины и $h_{об} < h_{окн}$) с помощью измерительных витков были обнаружены существенно большие значения КМС стержней по сравнению с (3) и (4):

$$k_{ст}^{КЗ\ внеш} = 1,5; \qquad (5)$$

$$k_{ст}^{КЗ\ внут} = -0,52, \qquad (6)$$

что в рамках настоящей работы объяснить не удалось. Эксперименты проводились на частоте

f=1000 Гц, чтобы обеспечить известное условие $2\pi f L_{\text{КЗ}} >> R_{\text{обм}}$, характерное для силовых трансформаторов. Практически такие же значения КМС для стержней получены в экспериментах и на частотах 500 Гц и 300 Гц.

Постановка задачи численного анализа магнитного поля идеализированного двухстержневого трансформатора

Картина поля в трансформаторе имеет смысл лишь для случаев, когда индукции в любом его месте совпадают по фазе (или находятся в противофазе). Теоретически это условие соблюдается в режимах КЗ, а также при чисто L- или C-нагрузках идеализированного трансформатора, при сопротивлениях обмоток

$$R_1 = R_2 = 0 \qquad (7)$$

и пренебрежении потерями в стали магнитопровода. В этих случаях при магнитной проницаемости стали $\mu = \text{const}$ картина поля будет по виду одинаковой в любой момент времени, отличаясь лишь интенсивностью для конкретного момента времени. В данной работе, как и в [4], картина поля строится для действующих значений токов обмоток и все расчеты ведутся относительно действующих значений потоков и индукций. Конечное значение μ позволяет наблюдать распределение магнитного поля в стали. Варьируя значения μ в различных частях магнитопровода, можно косвенно оценить влияние насыщения на изменение картины магнитного поля в трансформаторе.

Необходимость численного анализа полей в данной работе обусловлена, во-первых, тем, что требуется определить условия одновременного появления сверх- и антипотоков в двухстержневых трансформаторах, а также выявить участки их дислокации в магнитопроводе с целью организации соответствующих экспериментов; во-вторых, стремлением оценить в режимах КЗ магнитные потоки в различных частях трансформатора, недоступных для наблюдений в экспериментах; в третьих, задачей оценки точности соотношений (1), (2), что весьма важно для создания корректной теории двухстержневых трансформаторов.

Для построения поля в режиме КЗ с помощью известной программы *ELCUT* необходимо задать токи КЗ $I_1^{\text{КЗ}}$ и $I_2^{\text{КЗ}}$ соответственно во внутренней и внешней обмотках. Связь между этими токами устанавливается через собственные (L_1, L_2) и взаимную (M) индуктивности обмоток, которые также определяются с помощью программы *ELCUT*. Тем самым исключается предвзятая информация об индуктивности КЗ $L_{\text{КЗ}}$, ибо она рассчитывается не по приближенным формулам из учебников, а в результате предварительного анализа соответствующих магнитных полей на основе МКЭ.

Примечание 1. Используются небольшие значения относительной магнитной проницаемости стали μ_r (2000, 1000, 100 и т. д.), при которых весьма точно оцениваются значения L_1, L_2 и M в пределах возможностей разбиения областей на конечные элементы, допустимых программой *ELCUT*. При большем μ_r может потребоваться задание более мелкого шага сетки МКЭ, который для программы *ELCUT* может оказаться критическим с точки зрения точности расчетов полей. В данной работе все расчеты выполнены при шаге сетки, равном 0,2 мм.

Часть 1. Идеализированный трансформатор с высотой обмоток, равной высоте его окна

Поскольку поля в двухстержневых трансформаторах обладают как продольной, так и поперечной *антисимметрией*, то далее они будут рассматриваться в пределах сектора второго квадранта прямоугольной системы координат, ограниченного положительной осью y и отрицательной осью x (см. рис. 2). Третьей границей области служит бак трансформатора, играющий роль *идеального электромагнитного экрана* (рис. 3). На этой границе векторный потенциал поля принимается равным нулю. На осях x и y граничное условие задается относительно касательной составляющей напряженности магнитного поля, которая принимается равной нулю ($H_\tau = 0$).

Наиболее просто строится картина поля для режима ХХ: в дополнение к указанным граничным условиям достаточно задаться током в одной из обмоток, равным, например, 1А, и внести в программу значение его плотности в этой обмотке. На рис. 3, *а* построена картина поля при ХХ внешней обмотки, что потребовало задания тока внутренней обмотки $I_1 = 1$ А. На этой картине демонстрируются положительные направления магнитных потоков при ХХ в различных частях трансформатора, с которыми далее сравниваются направления потоков в режимах КЗ.

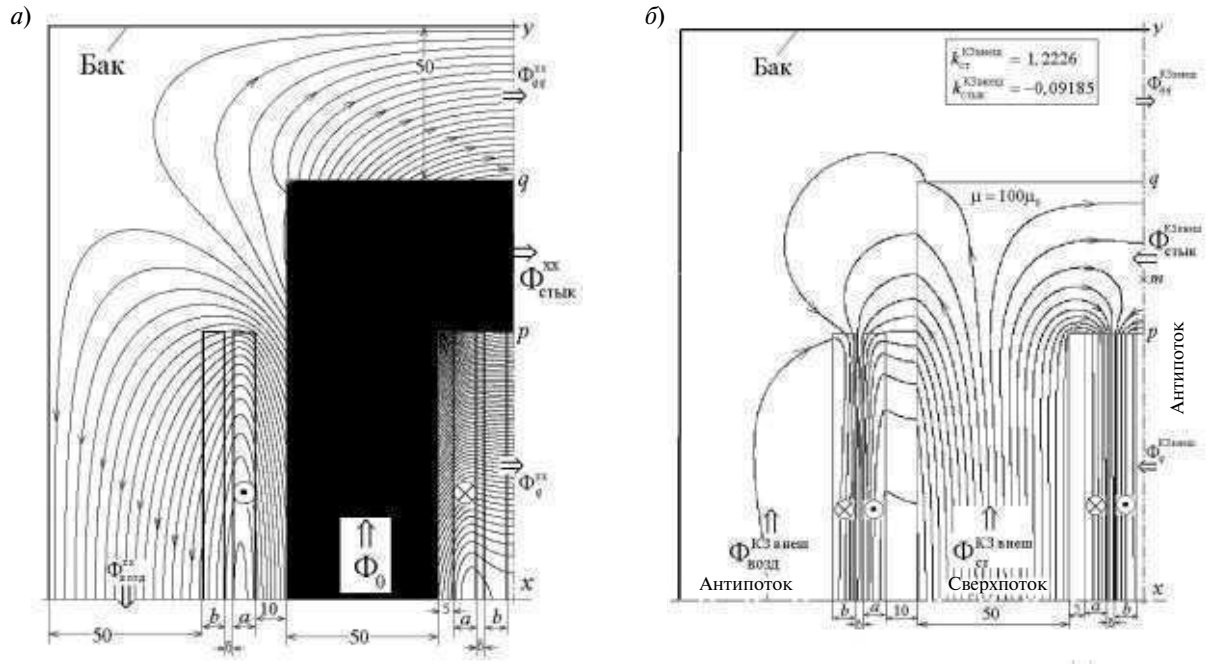


Рис. 3. Магнитное поле двухстержневого трансформатора в режиме *XX* (*а*) и короткого замыкания внешней обмотки (*б*) при $h_{об} = h_{окн}$

Для построения полей в файл исходных данных программы *ELCUT* заносятся: плоскопараллельная геометрия магнитопровода и обмоток; граничные условия; значения относительной магнитной проницаемости магнитопровода μ_r; плотности токов J_1 и J_2 соответственно внутренней и внешней обмоток.

Определение собственной индуктивности внутренней обмотки L_1 по МКЭ. В основе численного определения собственной индуктивности L_1 лежит энергетическое соотношение для внутренней обмотки с током I_1:

$$\frac{L_1 I_1^2}{2} = W_1, \qquad (8)$$

откуда получаем

$$L_1 = 2\frac{W_1}{I_1^2} \Rightarrow 2W_1. \qquad (9)$$

Задавшись токами обмоток $I_1 = 1$ А, $I_2 = 0$ А и введя в программу *ELCUT* соответствующие плотности токов обмоток

$$J_1 = \frac{(w_1/2)I_1}{a h_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0{,}0075 \cdot 0{,}175} = 125714 \text{ А/м}^2, \qquad (10)$$

$$J_2 = 0, \qquad (11)$$

находим энергию магнитного поля W_1. Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном при $\mu = 100\mu_0$, $h_{об} = h_{окн}$ получено $W_1 = 0{,}61804$ Дж. Следовательно $L_1 = 2W_1 = 2 \times 0{,}61804 = 1{,}23608$ Гн.

Определение собственной индуктивности внешней обмотки L_2 по МКЭ. Задаемся токами обмоток $I_1 = 0$, $I_2 = 1$ А и вводим в программу плотности токов

$$J_1 = 0; \qquad (12)$$

$$J_2 = \frac{(w_2/2)I_2}{b h_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0{,}0075 \cdot 0{,}175} = 125714 \text{ А/м}^2. \qquad (13)$$

Получив энергию магнитного поля W_2, находим

$$L_2 = 2\frac{W_2}{I_2^2} \Rightarrow 2W_2. \qquad (14)$$

Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном при $\mu = 100\mu_0$ и $h_{об} = h_{окн}$ получено $W_2 = 0{,}62028$ Дж. Следовательно, $L_2 = 2W_2 = 2 \cdot 0{,}62028 = 1{,}24056$ Гн.

Определение взаимной индуктивности *M* между обмотками по МКЭ. Задаемся ненулевыми значениями токов в обеих обмотках: $I_1 = 1$ А,

$I_2 = 1$ А. Вводим в программу соответствующие плотности токов:

$$J_1 = \frac{(w_1/2)I_1}{ah_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0{,}0075 \cdot 0{,}175} = 125714 \text{ А/м}^2, \quad (15)$$

$$J_2 = \frac{(w_2/2)I_2}{bh_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0{,}0075 \cdot 0{,}175} = 125714 \text{ А/м}^2. \quad (16)$$

Программа позволяет найти энергию магнитного поля W, которая, с другой стороны, может быть представлена в виде

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} - MI_1 I_2 + \frac{L_2 I_2^2}{2}. \quad (17)$$

В нашем случае (при $I_1 = 1$ А и $I_2 = 1$ А)

$$W \Rightarrow \frac{L_1}{2} - M + \frac{L_2}{2} \Rightarrow W_1 - M + W_2, \quad (18)$$

где W_1, W_2 — величины, найденные на 1-м и 2-м этапах. Из (18) следует расчетное соотношение

$$M = W_1 + W_2 - W. \quad (19)$$

Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном и $\mu = 100\mu_0$ получено $W = 0{,}002837$ Дж. Следовательно,

$$M = 0{,}61804 + 0{,}62028 - 0{,}002837 = 1{,}235483 \text{ Гн}.$$

Формулы всех трех этапов и результаты расчетов по программе *ELCUT* для различных значений $\mu = \mu_r\mu_0$ магнитопровода представлены в табл.1.

Здесь же представлены индуктивности КЗ при питании трансформатора как со стороны внутренней обмотки ($L_{кз}^{КЗ внеш}$), так и со стороны внешней обмотки ($L_{кз}^{КЗ внут}$).

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внешней обмотки. При численном расчете магнитных полей обычно необходимо задать токи. В нашем случае удобно задаться током $I_1^{КЗ внеш}$, например $I_1^{КЗ внеш} = 1$А. Тогда для тока в короткозамкнутой внешней обмотке имеем

$$I_2^{КЗ внеш} = -\frac{M}{L_2} I_1^{КЗ внеш}. \quad (20)$$

Задание тока $I_1^{КЗ внеш}$ адекватно заданию следующего напряжения на зажимах внутренней обмотки идеализированного трансформатора:

$$U_{внут}^{КЗ\ внеш} = \omega L_{КЗ}^{КЗ внеш} I_1^{КЗ внеш}, \quad (21)$$

где

$$L_{кз}^{КЗ\ внеш} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}. \quad (22)$$

Но при этом же напряжении должен рассматриваться и режим ХХ и определяться поток ХХ — Φ_0, входящий в выражения КМС (1). Отсюда

$$\Phi_0 = \frac{U_{внут}^{XX}}{\omega w_1} = \frac{U_{внут}^{КЗ\ внеш}}{\omega w_1} = \frac{L_{КЗ}^{КЗ\ внеш}}{w_1} I_1^{КЗ\ внеш}, \quad (23)$$

Таблица 1

Собственные и взаимные индуктивности обмоток трансформатора с идеальным электромагнитным экраном при $h_{об} = h_{окн}$

Параметр	Значение параметра при указанных $\mu = \mu_r\mu_0$				
	$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	$\mu = \mu_0$
L_1, Гн	24,479	12,245	1,2360	0,1339	0,0205
L_2, Гн	24,483	12,250	1,2405	0,1385	0,0256
M, Гн	24,478	12,245	1,2354	0,1334	0,0204
$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	0,99989	0,99979	0,9977	0,9795	0,8892
$L_{кз}^{КЗ внеш} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$	0,00520	0,00520	0,00565	0,00542	0,00429
$L_{кз}^{КЗ внут} = L_2 - \frac{M^2}{L_1}$	0,00520	0,00520	0,00567	0,00560	0,00537

что позволяет представить (1) в следующем удобном для численного анализа виде:

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = \left.\frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0}\right|_{\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{XX}}=\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}} =$$

$$= w_1 \frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}} I_1^{\text{КЗ внеш}}}. \qquad (24)$$

Аналогично для КМС в средней части стыкового ярма можно записать

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = \left.\frac{\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0}\right|_{\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{XX}}=\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}} =$$

$$= w_1 \frac{\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}} I_1^{\text{КЗ внеш}}}. \qquad (25)$$

Величины $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}$ и $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ определяются с помощью программы *ELCUT*.

Примечание 2. Значение μ сердечника при XX не связано со значением μ стали при КЗ Поэтому определять ток намагничивания при XX, который обеспечивает поток Φ_0 XX трансформатора, из цепочки равенств

$$I_0 = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{XX}}}{\omega L_1} = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}}{\omega L_1} = \frac{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_1} I_1^{\text{КЗ внеш}} =$$

$$= (1-k^2) I_1^{\text{КЗ внеш}}, \qquad (26)$$

бессмысленно, поскольку при XX μ сердечника, а вместе с ним и L_1, могут во много раз превышать их значения в режиме КЗ Из картины поля (рис. 3, *б*), построенной при $\mu = \mu_{\text{ст}} = \mu_{\text{стык}} = 100\mu_0$, видно, что для рассматриваемого режима КЗ следует задавать $\mu_{\text{ст}} << \mu_{\text{стык}}$. Однако в данной работе для облегчения понимания ее содержания принимается $\mu_{\text{ст}} = \mu_{\text{стык}} = \mu$; получаемые при этом картины поля следует рассматривать в качестве промежуточного этапа для последующего осознанного выбора $\mu_{\text{ст}}$ и $\mu_{\text{стык}}$.

Последовательность подготовительных расчетов для построения поля и определения потоков отражена в поз. 1–4 табл. 2. Задается ток внутренней обмотки $I_1^{\text{КЗвнеш}} = 1$ А. По формуле (20) вычисляется ток в короткозамкнутой обмотке $I_2^{\text{КЗвнеш}}$ и определяются заносимые в программу *ELCUT* плотности токов КЗ в обмотках:

$$J_1^{\text{КЗ внеш}} = \frac{(w_1/2) I_1^{\text{КЗ внеш}}}{a h_{\text{об}}};$$

$$J_2^{\text{КЗ внеш}} = -\frac{(w_2/2) I_2^{\text{КЗ внеш}}}{b h_{\text{об}}}. \qquad (27)$$

В поз. 5 — поток XX Φ_0, найденный по формуле (23). Прямым делением найденных программой значений потоков $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}$ и $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ в средних частях стержня и стыкового ярма на поток XX Φ_0 вычислены соответствующие значения КМС, приведенные в поз. 6 и 7. Все потоки, полученные с помощью программы, изображены в табл. 2 подчеркнутыми; это означает, что все они отнесены к потоку Φ_0. Поток $\underline{\Phi}_{\text{возд}}^{\text{КЗ внеш}}$ от обмоток до бака имеет отрицательный знак и может рассматриваться как антипоток (весьма незначительный), пронизывающий внешнюю короткозамкнутую обмотку. Величины $\underline{\Phi}_{a/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\underline{\Phi}_{a/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\underline{\Phi}_{b/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\underline{\Phi}_{b/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$ в поз. 9–12 представляют собой относительные значения потоков в толщах соответственно левых и правых половинок обмоток. Примечательно, что значения этих величин справа и слева практически одинаковы (за исключением случая $\mu = \mu_0$). Также практически совпадают значения потоков слева и справа в промежутках между обмотками ($\underline{\Phi}_{\delta_\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\underline{\Phi}_{\delta_\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$), приведенных в поз. 13–14.

Образование антипотока в стыковом ярме трансформатора при $h_{\text{об}} = h_{\text{окн}}$ является неожиданным и в этом смысле может рассматриваться как важное для теории трансформаторов открытие. Примечателен сам факт *сосуществования* в стали ярма встречно направленных потоков с разветвлением в точке m (рис. 3, *б*), в которой магнитная индукция обращается в ноль. Более наглядная картина разветвления потоков представлена на рис. 4, *а* (для случая $\mu = 100\mu_0$), из нее следует, что антипоток $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ формируется из разности двух потоков, один из которых (Φ_{mp}) действительно ориентирован встречно направлению потока XX, а другой, существенно меньший (Φ_{mq}), — по направлению потока XX Положение точки разветвления m в табл. 2 представлено отношением отрезков mp / pq, а соотношение между встречно направленными потоками в стыковом ярме — отношением Φ_{mq} / Φ_{mp}. Реальный антипоток Φ_{mp} пронизывает только короткозамкнутую (внешнюю) обмотку в окне трансформатора.

Таблица 2

Подготовительные расчеты к построению картины магнитного поля и расчету КМС при короткозамкнутой внешней обмотке ($h_{об} = h_{окн}$)

№	Параметр	Значения параметров при указанных $\mu = \mu_r\mu_0$				
		$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	$\mu_{Fe} = \mu_0$
1	$I_1^{\text{КЗ внеш}}$	1	1	1	1	1
2	$I_2^{\text{КЗ внеш}}$ см.(20)	–0,999812	–0.99959	–0,9959	–0,963098	–0,79476
3	$J_1^{\text{КЗ внеш}}$ см.(27)	125714	125714	125714	125714	125714
4	$J_2^{\text{КЗ внеш}}$ см.(27)	–125690	–125663	–125200	–121075	–99912
5	Φ_0 (Вб) см. (23)	$1{,}575 \cdot 10^{-5}$	$1.575 \cdot 10^{-5}$	$1{,}713 \cdot 10^{-5}$	$1{,}643 \cdot 10^{-5}$	$1{,}300 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{\text{КЗ внеш}}$ см. (24)	1,1949	1.3198	1,2226	1,1949	0,9058
7	$k_{стык}^{\text{КЗ внеш}}$ см. (25)	–0,1713	–0.1150	–0.0918	–0,1125	–0,0801
8	$\underline{\Phi}_{возд}^{\text{КЗ внеш}}$	–0,0526	–0.0483	–0,0469	–0,0386	–0,0171
9	$\underline{\Phi}_{a/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,2788	0.2564	0,2546	0,2492	0,2025
10	$\underline{\Phi}_{a/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,2819	0.2591	0,2573	0,2517	0,2038
11	$\underline{\Phi}_{b/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,2788	0.2547	0,2538	0,2574	0,2713
12	$\underline{\Phi}_{b/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,2819	0.2592	0,2583	0,2609	0,2724
13	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,1865	0.1715	0,1709	0,1728	0,1811
14	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,1879	0.1727	0,1721	0,1738	0,1815
15	$\underline{\Phi}_{qq}$	–0,0051	–0,0050	–0,0033	0,0079	0,0267
16	$\underline{\Phi}_{q}$	–0,000084	–0,000229	0,00241	0,0107	–0,0552
17	$\underline{\Phi}\big\|_{x=0}^{\text{общ}}$	–0,1764	–0,1198	–0, 0927	–0,0945	–0,1147
18	$\frac{mp}{pq}$	0,37	0,33	0,326	0,35	0,35
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	2,69	1.85	1,7	2,15	3,19

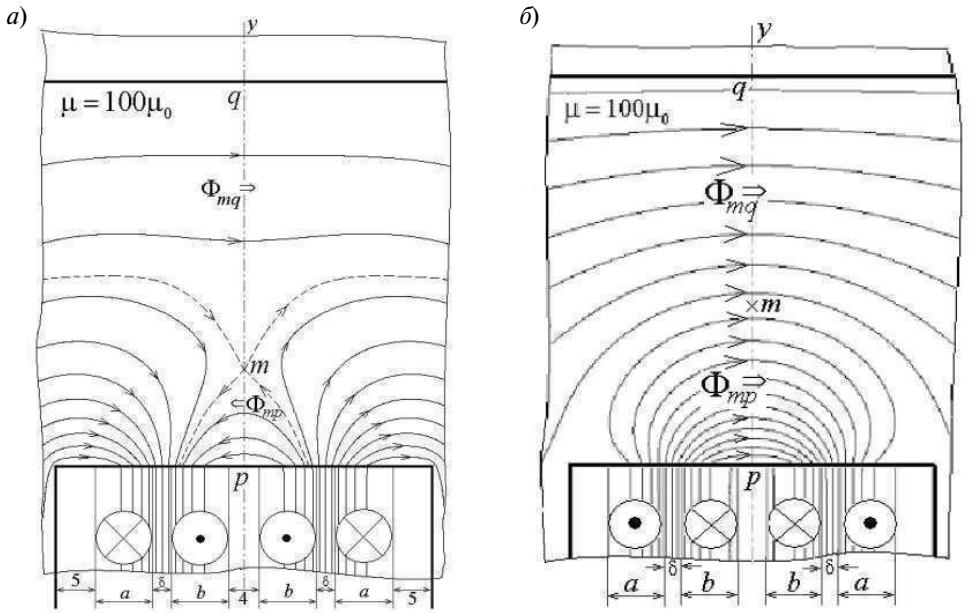


Рис.4. Магнитное поле в верхнем стыковом ярме двухстержневого трансформатора при короткозамкнутой внешеней обмотке шириной b (*а*) и при короткозамкнутой внутренней обмотке шириной a (*б*) при условии $h_{об} = h_{окн}$

Поперечные по отношению к оси y потоки $\underline{\Phi}_{qq}$ (от стыкового ярма до бака), $\underline{\Phi}_{стык} = k_{стык}^{КЗ\ внеш}$ (в средней части стыкового ярма) и $\underline{\Phi}_q$ (в окне трансформатора) создают *общий антипоток*, равный (с учетом принятых на рис. 3, *а* направлений)

$$\underline{\Phi}\Big|_{x=0}^{общ} = \underline{\Phi}_q + \underline{\Phi}_{стык} + \underline{\Phi}_{qq}\,. \qquad (28)$$

В частности, согласно табл. 2 при $\mu = 100\mu_0$ имеем

$$\underline{\Phi}\Big|_{x=0}^{общ} = 0{,}00241 - 0{,}09185 - 0{,}0033 =$$

$$= -\,0{,}0927. \qquad (29)$$

Значения $\underline{\Phi}\Big|_{x=0}^{общ}$ приведены в поз. 17 табл. 2.

Примечание 3. Из табл. 2 следует, что знаки потоков $\underline{\Phi}_{qq}$ и $\underline{\Phi}_q$ зависят от значения μ. Отрицательный знак $\underline{\Phi}_{qq}$ является признаком появления дополнительной точки ветвления на оси y между стыковым ярмом и баком, а положительный знак $\underline{\Phi}_q$ — признаком образования замкнутых линий поля в промежутке между внешними обмотками. Важно отметить, что при $h_{об} = h_{окн}$ знаки величин в поз. 7 и поз. 17 совпадают и являются отрицательными.

Примечание 4. В отличие от броневого трансформатора, в котором при любом КЗ отсутствуют общие потоки, т. е. потоки в стали, охватывающие одновременно обе обмотки, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внешней обмотки он присутствует в виде потока в стали Φ_{mq} (рис. 3, *б*). Однако он охватывает не две, а одновременно все четыре обмотки! Его соседство в точке раздела m с антипотоком Φ_{mp} опровергает сформулированный автором [5] принцип: «*в любом поперечном сечении магнитопровода не может быть одновременно два противоположно направленных и территориально разделенных потока*».

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки. Алгоритм построения картины поля аналогичен изложенному выше, и для случая, когда $h_{об} = h_{окн}$, можно воспользоваться данными табл. 1. Отличие состоит в том, что теперь первичной становится внешняя обмотка шириной b, и, следовательно, изменятся, как показано в табл. 3, подготовительные расчеты при определении токов обмоток и их плотностей, поскольку теперь изначально необходимо задаться током внешней обмотки $I_2^{КЗ внут} = 1$ А, а ток внутренней обмотки определить по формуле

$$I_1^{КЗ внеш} = -\frac{M}{L_1} I_2^{КЗ внеш}\,. \qquad (30)$$

Формула для потока ХХ принимает вид

$$\Phi_0 = \frac{U_{внеш}^{XX}}{\omega w_2} = \frac{U_{внеш}^{КЗ\ внут}}{\omega w_2} = \frac{L_{КЗ}^{КЗ\ внут}}{w_2} I_2^{КЗ\ внеш}\,. \qquad (31)$$

Таблица 3

Подготовительные расчеты к построению картины магнитного поля и расчету КМС при короткозамкнутой внутренней обмотке ($h_{об} = h_{окн}$)

№	Параметр	Значения параметров при указанных $\mu = \mu_r\mu_0$				
		$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	μ_0
1	$I_2^{\text{КЗ внут}}$	1	1	1	1	1
2	$I_1^{\text{КЗ внеш}}$, А, см. (30)	–0,999975	–0,99998	–0,9995	–0,99628	–0,99492
3	$J_1^{\text{КЗ внут}}$	–125710	–125712	–125654	–125247	–125075
4	$J_2^{\text{КЗ внут}}$	125714	125714	125714	125714	125714
5	Φ_0, Вб, см. (31)	$1{,}575\cdot10^{-5}$	$1{,}576\cdot10^{-5}$	$1{,}719\cdot10^{-5}$	$1{,}700\cdot10^{-5}$	$1{,}628\cdot10^{-5}$
6	$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}}$	–0,2144	–0,3259	–0,2211	–0,1841	–0,0959
7	$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}}$	1,2190	1,105	1,07	0,947	0,4584
8	$\underline{\Phi}_{\text{возд}}^{\text{КЗ внут}}$	0,05289	0,0530	0,04679	0,07702	0,1815
9	$\underline{\Phi}_{a/\text{слева}}^{\text{КЗ внут}}$	0,2789	0,2787	0,2552	0,2545	0,2487
10	$\underline{\Phi}_{a/\text{справа}}^{\text{КЗ внут}}$	0,2890	0,2817	0,2582	0,2596	0,2680
11	$\underline{\Phi}_{b/\text{слева}}^{\text{КЗ внут}}$	0,2769	0,2767	0,2553	0,2520	0,2463
12	$\underline{\Phi}_{b/\text{справа}}^{\text{КЗ внут}}$	0,2820	0,2817	0,2582	0,2604	0,2706
13	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{слева}}^{\text{КЗ внут}}$	0,1865	0,1864	0,1839	0,1713	0,1730
14	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{справа}}^{\text{КЗ внут}}$	0,1879	0,1877	0,1721	0,1735	0,1804
15	$\underline{\Phi}_{qq}$	0,0054	0,0056	0,0093	0,0435	0,1568
16	$\underline{\Phi}_{q}$	0.00078	0.00137	0,01345	0.1132	0.4620
17	$\underline{\Phi}\big\|_{x=0}^{\text{общ}}$	1,2257	1,1125	1,0927	1,1033	1,0773
18	$\dfrac{mp}{pq}$	0,44	0,44	0,43	0,43	0,55
19	$\dfrac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	1,76	1.75	1,71	2,1	3,3

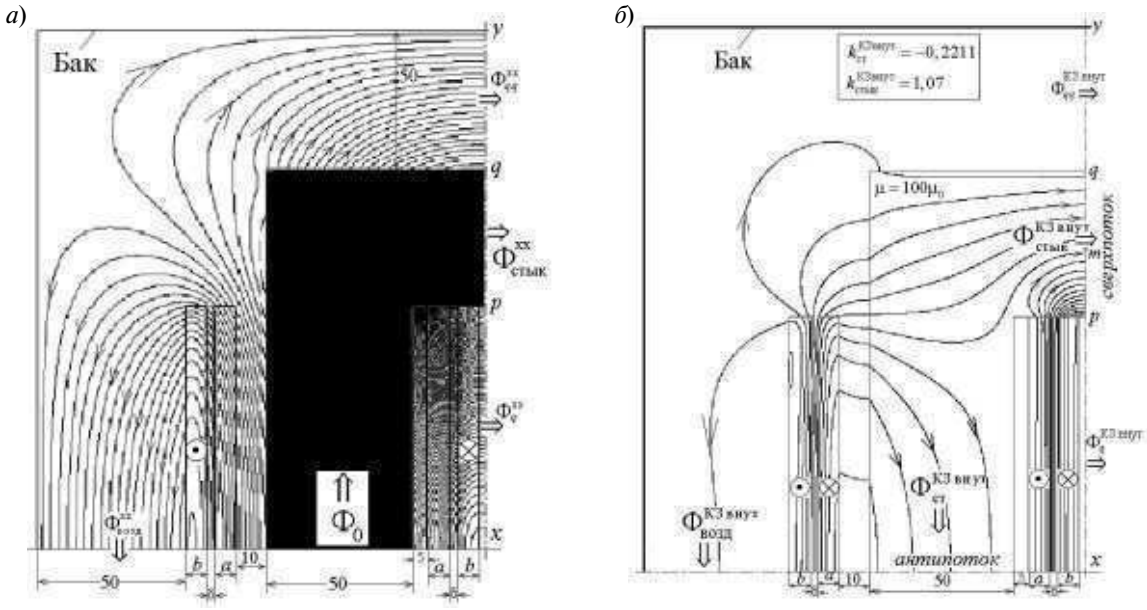


Рис. 5. Магнитное поле двухстержневого трансформатора в режиме ХХ (*а*) и короткого замыкания внутренней обмотки (*б*) при $h_{об} = h_{окн}$

Определив плотности токов в обмотках и занеся их в программу *ELCUT*, получим картины полей при ХХ и КЗ (рис. 5). Из анализа табл. 3 и рис. 5, *б* следует:

антипоток возникает в стержне и занимает значительную часть сечения левой половины короткозамкнутой внутренней обмотки;

значения потоков в толщах левых и правых половинок обмоток практически одинаковы; также практически совпадают значения приведенных в поз. 13–14 потоков слева и справа в промежутках между обмотками;

сверхпоток имеет место в стыковом ярме (см. также рис. 4, *б*); в точке соприкосновения *m* происходит объединение потока Φ_{mq}, исходящего из левых половин обмоток вне окна, с потоком Φ_{mt}, исходящим из правых половин обмоток в окне трансформатора;

все поперечные по отношению к оси *y* потоки ($\underline{\Phi}_{qq}$, $\underline{\Phi}_{стык}$, $\underline{\Phi}_{q}$) ориентированы одинаково и потому входят в (28) со знаком плюс; в частности согласно табл. 3 при $\mu = 100\mu_0$ имеем

$$\underline{\Phi}\big|_{x=0}^{общ} = 0{,}0093 + 1{,}07 + 0{,}01345 = 1{,}0927 \quad (32)$$

(значения $\underline{\Phi}\big|_{x=0}^{общ}$ приведены в поз. 17 табл. 3);

в отличие от случая КЗ внешней обмотки (см. примечание 4) при КЗ внутренней обмотки общего потока в стали, охватывающего одновременно две или четыре обмотки, не существует!

Ч а с т ь 2. Идеализированный трансформатор с укороченной высотой обмоток

Физические процессы в стыковом ярме короткозамкнутого трансформатора с укороченными обмотками, т. е. при $h_{об} < h_{окн}$, значительно сложнее, что, в частности, подтверждается картинами магнитных полей, представленными на рис. 6 и рис. 7 в случае $\mu = 100\mu_0$ для двух вариантов укорочения обмоток. Эти картины показывают, что *допущение* о *почти отсутствии* поля в пространстве между внешними обмотками в окне (практически соблюдающееся при $h_{об} = h_{окн}$) *в данном случае не выполняется.*

Методика построения полей не отличается от алгоритма, приведенного в первой части работы. Результаты расчета индуктивностей укороченных обмоток на основе МКЭ приведены в табл. 4 (аналог табл. 1).

Подготовительные расчеты и потоки в различных частях трансформатора при КЗ **внешней обмотки**, полученные по программе *ELCUT*, приведены в табл. 5, составленной по аналогии с табл. 2.

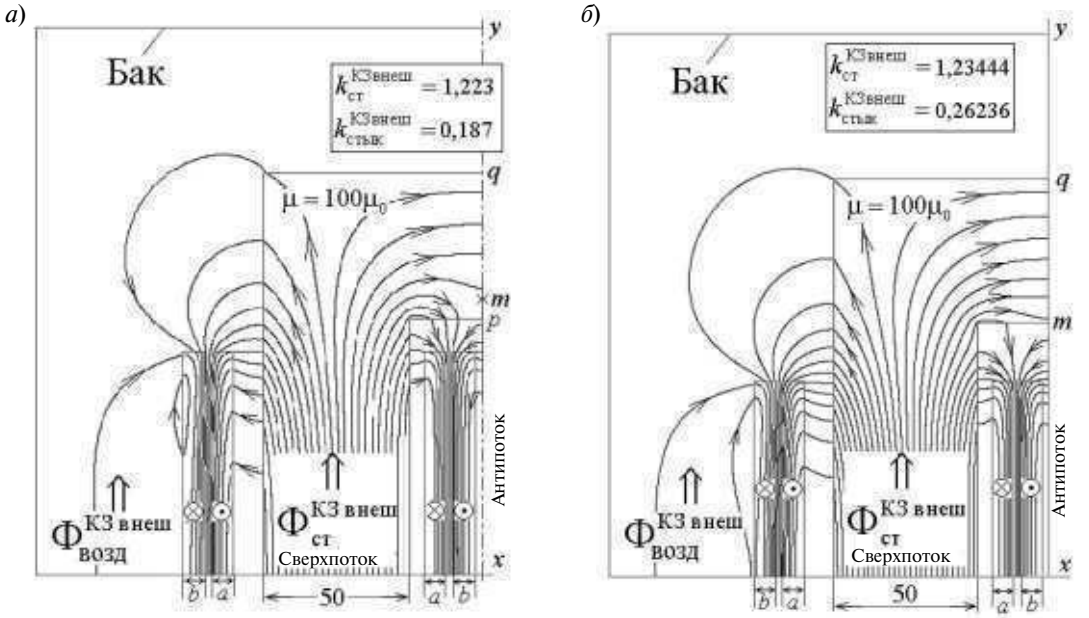


Рис. 6. Магнитное поле при короткозамкнутой внешней обмотке трансформатора с укороченными обмотками высотой $h_{об} = 0,874h_{окн}$ (*а*) и $h_{об} = 0,77h_{окн}$ (*б*)

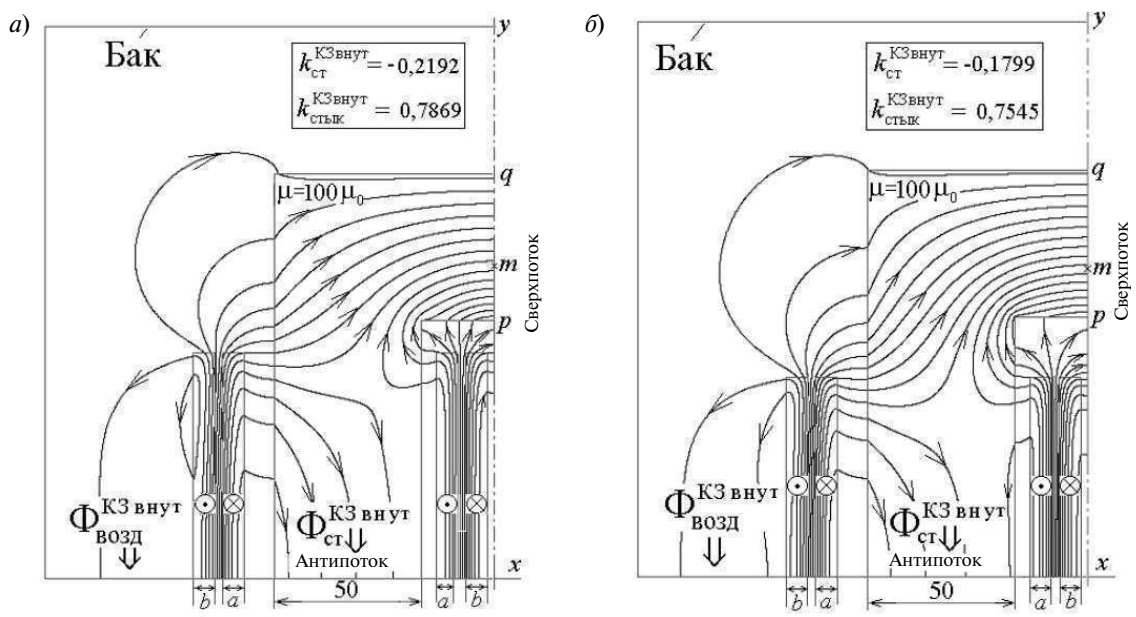


Рис. 7. Магнитное поле при короткозамкнутой внутренней обмотке трансформатора с укороченными обмотками высотой $h_{об} = 0,874h_{окн}$ (*а*) и $h_{об} = 0,77h_{окн}$ (*б*)

Таблица 4

Собственные и взаимные индуктивности обмоток трансформатора с идеальным электромагнитным экраном при $h_{об} = h_{окн}$ и $\mu = 100\mu_0$

Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
	$h_{об} = 0{,}874 h_{окн} = 153$ мм	$h_{об} = 0{,}77 h_{окн} = 135$ мм
L_1, Гн	1,24125	1,24648
L_2, Гн	1,24528	1,25032
M, Гн	1,2401	1,2449
$k = \dfrac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	0,99744	0,99719
$L_{кз}^{КЗ\,внеш} = L_1 - \dfrac{M^2}{L_2}$	0,0063385	0,007070
$L_{кз}^{КЗ\,внут} = L_2 - \dfrac{M^2}{L_1}$	0,0063588	0,007092

Таблица 5

Подготовительные расчеты к построению картины магнитных полей в случае КЗ внешней обмотки трансформатора с укороченными обмотками и $\mu = 100\mu_0$

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0{,}874 h_{окн} = 153$ мм (рис. 6, *а*)	$h_{об} = 0{,}77 h_{окн} = 135$ мм (рис. 6, *б*)
1	$I_1^{КЗ\,внеш}$, А	1	1
2	$I_2^{КЗ\,внеш}$ (см. (20))	–0,99584	–0,99590
3	$J_1^{КЗ\,внеш}$ (см. (27))	143790	163265
4	$J_2^{КЗ\,внеш}$ см. (27)	–143193	–162552
5	Φ_0 (см. (23))	$1{,}92075 \cdot 10^{-5}$	$2{,}1424 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{КЗ\,внеш}$ (см. (24))	1,223	1,234
7	$k_{стык}^{КЗ\,внеш}$ (см. (25))	0,1869	0,26236
8	$\underline{\Phi}_{возд}^{КЗ\,внеш}$	0,0590	0,0714
9	$\underline{\Phi}_{a/слева}^{КЗ\,внеш}$	0,2624	0,2621
10	$\underline{\Phi}_{a/справа}^{КЗ\,внеш}$	0,2588	0,2672
11	$\underline{\Phi}_{b/слева}^{КЗ\,внеш}$	0,2575	0,2602

Окончание табл. 5

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0{,}874 h_{окн} = 153$ мм (рис. 6, *а*)	$h_{об} = 0{,}77 h_{окн} = 135$ мм (рис. 6, *б*)
12	$\underline{\Phi}_{b/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,2635	0,2682
13	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,1739	0,1765
14	$\underline{\Phi}_{\delta_\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$	0,1756	0,1787
15	$\underline{\Phi}_{qq}$	–0,0012	–0,0013
16	$\underline{\Phi}_{q}$	–0,2891	–0,3618
17	$\underline{\Phi}\big\|_{x=0}^{\text{общ}}$	–0,1043	–0,1008
18	$\frac{mp}{pq}$	0,09	0,00
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	0,055	0,000

Сравнение картины поля на (рис. 3, *б*) с полями на рис. 6 показывает: чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе *точка ветвления потоков m* к точке *p* на границе окна и стыкового ярма. На рис. 6, *б* точка *m* практически совпадает с этой границей, и весь антипоток оказывается в окне между внешними обмотками. Поэтому знаки коэффициента $k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ в табл. 5 (в отличие от табл. 2) положительны. А это означает, что в эксперименте с измерительными витками, охватывающими середину стыкового ярма, антипоток не выявится, потому что там он либо очень слабый, либо практически отсутствует. Чтобы его «поймать» следует поместить измерительные витки в воздушном промежутке между внешними обмотками в окне. Отрицательный знак $\underline{\Phi}_{qq}$ указывает на наличие дополнительной точки разветвления в промежутке между стыковым ярмом и баком.

Подготовительные расчеты и потоки в различных частях трансформатора при КЗ **внутренней** обмотки, полученные по программе *ELCUT* при $h_{об} < h_{окн}$ и $\mu = 100\mu_0$, приведены в табл. 6 (аналог табл. 3), а картины полей — на рис. 7.

Сравнение картины поля на рис. 5, *б* с полями на рис. 7 показывает, что и здесь чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе *точка ветвления потоков m* к точке *p* на границе окна и стыкового ярма. Экспериментально обнаружить сверхпоток в стыковом ярме с помощью измерительных витков, охватывающих середину стыкового ярма, невозможно, потому что существенную его часть составляет поток $\underline{\Phi}_q$ между внешними обмотками в окне трансформатора.

Картины всех магнитных полей (рис. 3–7) согласуются с очевидным положением, что отбрасываемая при их построении часть трансформатора, расположенная справа от оси *y*, может быть заменена условным *боковым ярмом* с $\mu = \infty$, что важно с точки зрения возможной идентификации двухстержневого трансформатора с броневым и его 2Т-образной схемой замещения. Однако отмеченное положение не всегда соблюдают. В качестве примера на рис. 8 приведены «*картины замыкания магнитных потоков*» при КЗ в двухстержневых трансформаторах «*без боковых ярм*», как их (т. е. эти картины) представляли в 70-е годы прошлого столетия [5]. Автор [5] утверждает, что «*они получены путем измерений потоков в геометрических моделях мощных трансформаторов*, *выполненных в масштабе* 1:3, *на повышенной частоте для соблюдения условия* (7)».

Однако их сравнение с картинами полей на рис. 6 и 7 показывает, что в [5] неточно интерпретированы результаты опытных измерений.

Таблица 6

Подготовительные расчеты к построению картины магнитных полей в случае КЗ внутренней обмотки трансформатора с укороченными обмотками и $\mu = 100\mu_0$

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0,874h_{окн} = 153$ мм (рис. 7, *а*)	$h_{об} = 0,77h_{окн} = 135$ мм (рис. 7, *б*)
1	$I_2^{КЗ внут}$, А	1	1
2	$I_1^{КЗ внут}$ (см. (30))	–0,99905	–0,99840
3	$J_1^{КЗ внут}$	–143654	–163004
4	$J_2^{КЗ внут}$	143791	163265
5	Φ_0 (см. (31))	$1,92693 \cdot 10^{-5}$	$2,1491 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{КЗ внут} = \dfrac{\Phi_{ст}^{КЗ внут}}{\Phi_0}$	–0,2192	–0,1799
7	$k_{стык}^{КЗ внут} = \dfrac{\Phi_{стык}^{КЗ внут}}{\Phi_0}$	0,78695	0,75455
8	$\underline{\Phi}_{возд}^{КЗ внут}$	0,06476	0,07855
9	$\underline{\Phi}_{a/слева}^{КЗ внут}$	0,2593	0,2626
10	$\underline{\Phi}_{a/справа}^{КЗ внут}$	0,2632	0,2681
11	$\underline{\Phi}_{b/слева}^{КЗ внут}$	0,2567	0,2593
12	$\underline{\Phi}_{b/справа}^{КЗ внут}$	0,2635	0,2682
13	$\underline{\Phi}_{\delta_слева}^{КЗ внут}$	0,1737	0,1762
14	$\underline{\Phi}_{\delta_справа}^{КЗ внут}$	0,1756	0,1787
15	$\underline{\Phi}_{qq}$	0,0083	0,0079
16	$\underline{\Phi}_q$	0,3105	0,3878
17	$\underline{\Phi}\big\|_{x=0}^{общ}$	1,1058	1,1517
18	$\dfrac{mp}{pq}$	0,34	0,31
19	$\dfrac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	1,25	0,579

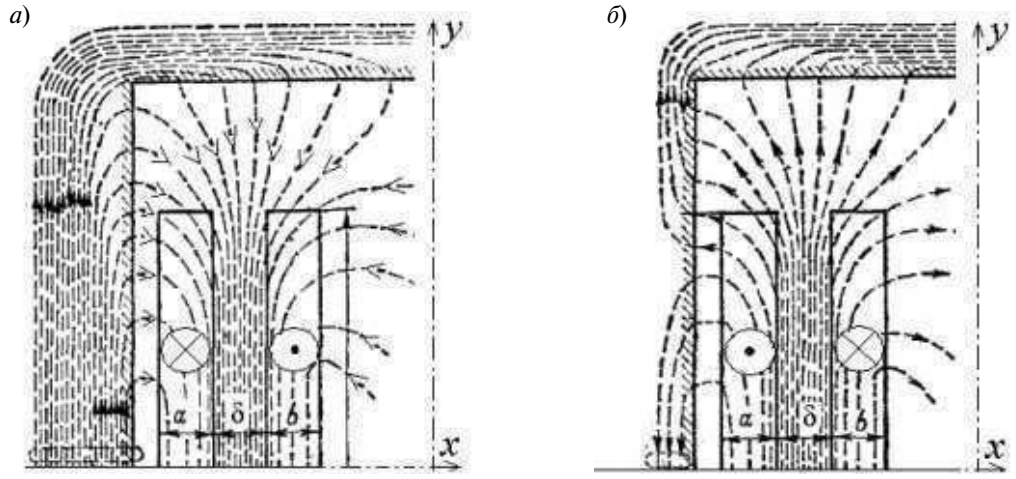


Рис. 8. Картины магнитных потоков при КЗ внешней обмотки (*а*) и внутренней обмотки (*б*), приведенные в [5] с добавлением осей *x*, *y*

Это выражается, во-первых, в небрежности изображения форм линий, пересекающих ось *y* (они должны быть перпендикулярны оси *y*), и, во-вторых, в полном пренебрежении влиянием на поле трансформатора токов *половин* обмоток, расположенных вне его окна (также поступают авторы всех учебников при выводе сопротивления КЗ трансформатора). Кроме того, автором [5] не представлен ни один случай экспериментального наблюдения сверхпотока и антипотока в стыке двустержневого трансформатора, что имеет место при $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$.

Примечание 5. Возможное оправдание картин на рис. 8 тем, что они построены на основе измерений в *трехмерных* моделях, неприемлемо, поскольку в трехмерных моделях доля частей обмоток, расположенных вне окна, увеличивается с половины до 3/4. Соответственно повышается и роль их токов в картине магнитного поля трансформатора. Сомнительно также обоснование того, что можно пренебрегать ролью левых половин обмоток в представлении двухстержневого трансформатора как результата *распрямления* броневого трансформатора, предварительно разрезанного по одной из его азимутальных плоскостей (подобно *распрямлению* электрических машин). Из сказанного вытекает необходимость более тщательного сопоставления методов моделирования полей, что выходит за рамки настоящей работы.

Результаты [5] следует рассматривать в качестве дополнительных аргументов к необходимости пересмотра и обновления теории двухстержневых трансформаторов. Следует подчеркнуть справедливость установленного автором [5] экспериментально (с помощью измерительных витков) наблюдения: хотя картина магнитного поля в магнитопроводе «*принципиально зависит от расположения короткозамкнутой обмотки*, *вне магнитопровода — практически нет*». Это также подтверждается сопоставлением картин полей на рисунках 3, *б* и 5, *б*; 6, *а* и 7, *а*; 6, *б* и 7, *б*, наконец, просто из сравнения полей на рис. 4. Наблюдение [5] следует дополнить вытекающим из сопоставлении поз. 9–14 таблиц 2, 3, 5 и 6 положением о практическом совпадении значений потоков, пронизывающих половины обмоток вне и внутри окна. Это важно с точки зрения *породнения* броневого и двухстержневого трансформаторов и адаптации 2Т-образной схемы замещения броневого трансформатора для описания поведения двустержневого трансформатора.

Приведенные в работе картины магнитных полей показали, что, как и в броневом, в двухстержневом трансформаторе аномальные потоки КЗ существуют попарно: одновременно со сверхпотоком в одной его части возникает антипоток в другой его части (и наоборот).

При КЗ и в броневых, и в двустержневых трансформаторах наблюдаются сгущения магнитных линий в областях стыковых ярем, к которым непосредственно прилегают обмотки. Из этого следует, что, вопреки распространенному мнению, независимо от размеров поперечных

сечений стыковых ярем в указанных областях при КЗ возможно сильное насыщение стали.

Примеры картин магнитных полей могут быть использованы для постановки физических экспериментов в реальных устройствах, что важно для обновления теории двухстержневых трансформаторов и построения более корректных их схем замещения, в которых естественным образом учитывались бы обнаруженные в работе явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, Г.Н.** Трансформаторы и реакторы: новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 204 с.

2. **Шакиров, М.А.** 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2010. № 5.— С. 19–36.

3. **Шакиров, М.А.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андру щук, Дуань Лиюн // Электричество.— 2010. № 3.— С. 55–63.

4. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиюн // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №1(95).— С. 107–120.

5. **Григоров, И.Б.** Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом потока рассеяния [Текст] / И.Б. Григоров // Электротехника.— 1975. № 4.

REFERENCES

1. **Aleksandrov G.N., Shakirov M.A.** Transformatory i reaktory: novye idei i printsipy [Tekst] // SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 204 s. (rus.)

2. **Shakirov M.A.** 2T-obraznye skhemy zameshcheniia transformatorov [Tekst] // Elektrichestvo.— 2010. № 5.— S. 19–36. (rus.)

3. **Shakirov M.A., Andrushchuk V.V., Duan' Liiun.** Anomal'nye magnitnye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom zamykanii // Elektrichestvo.— 2010. № 3.— S. 55–63. (rus.)

4. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V., Duan' Liiun.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov v bronevykh transformatorakh pri korotkikh zamykaniiakh [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №1(95).— P. 107–120. (rus.)

5. **Grigorov I.B.** Potoki v magnitoprovodakh moshchnykh silovykh transformatorov i avtotransformatorov s uchetom potoka rasseianiia [Tekst] // Elektrotekhnika 1975. № 4. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШАКИРОВ Мансур Акмелович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, действительный член Академии электротехнических наук; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: manshak@mail.ru

ВАРЛАМОВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: vyv2@rambler.ru

AUTHORS

SHAKIROV Mansur A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: manshak@mail.ru

VARLAMOV Yuriy V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vyv2@rambler.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 662.767.2:661.961.62:629.7.064.52

А.Н. Чусов, М.Ю. Зубкова, В.В. Кораблёв,
В.И. Масликов, Д.В. Молодцов

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БИОГАЗОВ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

A.N. Chusov, M.Yu. Zubkova, V.V. Korablev,
V.I. Maslikov, D.V. Molodtsov

THE TECHNOLOGY OF USING HYDROGEN-CONTAINING MIXTURES BASED ON BIOGAS IN FUEL CELLS FOR POWER SUPPLY OF AUTONOMOUS CONSUMERS

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния водородсодержащего топлива с остаточным содержанием метана (2 % об.) на работу низкотемпературного топливного элемента. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования нестандартного топлива в низкотемпературном топливном элементе.

БИОГАЗ. ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЕ ТОПЛИВО. ОСТАТОЧНЫЙ МЕТАН. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ. ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ.

The experimental results of influence hydrogen fuel with residual methane content (2 % vol.) on low-temperature fuel cells are shown. The possibility of using non-standard fuel in low-temperature fuel cells was experimentally confirmed.

BIOGAS. HYDROGEN-CONTAINING FUEL. RESIDUAL METHANE. LOW-TEMPERATURE FUEL CELL. POWER SUPPLY.

В настоящее время основным и наиболее дешевым сырьем для получения водорода служит природный газ. Однако из-за ожидаемого его дефицита и увеличения стоимости уже сейчас ставится задача получения водорода с использованием возобновляемых энергоресурсов — ветровой, солнечной и гидравлической энергии, а также из биомассы с помощью термохимических и биоэнергетических методов. [1]

В работе [2] приведены данные о стоимости производства водорода (с учетом хранения и транспортировки), полученного с помощью различных технологий (рис. 1), в современных условиях и в перспективе до 2050 года.

Анализ этих данных показывает, что сегодня наиболее дешевый способ — получение водорода из природного газа. На втором месте — водород, получаемый из биогаза сельскохозяйственных отходов, который в 1,4–1,7 раза дешевле водорода, получаемого электролизом, а также с использованием гидравлической либо ветровой энергии, и более чем в 10 раз дешевле водорода, получаемого с использованием электроэнергии от фотоэлектрических установок.

В перспективе следует ожидать удорожания природного газа, вследствие чего производство водорода из биогазов станет примерно в 2 раза дешевле, чем из природного газа. Стоимость водорода из биогаза будет сопоставима со стоимостью электролизного водорода, полученного с помощью электрической энергии гидравлических и ветровых электростанций, и в 4,5 раза дешевле водорода, полученного с использованием фотоэлектрических установок. Таким образом, целесообразность получения водорода из биогазов с последующим его использованием для производства электрической энергии совершенно очевидна.

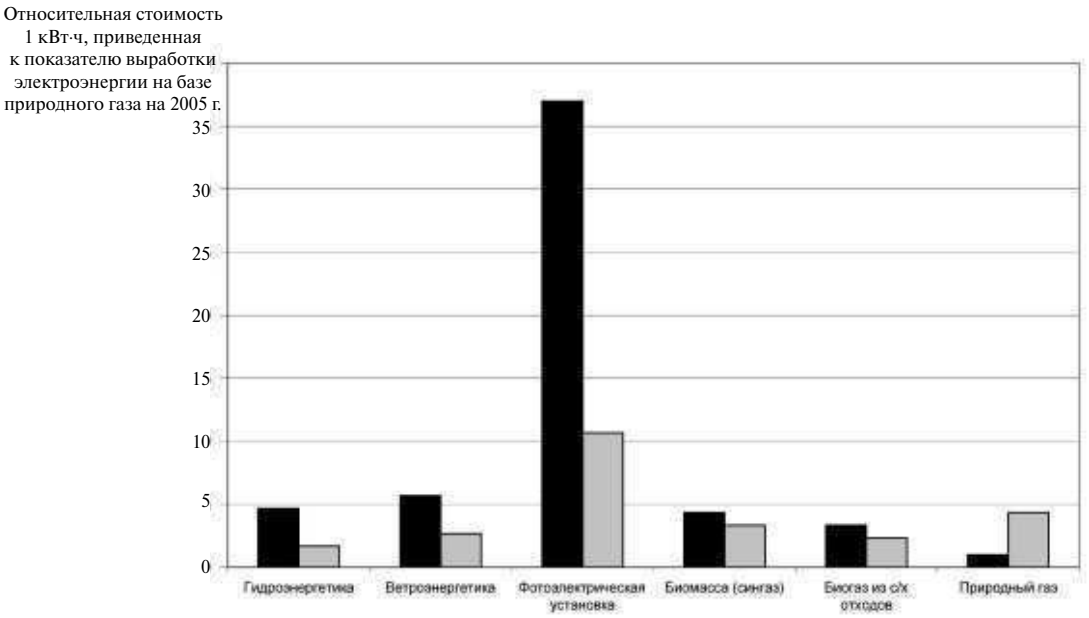


Рис. 1. Относительная стоимость производства водорода с использованием различных технологий (■ — современный уровень; □ — уровень 2050 года)

Биогазовые технологии находят все более широкое применение в местной энергетике, так как являются относительно простыми, недорогими и эффективными способами энергетической утилизации органосодержащих отходов.

Актуальная задача — создание эффективных технологий очистки биогазов для получения газа с содержанием метана 95 % об. и выше в зависимости от требований потребителя. При решении задачи очистки биогаза открывается перспектива получения из него водорода, основным сырьем для производства которого в настоящее время служит природный газ. Получать биогаз можно повсеместно, так как органосодержащие отходы постоянно образуются в процессе хозяйственной деятельности человека, в то время как ресурсы природного газа ограничены, а его использование лимитируется. Технологии получения водорода из отходов — дорогостоящие, поэтому возникает задача снизить затраты, используя имеющийся технологический задел по ключевым звеньям этого процесса.

Особый интерес представляет получение водорода для низкотемпературных топливных элементов, так как они в наибольшей степени подходят для автономных потребителей в широком диапазоне нагрузок — от сотен ватт до нескольких десятков киловатт. Их эффективность во многом определяется чистотой и стоимостью водорода. За рубежом проводятся работы по получению водорода из биогазов и его использованию в электроснабжении мелких потребителей. Выявлены недостатки установок — низкое (70–80 % об.) содержание водорода в реформате и наличие в нем вредных примесей. Это требует применения дорогостоящих и сложных в эксплуатации систем для его очистки, что приводит к увеличению энергоемкости процесса и снижению эффективности. Поэтому крайне актуальна разработка технологий получения из биогазов относительно дешевого, достаточно «чистого» водорода и способов его прямого использования в низкотемпературных водородных топливных элементах.

В СПбГПУ создан экспериментальный комплекс для исследования процессов получения и использования биогаза, состоящий из следующих модулей: генерации биогаза, его аккумулирования и очистки, реформинга метана с получением водорода и топливного элемента. Экспериментально подтверждено стабильное получение водорода высокой чистоты (98,5 % об.) при подаче биометана (95 % об.) в широком диапазоне нагрузок реформера (30–100 % от номинальной) [3, 4]. Содержание CO в реформате составляет менее 10 ppm. Были так же проведе-

ны эксперименты при использовании «слабого» биогаза, содержащего 30–45 % об. метан. При этом концентрация водорода в реформате остается высокой (более 93 % об). Это расширяет возможности использования в автономной энергетике значительного потенциала «слабых» биогазов с относительно невысокой концентрацией органосодержащей компоненты для получения электрической и тепловой энергии. Низкое содержание остаточного метана открывает возможность прямого использования реформата в топливном элементе, что позволит отказаться от дорогостоящих технологий его очистки. Соответственно, возникает задача использования потенциала вторичного ресурса высококачественного топлива. Наличие остаточного содержания метана в реформате предполагает организацию в системе использования конверторного топлива стадии дорогостоящей очистки водорода от метана [5]. Вопрос о влиянии остаточных количеств метана в водородсодержащей смеси при ее использовании в твердополимерном топливном элементе малоизучен. Известно, что метан не окисляется на аноде низкотемпературного топливного элемента по термодинамическому запрету [6], однако присутствие CH_4 в газовой водородсодержащей смеси может создать эффект экранирования каталитической поверхности мембраны топливного элемента, а следовательно, замедлить стадию массопереноса молекул H_2 и затруднить кинетику окисления водорода [7, 8]. Анализ публикаций по данному вопросу показал отсутствие необходимых данных об экспериментальных исследованиях, касающихся влияния остаточных количеств метана на состояние поверхности твердополимерной мембраны, эффективную площадь поверхности платинового катализатора, вольт-амперные характеристики топливной ячейки, индикаторы мощности при циклировании и в стационарных условиях [9, 10].

Настоящая статья посвящена выяснению принципиальной возможности использования водородсодержащего топлива с остаточным содержанием метана на пятиваттной топливной ячейке с целью оценить возможность использования нестандартного топлива в низкотемпературном топливном элементе.

Для проведения экспериментальных исследований был создан стенд (рис. 2) [3, 4], на котором отрабатывался режим прямой подачи в топливный элемент водородной газовой смеси с остаточным содержанием метана и параллельного тестирования исследуемой ячейки с использованием электролизных водорода и кислорода. Это позволяло проводить сравнительный

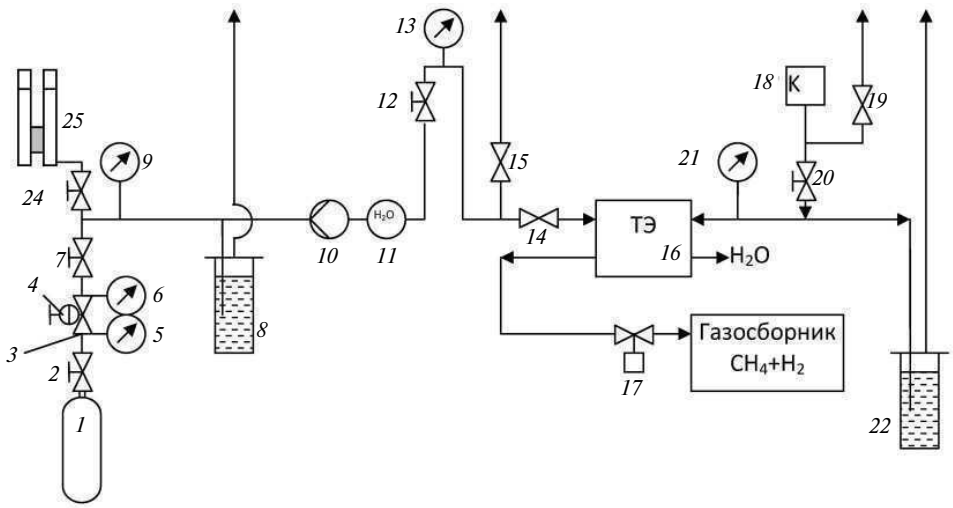


Рис. 2. Принципиальная схема стенда по исследованию использования водородной смеси с остаточным содержанием метана:

1 — баллон с водородно-метановой смесью под давлением; *3* — редуктор; *7*, *12*, *20* — вентили тонкой регулировки; *8*, *22* — жидкостные предохранительные сбросные клапаны; *10* — счетчик газа; *11* — измеритель влажности газа; *16* — топливный элемент; *17* — клапан сброса водорода; *18* — компрессор воздушный; *5*, *6*, *13*, *21* — манометры; *14*, *15*, *19*, *23*, *24* — краны; *25* — электролизер

анализ электрохимических характеристик по окислению топлива и отслеживать состояние мембраны топливного элемента после каждого цикла воздействия метаносодержащей смеси.

При прямой подаче водородной газовой смеси, полученной из биогаза [11], реализуется режим периодического автоматического сброса накапливающегося перед мембраной метана, который может создавать запирающий эффект [7]. Тестирование топливного элемента в течение многократных циклов (подача — сброс) позволяет определить его работоспособность и оптимальные режимы работы и оценить возможность использования полученного из биогазов путем двухстадийной конверсии [4] водородного топлива с метановой составляющей в низкотемпературном топливном элементе.

В качестве исходного исследуемого объекта была выбрана топливная ячейка E-Tek (P = 5 Вт), для которой при тестирования на электролизном водороде и кислороде [8] были определены основные рабочие характеристики:

Ячейка	E-Tek_12W_MEA_Pol_1
Площадь активной поверхности платины, мг/см^2	6,25
Напряжение холостого хода, мВ	940
Номинальная мощность при циклировании, мВт	130–160
Номинальная мощность в стационарных условиях, мВт	110–120
Омическое сопротивление, Ом·см^2	0,49

Исследования влияния остаточных количеств метана при подаче газовой водородсодержащей смеси в топливную ячейку проводились на газе-имитаторе, состав которого соответствует реформату из топливного процессора (98 % об. H_2 и 2 % об. CH_4). Скорость подачи водородосодержащего газа составляла ~ 20 мл/мин, что обеспечивало достаточное избыточное давление на мембране топливного элемента (~0,02 атм.). В качестве окислителя использовались электролизный кислород и кислород воздуха, подаваемые в количествах, обеспечивающих стехиометрию окислительно-восстановительного баланса с топливом. Проводилась автоматическая посекундная регистрация реализуемых зависимостей в цифровом и графическом формате; также фиксировался расход топлива (H_2 или H_2+CH_4) в рабочем режиме и при сбросе.

При проведении исследований был реализован ряд последовательных мероприятий по оценке электрохимической восприимчивости ячейки и поддержанию ее потенциальных характеристик на имеющемся уровне с использованием поддерживающего и контролирующего электрохимического оборудования — потенциостата P-150S в режимах воспроизведения потенциала «холостого хода», циклирования (E = = $f(I)$) в заданных пределах для расширения диапазона по току и, соответственно, по мощности, потенциостатирования ($I = f(t)$) в режимах свободного выхода топлива и с «замкнутым концом» (dead end) на электролизном водороде и на водородсодержащей смеси с остаточным содержанием метана и использованием в качестве окислителя как электролизного кислорода, так и кислорода воздуха.

Для оценки соответствия регистрируемого значения электродвижущей силы (ЭДС) заявленным техническим возможностям используемой топливной ячейки каждая серия исследований начиналась с работы на электролизном водороде в режиме «холостого хода» (ХХ) (рис. 3 — кривая *1*).

Для улучшения состояния ячейки после стабилизации потенциала проводилась переполюсовка (рис. 3, кривая *2*) с последующим многократным циклированием, в результате чего достигался необходимый «разгон» по току вплоть до 3,5 А (рис. 4), что, как правило, приводило к улучшению показателя ЭДС.

Проведенные тестовые испытания (рис. 5) показали, что водородная смесь, содержащая

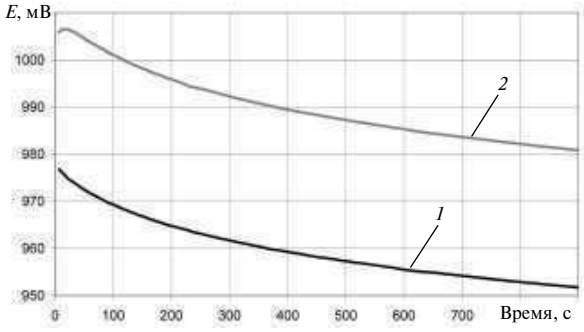


Рис. 3. Изменение потенциала холостого хода во времени:

1 — электролизный водород—кислород; *2* — электролизный водород — кислород после переполюсовки

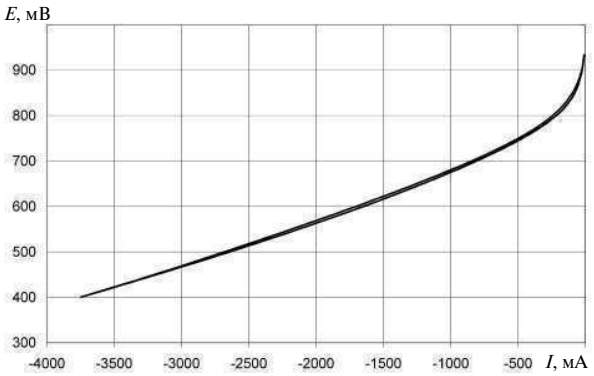


Рис. 4. Зависимость потенциала от тока (циклирование) при прямой подаче газовой смеси (H_2–98 % об., CH_4–2 % об.) в топливную ячейку

2 % об. CH_4 при прямой подаче (dead end) в низкотемпературный топливный элемент в потенциостатическом режиме (E = 500 мВ) с использованием кислорода воздуха в качестве окислителя (кривая *1*), достаточно продолжительное время (примерно $(1,2–1,4)10^4$ с) не требует регулировки по сбросу неотработанного топлива с анода [8]. Аналогичная зависимость $I = f(t)$ при использовании электролизного H_2 (99,999 % об), получаемого с помощью электролизера *Heliocentris* в идентичных по скорости потока и давлению на мембране условиях, представлена кривой *2*.

Сопоставление полученных зависимостей показывает, что исследуемая топливная ячейка при прямой подаче как водородосодержащей смеси с остаточным содержанием метана, так и электролизного водорода имеет токовые характеристики одного диапазона.

Электролизный кислород и кислород воздуха, используемые в качестве окислителей топлива, воздействуют на ячейку по-разному (рис. 6), и, чтобы в дальнейшем при работе с топливом, содержащим метановую составляющую, выявить воздействие именно неокисляющегося компонента используемого топлива (CH_4) на электрохимические параметры ячейки, мы проанализировали изменение характеристик ячейки при замене электролизного кислорода на кислород воздуха. Выявили ухудшение величины потенциала стабилизации (примерно 10 %) в режиме холостого хода при использовании в качестве окислителя кислорода воздуха по сравнению с вариантом, когда использовался электролизный кислород.

Сравнение результатов потенциостатирования в режиме «с замкнутым концом» на водородосодержащей смеси с остаточным содержанием метана (рис. 7) подтверждает сделанные ранее выводы о влиянии окислителя на токовые характеристики ячейки. Видно, что использование стандартного окислителя — электролизного кислорода — дает более высокие значения по току и обеспечивает устойчивый возврат по величине тока после сброса топлива.

Сравнение характеристик топливной ячейки (см. рис. 6 и 7) при использовании двух вариантов окислителя — электролизного кислорода и кислорода воздуха показало, что при работе с водородсодержащей смесью с остаточным количеством метана необходимо учитывать эффект затруднения кинетики протекания окислительно-восстановительных процессов, вносимый

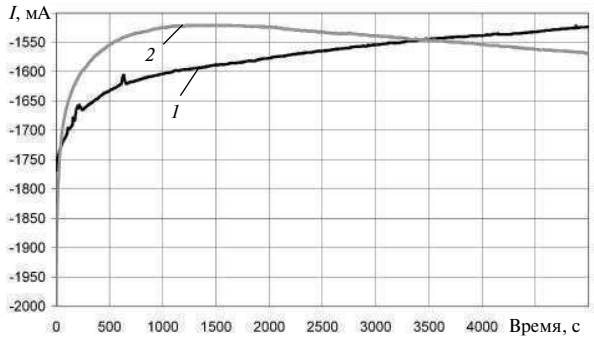


Рис. 5. Зависимость тока от времени (потенциостатирование, E = 500 мВ):
1 — H_2–98 % об., CH_4–2 % об.; *2* — электролизный H_2

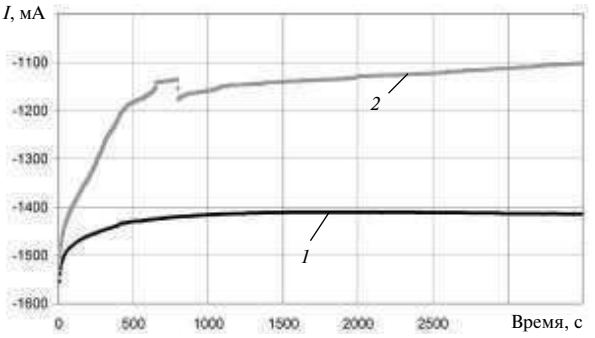


Рис. 6. Изменение тока во времени (потенциостатирование, E = 500 мВ):
1 — электролизный водород — кислород со свободным выходом; *2* — электролизный водород — воздух со свободным выходом

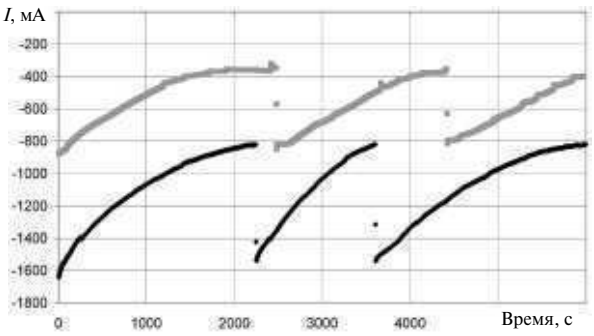


Рис. 7. Потенциостатирование при $E = 500$ мВ в режиме dead end:

1 — водородсодержащая смесь с остаточным содержанием метана — кислород; *2* — водородосодержащая смесь с остаточным содержанием метана — воздух

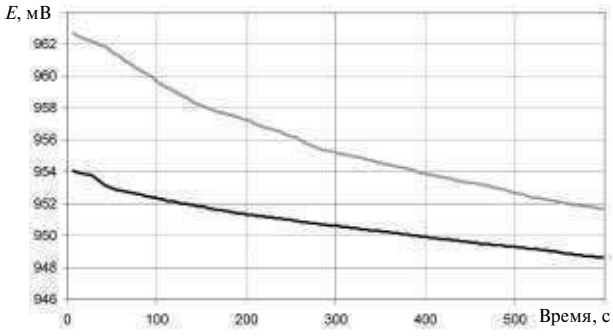


Рис. 8. Изменение потенциала холостого хода во времени в системе «водородосодержащая смесь с остаточным содержанием метана + воздух» с контролем избыточного давления воздуха, режимы:

1 — $P_{изб}$=0,017 бар; *2* — $P_{изб}$=0,02 бар

окислителем, в случае использования в этом качестве кислорода воздуха.

Избыточное давление подачи окислителя (с учетом стехиометрии и кинетики окисления-восстановления) также оказывает влияние на рассматриваемые характеристики топливной ячейки (рис. 8). Заметный избыток кислорода воздуха (~ 20 %, режим *1*) создает лучшие условия для протекания взаимосвязанных процессов окисления и восстановления. Дальнейшее увеличение избыточного давления подачи окислителя приводит со временем к пересыханию ячейки и ухудшению состояния готовности к работе (режим *2*).

Отработанная в ходе этого этапа исследований система мер по подготовке состояния ячейки к работе, включающая переполюсовку, циклирование с контролирующей регистрацией потенциала в режиме «холостого хода», позволила оперативно отслеживать и учитывать особенности поведения ячейки и воздействовать на ее работу для достижения лучшего результата.

Проведенные исследования режимов работы энергетической установки на водородсодержащем топливе с остаточным содержанием метана 2 % об., позволяют констатировать стабильную работу на таком нестандартным топливе и могут быть положены в основу дальнейших экспериментов по оценке эффективности подобных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дуников, Д.О.** Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов [Текст] / Д.О. Дуников, В.И. Борзенко, С.П. Малышенко [и др.] // Теплоэнергетика.— 2013. №3— М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2013.— С. 48–57.

2. **Lehmann, J.** German Hydrogen and Fuel Cell Association [Текст] / Lehmann, J.— Wasserstoff— Der neue Energieträger.— Hydrogeit Verlag, Berlin, 2009.

3. **Федоров, М.П.** Экспериментальный комплекс для производства водорода из органосодержащих отходов для применения в топливных элементах [Текст] / М.П. Федоров, В.И. Масликов, А.Н Чусов, Д.В. Молодцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ— 2011. №4(135).— С. 35–41.

4. **Федоров, М.П.** Разработка и создание экспериментального комплекса по оптимизации конверторных процессов получения водорода из биогазов органосодержащих отходов [Текст] / М.П. Федоров, М.Ю. Зубкова, В.В. Кораблёв [и др.] // Тез. докл. 6-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики».— СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010.— С. 197–198.

5. **Лившиц А.И.** Сверхпроводимость металлов по водороду и мембранное выделение водорода из газовых смесей [Текст] / А.И. Лившиц // Тез. докл. 4-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики».— СПб.: Изд-во ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2007.— С. 1–3.

6. **Stroganov A.A., Zubkova M.U.** Thermodynamic extent of the ideal fuel cell efficiency [Text] / A.A. Stroganov, M.U. Zubkova // XVI International conference «Chemical Thermodynamic in Russia (RCCT 2007)» and X International conference «Problems Solvatic Complex Formation in Solution». Vol. II.— 2007.— P. 382.

7. **Fedorov, M.P.** Studies of processes direct feed converter biohydrogen in low temperature fuel cell [Text] / M.P. Fedorov, A.N. Chusov, V.I. Maslikov, M.Yu. Zubkova, D.V. Molodtsov // Abstracts of VIII International Conference «Fundamental Problems of electrochemical energy.» Saratov., 2011.— P. 436–439. (rus.)

8. **Федоров, М.П.** Исследование процессов прямой подачи конверторного биоводорода с остаточным содержанием метана в топливный элемент [Текст] / М.П. Федоров, М.Ю. Зубкова, А.А. Томасов, Д.В. Молодцов, Н.К. Зеленина // Тез. докл. 7-й Российской конференции «Физические проблемы водородной энергетики».— СПб.: Изд-во ФТИ им. Иоффе, 2011.— С. 160–162.

9. **Giddey S., Ciacchi S., Badwal S.P.S.** Fuel Quality and Operational Issues for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells [Text] / Ionics, 2005. No. 11.— P. 1–10.

10. **Blessing, I.** Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell [Text] / I. Blessing, C. Gardner, M. Ternan // International Journal of Hydrogen Energy.— 2007.— P. 908–914.

11. **Федоров, М.П.** Установки получения водорода из биогаза [Текст] / М.П. Федоров, В.И. Масликов, М.Ю. Зубкова, Д.В. Молодцов, А.Н. Чусов // Матер. конф. ISWA-2011 «Передовые технологии переработки и захоронения отходов: ориентиры применения и критерии выбора. Москва. 31 мая — 2 июня 2011 года.— С. 25–28;

REFERENCES

1. **Dunikov D.O., Borzenko V.I., Malyshenko S.P., Blinov D.V., A.N. Kazakov.** Prospective technologies biohydrogen in power plants based on fuel cells [Text]. Thermal Engineering.— 2013. № 3.— P. 48–57. (rus.)

2. **Lehmann J.** German Hydrogen and Fuel Cell Association [Text].— Wasserstoff— Der neue Energieträger. Hydrogeit Verlag, Berlin, 2009.

3. **Fedorov M.P., Maslikov V.I., Chusov A.N., Molodtsov D.V.** Experimental complex for the production of hydrogen from organic wastes for use in fuel cells [Text] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2011, № 4 (135), P. 35–41. (rus.)

4. **Fedorov M.P., Zubkova M.Yu., Korablev V.V., Maslikov V.I., Molodtsov D.V., Chusov A.N., Terukov E.I., Okunev A.G., Lysikov A.I.** Development and creation the experimental complex to optimize the converting process for producing hydrogen from organic wastes biogas [Tekst] // Proc. Reports. 6th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy.» St. Petersburg.— 2010. P. 197–198. (rus.)

5. **Livshits A.I.** Metal membrane superconductivity for hydrogen and release of hydrogen from gas mixtures [Tekst] // Proc. Reports. 4th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy».— St. Petersburg, 2007.— P. 1–3. (rus.)

6. **Stroganov A.A., Zubkova M.U.** Thermodynamic extent of the ideal fuel cell efficiency [Text].— XVI International conference «Chemical Thermodynamic in Russia (RCCT 2007)» and X International conference «Problems Solvatic Complex Formation in Solution». Vol. II.— 2007.— P. 382.

7. **Fedorov M.P., Chusov A.N., Maslikov V.I., Zubkova M.Yu., Molodtsov D.V.** Studies of processes direct feed converter biohydrogen in low temperature fuel cell. s of VIII International Conference «Fundamental Problems of electrochemical energy».— Saratov., 2011.— P. 436–439. (rus.)

8. **Fedorov M.P., Zubkova M.Yu., Thomasov A.A., Molodtsov D.V. Zelenina N.K.** Investigation of process direct feed converter biohydrogen with residual methane content in fuel cell [Text] // Proc. Reports. 7th Russian Conference «Physical Problems of Hydrogen Energy».— St. Petersburg.— 2011.— P. 160–162. (rus.)

9. **Giddey S., Ciacchi S., Badwal S.P.S.** Fuel Quality and Operational Issues for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells [Text] // Ionics.— 2005. No. 11, P. 1–10.

10. **Blessing Ibeh, Gardner Chris, Ternan Marten**. Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell [Text] // International Journal of Hydrogen Energy.— 2007. P. 908–914.

11. **Fedorov, M.P., Maslikov V.I., Zubkova M.Yu., Molodtsov D.V., Chusov A.N.** Plants for hydrogen production from biogas [Tekst] // Materials of Conference ISWA-2011 «Advanced technology for processing and disposal of waste: Guidelines and application of the selection criteria. May 31 – June 2. 2011.— P. 25–28. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧУСОВ Александр Николаевич — кандадат технических наук заведующий кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: chusov17@mail.ru

ЗУБКОВА Марина Юрьевна — кандидат химических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: marina19zubkova@list.ru

КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич — доктор физико-математических наук профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: korablev@spbstu.ru

МАСЛИКОВ Владимир Иванович — доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmaslikov@list.ru

МОЛОДЦОВ Дмитрий Владиславович — старший преподаватель кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kovu@bigcats.ru

AUTHORS

CHUSOV Alexander N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: chusov17@mail.ru

ZUBKOVA Marina Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: marina19zubkova@list.ru

KORABLEV Vadim V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: korablev@spbstu.ru

MASLIKOV Vladimir I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmaslikov@list.ru

MOLODTSOV Dmitry V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kovu@bigcats.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.311

А.Ю. Васильев, В.Н. Козлов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И НАБЛЮДАЕМОСТИ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЙ ПРИ СИНТЕЗЕ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ЛИНИЯМ

A.Yu. Vasiliev, V.N. Kozlov

CONTROLLABILITY AND OBSERVABILITY OF POWER INTERCONNECTIONS FOR BOUNDED LINE ACTIVE-POWER FLOW SYSTEMS DESIGN

Рассматривается статически определимая математическая модель электроэнергетического объединения блочной структуры. Для нее доказываются необходимые условия управляемости и наблюдаемости, зависящие от параметров системы. Аналогичным образом анализируется модель сокращенного порядка и модели, построенной по взаимным углам отклонения.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ. УПРАВЛЯЕМОСТЬ. НАБЛЮДАЕМОСТЬ. УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ. МОДЕЛЬ СОКРАЩЕННОГО ПОРЯДКА.

It is considered a statically determinable power interconnection mathematical model in parametric representation. Parametric necessary conditions of controllability and observability are proven for it. Also the similar analysis is given for reduced order model and model based on mutual angle deviation.

POWER INTERCONNECTION. CONTROLLABILITY. OBSERVABILITY. ACTIVE-POWER FLOW CONTROL. REDUCED ORDER MODEL.

Для корректного решения задачи ограничения перетоков [1–3] необходимо выполнить анализ управляемости и наблюдаемости координат объекта — отклонений частот узлов и перетоков активной мощности в электроэнергетических объединениях (ЭЭО).

Структурно-инвариантные уравнения электромеханических процессов. Схема сети ЭЭО [4, 5] представлена на рис. 1, где изображены генерирующие узлы и линии электропередач ЭЭО.

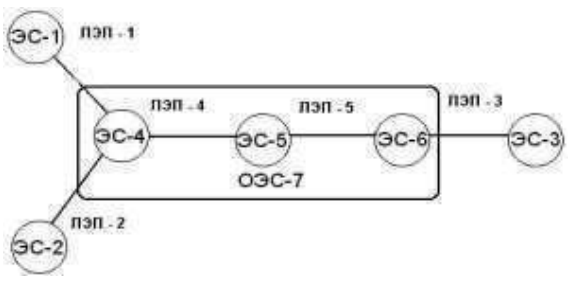


Рис. 1. Обобщенная схема Единой энергетической сети России:
ЭС-1 — ОЭС Северо-Запада; ЭС-2 — ОЭС Юга; ЭС-3 — ОЭС Дальнего Востока, ЭС-4 — ОЭС Центра; ЭС-5 — ОЭС Урала; ЭС-6 –ОЭС Сибири

Система уравнений энергоагрегатов (ЭА) ЭЭО состоит из уравнений состояний и выходов для i-го узла

$$T_{ai}^2\dot{\omega}_i + T_{yi}\omega_i + \sum_g \rho_{ig}\left(\varphi_i - \varphi_g\right) = p_i - \mu_i;$$

$$T_{\text{п}i}\dot{p}_i + p_i = -k_{\omega i}\omega_i + k_{\text{п}i}\sigma_i;$$

$$s_i = \sum_g \rho_{ig}\left(\varphi_i - \varphi_g\right);$$

$$T_{Ci}\dot{\sigma}_i + \sigma_i = k_{Ci}u_i,$$

где φ_i — отклонения абсолютных углов ЭА от исходных значений; p_i — суммарное приращение мощностей ЭА; μ_i — внеплановое изменение нагрузки i-го ЭА; T_{ai}^2 — постоянная механической инерции ротора ЭА; T_{yi} — постоянная успокоения; ρ_{ig} — синхронизирующий момент (мощность) между i-м и g -м ЭА; $T_{\text{п}i}$, T_{Ci} – постоянные времени парового объема и гидравлического усилителя ЭА; $k_{\omega i}$ — коэффициент усиления первичного регулятора скорости турбины ЭА; $k_{\text{п}i}$, k_{Ci} – коэффициенты передачи парово-

го объема и управлений; u_i — управления ЭА; ω_i — отклонения частот ЭА; s_j — отклонения перетоков активной мощности по линиям.

Структурно-инвариантные уравнения ЭЭО имеют вид [5, 6]

$$\begin{bmatrix}\Phi'\\ \Omega'\\ \mathrm{P}'\\ \Sigma'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0_{n\times n} & \mathrm{E}_{n\times n} & 0_{n\times n} & 0_{n\times n}\\ -\overline{\mathrm{T}}_a R_{\mathrm{p}} & -\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T}_{\mathrm{y}} & \overline{\mathrm{T}}_a & 0_{n\times n}\\ 0_{n\times n} & \overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\Omega} & -\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}} & \overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\\ \overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_1 & \overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_2 & 0_{n\times n} & -\overline{\mathrm{T}}_C\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}\Phi\\ \Omega\\ \mathrm{P}\\ \Sigma\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\\ \overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ -\overline{\mathrm{T}}_a\\ 0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\end{bmatrix}\mu; \qquad (1)$$

$$s=C_0\Phi=\left(s_1,\ldots,s_l,\ldots,s_m\right)^T;\quad s_l=\rho_{ik}\left(\varphi_i-\varphi_k\right).$$

Матричные параметры ЭА имеют вид: $\overline{\mathrm{T}}_a=$ $=(\mathrm{diag}\{T_{ai}^2\})^{-1}$; $\mathrm{T}_{\mathrm{y}}=\mathrm{diag}\{T_{yi}\}$; $\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}=(\mathrm{diag}\{T_{\mathrm{п}i}\})^{-1}$; $\mathrm{K}_{\mathrm{п}}=\mathrm{diag}\{k_{\mathrm{п}i}\}$; $\mathrm{K}_{\Omega}=\mathrm{diag}\{-|k_{\omega i}|\}$; $\overline{\mathrm{T}}_C=(\mathrm{diag}\{T_{Ci}\})^{-1}$; $\mathrm{K}_C=\mathrm{diag}\{k_{Ci}\}$. Для уравнений (1) имеет место статическая определимость, что обусловливает существование корректных моделей статических режимов при пропорционально-интегральном регуляторе частоты с параметрами в виде матриц K_1 и K_2.

Анализ управляемости. Пусть число управлений и возмущений совпадает с числом узлов, тогда в (1) число координат состояния m в четыре раза превышает число входов. Анализ управляемости основан на ранговом критерии Р. Калмана

$$\mathrm{S}_u=\left[\mathrm{B}\quad \mathrm{AB}\quad \mathrm{A}^2\mathrm{B}\quad\cdots\quad \mathrm{A}^{m-1}\mathrm{B}\right], \qquad (2)$$

где A, B — матрицы, соответствующие представлению (1) в виде

$$x'=\mathrm{A}x+\mathrm{B}u+D\mu;\qquad s=\mathrm{C}x.$$

Полная матрица управляемости имеет $4n^2$ столбцов с учетом того, что число управляющих воздействий равно n. Блочная матрица управляемости имеет $4n$ блочных столбцов, число строк для блочной и полной матриц равно $4n$. Тогда для анализа управляемости на первом этапе достаточно проанализировать первые $4n$ столбцов (4 блочных столбца) матрицы (2). Если полученная совокупность столбцов имеет полный ранг, то система будет управляемой, поскольку оставшиеся $4(n-1)$ блочных столбцов не влияют на ранг.

Утверждение 1. Неполная квадратная матрица управляемости по управляющим воздействиям для ЭЭО (1) выглядит так:

$$\mathrm{S}_u^{1-4}=\left[\mathrm{S}_u^1\quad \mathrm{S}_u^2\quad \mathrm{S}_u^3\quad \mathrm{S}_u^4\right], \qquad (3)$$

где отдельные блочные столбцы имеют вид

$$\mathrm{S}_u^1=\mathrm{B}_u=\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\\ \overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\end{bmatrix};$$

$$\mathrm{S}_u^2=\mathrm{AB}_u=\mathrm{AS}_u^1=\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ 0_{n\times n}\\ \overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ -(\overline{\mathrm{T}}_C)^2\mathrm{K}_C\end{bmatrix};$$

$$\mathrm{S}_u^3=\mathrm{A}^2\mathrm{B}_u=\mathrm{AS}_u^2=\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ \overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ -\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}(\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}+\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C)\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ (\overline{\mathrm{T}}_C)^3\mathrm{K}_C\end{bmatrix};$$

$$\mathrm{S}_u^4=\mathrm{A}^3\mathrm{B}_u=\mathrm{AS}_u^3=$$

$$=\begin{bmatrix}\overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ -\overline{\mathrm{T}}_a(\mathrm{T}_y\overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}+\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}(\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}+\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C))\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ \overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}(\mathrm{K}_{\Omega}\overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}+\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}(\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}+\mathrm{K}_{\mathrm{п}}\overline{\mathrm{T}}_C)+\mathrm{K}_{\mathrm{п}}(\overline{\mathrm{T}}_C)^2)\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\\ \overline{\mathrm{T}}_C(\mathrm{K}_2\overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_{\mathrm{п}}\mathrm{K}_{\mathrm{п}}-(\overline{\mathrm{T}}_C)^2)\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C\end{bmatrix}.$$

Доказательство. Неполная квадратная матрица (3) вычисляется с учетом блочной структуры матрицы объекта, поскольку все подматрицы матрицы в системе (1) являются квадратными из $R^{n\times n}$, где n — число узлов ЭЭО. Тогда матрица управляемости определяется вычислениями в соответствии с (2). Анализ неполной квадратной матрицы управляемости по управляющим воздействиям позволяет сформулировать теорему.

Теорема 1. ЭЭО вида (1) обладает свойством полной управляемости по управляющим воздействиям $u=(u_1,u_2,\ldots,u_n)^T$ тогда, когда K_C является матрицей полного ранга.

Доказательство. Пусть исследуется неполная матрица управляемости (3) с исключенными

$4(n-1)$ блочными столбцами. Ее ранг вычисляется по теореме Лапласа. Матрицы параметров в (1) — квадратные из $\mathrm{R}^{n\times n}$, все блоки матриц A и B за исключением блока R_ρ —диагональные.

Исследуется неполная квадратная матрица управляемости (3), которая по виду есть блочная нижняя треугольная матрица относительно второй диагонали. Для анализа ранга по строкам допустимо представить блочную матрицу в инверсном порядке в виде блочной нижней треугольной матрицы, у которой ранг определяется блочными элементами на диагонали (второй — в исходном случае, главной — в случае допустимых перестановок). Блочные элементы диагонали неполной квадратной матрицы управляемости (3) — это произведения матриц: $\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C$, $\overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}\mathrm{K}_\mathrm{п}\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C$, $\overline{\mathrm{T}}_a\overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}\mathrm{K}_\mathrm{п}\overline{\mathrm{T}}_C\mathrm{K}_C$; последний элемент встречается два раза. Все матрицы, входящие в данные произведения, — диагональные, следовательно, блочные элементы также диагональные. В силу особенностей системы диагональные элементы матриц $\overline{\mathrm{T}}_C$, $\overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}$, $\mathrm{K}_\mathrm{п}$, $\overline{\mathrm{T}}_a$ не равны нулю. Таким образом, ранг этих квадратных матриц из $\mathrm{R}^{n\times n}$ — полный, как и ранги их произведений.

Пусть ранг матрицы K_C полный. Необходимо доказать, что система является полностью управляемой. Ранг приведенных выше блочных элементов, содержащих K_C, также будет полный. Из полноты ранга блочных элементов следует полнота ранга неполной квадратной матрицы управляемости по столбцам и строкам. Поскольку число строк неполной и полной матриц управляемости одинаково, то из полноты строчного рангового критерия для первой матрицы следует его полнота для второй. Из полноты ранга матрицы (2) при заданной матрице K_C следует полная управляемость системы (1).

Следствие 1. Матричные блоки K_1 и K_2 не влияют на свойство управляемости модели (1), т. е. свойство управляемости сохраняется при различных матричных параметрах регуляторов частоты, включая их нулевые значения. Из этого следует, что статическая неопределимость не влияет на управляемость модели (1) по управлениям для неособенной матрицы K_C.

Следствие 2. Матричный блок R_ρ также не влияет на свойство управляемости для неособенной матрицы K_C.

Следствие 3. Матрица K_C всегда имеет полный ранг, является диагональной и может иметь некоторые нулевые диагональные элементы. На практике последнее следствие означает отсутствие возможности управлять различными узлами. Поэтому условие теоремы 1 может иметь вид: «ЭЭО вида (1) обладает свойством полной управляемости по управлениям $u=\begin{pmatrix}u_1 & u_2 & \cdots & u_n\end{pmatrix}^T$ тогда, когда имеется возможность управления каждым из узлов ЭЭО».

В теореме 1 формулируется *достаточное* условие полной управляемости (1), однако для формулировки необходимого условия следует вычислить в аналитической форме все $4n$ блочных столбцов полной матрицы управляемости (2), что является сложной задачей.

Анализ наблюдаемости. Матрица наблюдаемости (1) имеет вид

$$\mathrm{S}_\mathrm{y}=\begin{bmatrix}\mathrm{C}^T & \mathrm{A}^T\mathrm{C}^T & (\mathrm{A}^T)^2\mathrm{C}^T & \cdots & (\mathrm{A}^T)^{m-1}\mathrm{C}^T\end{bmatrix}, \quad (4)$$

где A, C — матрицы в модели (1), а m — число состояний модели.

Для анализа наблюдаемости следует определить матрицу C, которая связывает значения отклонения углов ЭА и перетоки мощности. Число выходов ЭЭО равно числу k перетоков мощности, которое для системы (1) равно $k=n-1$. Поэтому матрица C имеет вид

$$\mathrm{C}=\begin{bmatrix}\mathrm{C}_0 & 0_{k\times n} & 0_{k\times n} & 0_{k\times n}\end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\mathrm{C}_0\in\mathrm{R}^{k\times n}$ — матрица связей между отклонениями углов и перетоками мощностей. Для схемы рис. 1 матрица связей имеет вид

$$\mathrm{C}_0=\begin{bmatrix}\rho_{14} & 0 & 0 & -\rho_{14} & 0 & 0\\ 0 & \rho_{24} & 0 & -\rho_{24} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \rho_{36} & 0 & 0 & -\rho_{36}\\ 0 & 0 & 0 & \rho_{45} & -\rho_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{56} & -\rho_{56}\end{bmatrix}. \quad (6)$$

Данная матрица имеет полный ранг по строкам, равный k, при условии ненулевых значений параметров ρ_{ig}, что соответствует всем представленных на рис. 1 перетокам активной мощности.

Анализ наблюдаемости (1) требует формирования неполной матрицы наблюдаемости, число столбцов которой в общем случае равно или превышает число строк. Это необходимо для

того, чтобы минимальный ранг матрицы был рангом по строкам, поскольку число строк полной и неполной матрицы наблюдаемости одно и то же.

Утверждение 2. Матрица наблюдаемости для ЭЭО (1) имеет вид

$$\mathrm{S_y} = \left[\mathrm{S_{y1}} \quad \mathrm{S_{y2}} \quad \mathrm{S_{y3}} \quad \mathrm{S_{y4}} \quad \mathrm{S_{y5}}\right], \qquad (7)$$

причем столбцы представляются в форме

$$\mathrm{S_{y1}} = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_0^T \\ 0_{n\times k} \\ 0_{n\times k} \\ 0_{n\times k} \end{bmatrix}; \mathrm{S_{y2}} = \begin{bmatrix} 0_{n\times k} \\ \mathrm{C}_0^T \\ 0_{n\times k} \\ 0_{n\times k} \end{bmatrix}; \mathrm{S_{y3}} = \begin{bmatrix} -\mathrm{R}_\rho^T \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ -\mathrm{T_y} \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ 0_{n\times k} \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{S_{y4}} = \begin{bmatrix} \mathrm{R}_\rho^T \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T}_y \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ \varepsilon \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ -(\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T}_y + \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ -\mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{S_{y5}} = \begin{bmatrix} -(\mathrm{R}_\rho^T \overline{\mathrm{T}}_a \varepsilon + \mathrm{K}_1 \overline{\mathrm{T}}_C \mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ (\mathrm{R}_\rho^T \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T}_y - \mathrm{T}_y \overline{\mathrm{T}}_a \varepsilon - K_\Omega \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} (\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T_y} + \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) - \\ -\mathrm{K}_2 \overline{\mathrm{T}}_C \mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ (\overline{\mathrm{T}}_a \varepsilon + \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} (\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T_y} + \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п})) \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \\ (\mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} (\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{T_y} + \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) + \overline{\mathrm{T}}_C \mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}) \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T \end{bmatrix},$$

где $\varepsilon = (-\mathrm{R}_\rho^T + \mathrm{T_y} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{a} \mathrm{T_y} + \mathrm{K}_\Omega \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п})$.

Доказательство. Матрицы $\mathrm{A}^T, \mathrm{C}^T$ из (4) имеют вид

$$\mathrm{C}^T = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_0^T \\ 0_{n\times k} \\ 0_{n\times k} \\ 0_{n\times k} \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{A}^T = \begin{bmatrix} 0_{n\times n} & -\mathrm{R}_\rho^T \overline{\mathrm{T}}_a^T & 0_{n\times n} & \mathrm{K}_1 \overline{\mathrm{T}}_C^T \\ \mathrm{E}_{n\times n} & -\mathrm{T}_и^T \overline{\mathrm{T}}_a^T & {}_2\mathrm{K}_\Omega^T \overline{\mathrm{T}}^T & \mathrm{K}\ \overline{\mathrm{T}}_C^T \\ 0_{n\times n} & \overline{\mathrm{T}}_a^T & -\overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}^T & 0_{n\times n} \\ 0_{n\times n} & 0_{n\times n} & -\mathrm{K}_\mathrm{п}^T \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}^T & -\overline{\mathrm{T}}_C^T \end{bmatrix}.$$

Все матрицы, кроме R_ρ, диагональные, поэтому

$$\overline{\mathrm{T}}_a^T = \overline{\mathrm{T}}_a; \quad \overline{\mathrm{T}}_C^T = \overline{\mathrm{T}}_C; \quad \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}^T = \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п}; \quad \mathrm{T_y}^T = \mathrm{T_y};$$

$$\mathrm{K}_\Omega^T = \mathrm{K}_\Omega; \quad \mathrm{K}_\mathrm{п}^T = \mathrm{K}_\mathrm{п}; \quad \mathrm{K}_1^T = \mathrm{K}_1.$$

Далее доказательство утверждения совпадает с доказательством утверждения 1. Отличие состоит в использовании (4) вместо (2). Полученный результат позволяет сформулировать теорему.

Теорема 2. Система (1) полностью наблюдаема тогда, когда матрица C_0^T имеет полный ранг по столбцам.

Доказательство. Пусть ранг матрицы C_0^T — полный по столбцам. Необходимо доказать, что система является полностью наблюдаемой. Как и в теореме 1, ранг результирующей неполной матрицы наблюдаемости определяется по строкам. Все матричные параметры модели (1) — это квадратные матричные блоки из $R^{n\times n}$, а все матричные блоки матрицы A (кроме R_ρ) — диагональные.

Представленное в (7) расположение «аналитических нулей» позволяет утверждать, что строки неполной матрицы невозможно выразить друг через друга, если полный ранг имеют следующие блочные элементы: C_0^T, $\overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T$, $-\mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_a \mathrm{C}_0^T$. Полный ранг первого из этих блоков, соответствующего первым двум блочным столбцам (7), предполагается по условию. Левые множители — $\overline{\mathrm{T}}_a$ и $\left(-\mathrm{K}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_\mathrm{п} \overline{\mathrm{T}}_a\right)$ — двух других блоков являются диагональными матрицами, все диагональные элементы которых в силу особенностей системы не равны нулю. В качестве аналога этих множителей можно выбрать матрицу $\mathrm{A} = \mathrm{diag}(\alpha_i)$, $\alpha_i \neq 0$, $i = \overline{1,n}$. Тогда AC_0^T, где C_0 типа (6), $n = 6$, для (1) примет вид

$$\mathrm{AC}_0^T = \begin{bmatrix} \alpha_1\rho_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2\rho_{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3\rho_{36} & 0 & 0 \\ -\alpha_4\rho_{14} & -\alpha_4\rho_{24} & 0 & \alpha_4\rho_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_5\rho_{45} & \alpha_5\rho_{56} \\ 0 & 0 & -\alpha_6\rho_{36} & 0 & -\alpha_6\rho_{56} \end{bmatrix}. \qquad (8)$$

Очевидно, что согласно (6) и (8) AC_0^T и C_0^T имеют одни совпадающие нулевые элементы, а соответственно, ненулевые элементы этих матриц располагаются на соответствующих местах. Отсюда следует, что ранг матриц типа AC_0^T —

полный по столбцам в случаях, когда полный ранг по столбцам имеет матрица C_0^T, что гарантируется условием.

Таким образом, все требуемые блочные элементы неполной матрицы наблюдаемости (7) имеют полный ранг по столбцам, поскольку блочные строки (7) невозможно представить в виде линейной комбинации других, равно как и элементы внутри каждого из блоков строк в силу особой структуры матрицы C_0^T. Поэтому все строки матрицы (7) линейно независимы. Из этого следует полный ранг по строкам как неполной матрицы наблюдаемости, так и полной. Это приводит к утверждению о полной наблюдаемости системы (1), как только C_0^T имеет полный ранг по столбцам.

Следствие 4. Важным следствием из теоремы является эквивалентность двух формулировок: «имеется возможность осуществить передачу мощности между любыми двумя узлами ЭЭО прямо или посредством других узлов» и «матрица C_0^T имеет полный ранг по столбцам». Действительно, полнота ранга означает, что каждый узел связан хотя бы с одним другим узлов, и, таким образом, можно для любых двух узлов определить «цепь передачи» мощности, включающую одну или несколько линий, осуществляющих перетоки активной мощности.

Теорема определяет только *достаточное* условие наблюдаемости. Чтобы доказать необходимое условие, требуется исследовать полную матрицу наблюдаемости, состоящую из $4n$ блочных столбцов, которые имеют размер k по числу выходных сигналов.

Анализ модели сокращенного порядка [7, 8]. Предполагая квазистатическое поведение ЭЭО (1) [9, 10], т. е. выполнение условий о том, что изменению подвергаются только частоты ω_i и углы φ_i, а другие координаты состояния неизменны, модель (1) можно преобразовать к виду

$$\begin{bmatrix}\Phi'\\ \Omega'\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0_{n\times n} & E_{n\times n}\\ \overline{T}_a(-R_\rho + K_{\Pi}K_1) & \overline{T}_a(-T_y + K_\Omega + K_\pi K_2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Phi\\ \Omega\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ -\overline{T}_a K_\pi K_C\end{bmatrix}u + \begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ -\overline{T}_a\end{bmatrix}\mu;\ \ s = \begin{bmatrix}C_0 & 0_{k\times n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Phi\\ \Omega\end{bmatrix}. \quad (9)$$

Для квазистатической модели (9) справедливы теоремы 1 и 2 о необходимых условиях управляемости и наблюдаемости, и с ее помощью можно перейти от модели для отклонений абсолютных углов и значений активной мощности к модели для взаимных углов $\varphi_{kl} = \varphi_l - \varphi_k$ относительного первого ЭА и значений перетоков активной мощности $s_{kl} = s_l - s_k$, а это необходимо для задачи идентификации.

Для этого необходимо ввести переходную матрицу I и матрицу P связей между взаимными углами и перетоками активной мощности:

$$\tilde{\mathrm{I}} = \begin{bmatrix}\mathrm{I} & 0_{n\times n}\\ 0_{n\times n} & \mathrm{I}\end{bmatrix},$$

$$\mathrm{I} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};$$

$$\mathrm{P} = \begin{bmatrix}0 & \rho_{13} & 0 & 0 & 0\\ -\rho_{23} & \rho_{23} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -\rho_{34} & \rho_{34} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -\rho_{45} & \rho_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & -\rho_{56} & \rho_{56}\end{bmatrix}.$$

Тогда модель (9) примет искомый вид

$$\begin{bmatrix}\tilde{\Phi}'\\ \tilde{\Omega}'\end{bmatrix} = \tilde{\mathrm{I}}^{-1}\begin{bmatrix}0_{n\times n} & E_{n\times n}\\ \overline{\mathrm{T}}_a(-\mathrm{R}_\rho + \mathrm{K}_\pi\mathrm{K}_1) & \overline{\mathrm{T}}_a(-\mathrm{T}_y + \mathrm{K}_\Omega + \mathrm{K}_\pi\mathrm{K}_2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{\Phi}\\ \tilde{\Omega}\end{bmatrix} + \tilde{\mathrm{I}}^{-1}\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ -\overline{\mathrm{T}}_a\mathrm{K}_\pi\mathrm{K}_C\end{bmatrix}u + \tilde{\mathrm{I}}^{-1}\begin{bmatrix}0_{n\times n}\\ -\overline{\mathrm{T}}_a\end{bmatrix}\mu; \quad (10)$$

$$s = \begin{bmatrix}\mathrm{P} & 0_{m\times n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{\Phi}\\ \tilde{\Omega}\end{bmatrix}.$$

Для (10) также справедливы теоремы 1 и 2, поскольку эта модель эквивалентна (9) с точностью до неособенного преобразования подобия.

Таким образом, в работе показано, что математическая модель ЭЭО полностью управляема по управляющим воздействиям и наблюдаема в случае полноты ранга матриц K_C и C_0^T по строкам. Осуществлен переход к модели, построенной на взаимных углах отклонения, и для нее определены свойства управляемости и наблюдаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андерсон, П.** Управление энергосистемами и устойчивость [Текст] / П. Андерсон, А. Фуад; Пер. с англ.— М.: Энергия, 1980.— 568 с.

2. **Веников, В.А.** Переходные процессы в электрических системах [Текст] / В.А. Веников, Л.А. Жуков.— М.: Госэнергоиздат, 1953.— 233 с.

3. **Стернинсон, Л.Д.** Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах [Текст] / Л.Д. Стернинсон.— М.: Энергия, 1975.— 216 с.

4. **Козлов, В.Н.** Управление частотой и перетоками активной мощности электроэнергетических объединений с учетом энергетической безопасности [Текст] / В.Н. Козлов // Изв. РАН. Энергетика.— 2012. № 3.— С. 128–143.

5. **Козлов, В.Н.** Функциональный анализ (с приложениями в энергетике) [Текст] / В.Н. Козлов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 390 с.

6. **Козлов, В.Н.** Негладкие системы, операторы оптимизации и устойчивость энергообъединений [Текст] / В.Н. Козлов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

7. **Васильев, А.Ю.** Редукция многомерных систем на основе распределения весов входных и выходных сигналов [Текст] / А.Ю. Васильев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.— 2011. № 2(120).— С. 118–123.

8. **Васильев, А.Ю.** Синтез регуляторов по выходу для линейных объектов [Текст] / А.Ю. Васильев, В.Е. Куприянов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.— 2011. № 6(138), Т. 1.— С. 170–172.

9. **Воропай, Н.И.** Упрощение математических моделей динамики электроэнергетических систем [Текст] / Н.И. Воропай.— Новосибирск: Наука, 1981.— 112 с.

10. **Щедрин, Н.Н.** Упрощение электрических систем при моделировании [Текст] / Н.Н. Щедрин.— М.-Л.: Энергия, 1966.— 160 с.

REFERENCES

1. **Anderson P., Fuad A.** Upravlenie energosistemami i ustoichivost' [Tekst] / Per. s angl.— M.: Energiia, 1980.— 568 s. (rus.)

2. **Venikov V.A., Zhukov L.A.** Perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh [Tekst].— M.: Gosenergoizdat, 1953.— 233 s. (rus.)

3. **Sterninson L.D.** Perekhodnye protsessy pri regulirovanii chastoty i moshchnosti v energosistemakh [Tekst].— M.: Energiia, 1975.— 216 s. (rus.)

4. **Kozlov V.N.** Upravleniye chastotoy i peretokami aktivnoy moshchnosti elektroenergeticheskikh obyedineniy s uchetom energeticheskoy bezopasnosti [Tekst] // Izv. RAN. Energetika.— 2012. № 3.— S. 128–143. (rus.)

5. **Kozlov V.N.** Funktsional'nyi analiz (s prilozheniiami v energetike) [Tekst].— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2012.— 390 s. (rus.)

6. **Kozlov V.N.** Negladkie sistemy, operatory optimizatsii i ustoichivost' energoob"edinenii [Tekst].— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. (rus.)

7. **Vasil'ev A.Yu.** Reduktsiia mnogomernykh sistem na osnove raspredeleniia vesov vkhodnykh i vykhodnykh signalov [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie.— 2011 № 2(120).— S. 118–123. (rus.)

8. **Vasil'ev A. Yu., Kupriianov V.E.** Sintez reguliatorov po vykhodu dlia lineinykh ob"ektov [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie.— 2011. № 6(138), T. 1.— S. 170–172. (rus.)

9. **Voropai N.I.** Uproshchenie matematicheskikh modelei dinamiki elektroenergeticheskikh system [Tekst].— Novosibirsk: Nauka, 1981.— 112 s. (rus.)

10. **Shchedrin N.N.** Uproshchenie elektricheskikh sistem pri modelirovanii [Tekst].— M.-L.: Energiia, 1966.— 160 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗЛОВ Владимир Николаевич — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: umo@citadel.stu.neva.ru
ВАСИЛЬЕВ Андрей Юрьевич — аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vasyliev.tau@gmail.com

AUTHORS

KOZLOV Vladimir N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: umo@citadel.stu.neva.ru

VASILIEV Andrei Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vasyliev.tau@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.311.22(075.8)

В.Г. Киселёв

СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОКА УСТАНОВКАМИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

V.G. Kiselev

REDUCTION IN THE CURRENT DRAIN BY THE INSTALLATIONS OF CATHODIC PROTECTION

В статье выполнены анализ и систематизация основных факторов, оказывающих влияние на потребление тока системой катодной защиты подземных металлических коммуникаций от коррозии. Подробно рассмотрены и систематизированы причины, оказывающие влияние на потребление тока и потери мощности в цепи постоянного тока электрохимической защиты от коррозии, и приведены практические рекомендации по их снижению.

КОРРОЗИЯ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ЗАЩИТА ОТ НАРУЖНОЙ КОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ.

In the article is produced the analysis and the systematization of the basic factors, which have an effect on current drain by the system for the cathode protection of underground metallic communications from corrosion. The basic reasons, which have an effect on the current drain and power loss in the direct-current circuit of electrochemical corrosion protection, are in detail examined and systematized, and practical recommendations regarding their decrease are given.

CORROSION. ELECTROCHEMICAL CORROSION. CATHODIC PROTECTION. ELECTROCHEMICAL CORROSION PROTECTION. PROTECTION FROM THE EXTERNAL CORROSION OF UNDERGROUND METALLIC COMMUNICATIONS.

При разработке, строительстве и эксплуатации энергетических объектов различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. Защита от коррозии является технико-экономической проблемой, и, следовательно, при выборе конкретных антикоррозионных мероприятий требуется учет их стоимости. Кроме того, вид конкретного антикоррозионного мероприятия в значительной степени определяет надежность энергетического оборудования, работающего в агрессивных условиях. В последние годы отмечены резкий рост отказов, возникающих при эксплуатации подземных металлических коммуникаций (ПМК), в первую очередь по причине низкой эффективности их антикоррозионной защиты, и, следовательно, повышенные затраты на их ремонт и обслуживание. Кроме того, аварии приводят к усилению социальной напряженности в обществе, что особенно характерно для крупных городов. В силу этого особую актуальность приобретают мероприятия по повышению надежности и снижению стоимости комбинированной антикоррозионной защиты ПМК, рассмотрению экономической эффективности которой и посвящена данная статья.

Основные направления оценки экономической эффективности комбинированной антикоррозионной защиты ПМК

В соответствии с ГОСТ 9.602–2005 [1] и ГОСТ Р 51164–98 [2] критерием технической эффективности комбинированной защиты от коррозии, включающей как защитное антикоррозионное покрытие, так и электрохимическую защиту (ЭХЗ), является выполнение двух групп требований:

к защитному покрытию (качество антикоррозионных материалов, технологии нанесения покрытия, свойства готового покрытия);

к величине защитного потенциала без его омической составляющей (поляризационный потенциал), который, как правило, должен находиться в пределах от (–0,85) до (–1,15) В по медно-сульфатному электроду сравнения в течение всего срока службы объекта.

В рамках данной работы будем считать, что указанные технические условия безусловно выполнены, и, следовательно, основной проблемой возникающей при оценке экономической эффективности комбинированной защиты от коррозии является оптимизация параметров именно электрохимической (катодной) защиты, поскольку оценка экономической эффективности покрытий обычно не представляет затруднений и эти данные широко распространены в специальной литературе. Такой подход позволяет считать «полезной работой» работу, затрачиваемую системой катодной защиты для достижения поляризационного потенциала, т. е. осуществляемую для смещения потенциала сооружения от его стационарной величины (коррозионный потенциал $\varphi_к$) до его защитного потенциала без омической составляющей $(\varphi_з)$. Поляризационный потенциал, как было уже сказано, должен находиться в пределах от (–0,85) до (–1,15) В по медно-сульфатному электроду сравнения.

В зависимости от конкретных условий коррозии $\varphi_к$ изменяется, хотя и не очень сильно. Эти колебания, которые обычно составляют величину порядка нескольких десятых вольта, обусловлены характером грунта, степенью его аэрации, влажности и рядом других причин. Также и $\varphi_з$ — величина не постоянная, но ее изменения в пределах, указанных ранее, обусловлены прежде всего требованиями заказчика и квалификацией проектировщика, а также возможностями конкретной установки катодной защиты. Следовательно, оптимизация параметров электрохимической защиты привязана в определенных пределах к конкретным условиям, и корректное сравнение различных систем ЭХЗ возможно только с учетом этого обстоятельства.

Все остальные затраты, связанные с прохождением электрического тока при катодной защите ПМК, можно отнести к потерям (прежде всего к тепловым потерям), которые целесообразно разбить на следующие пять групп:

связанные с преобразованием переменного электрического тока в постоянный ток;

связанные с излишне высоким защитным потенциалом ПМК, обусловленные недостаточной эффективностью системы регулировки защитного потенциала;

потери в цепи линии переменного (питающего) тока;

потери в цепи постоянного (защитного) тока;

обусловленные низким уровнем мероприятий по сокращению защитного тока на ПМК.

Рассмотрим эти группы несколько подробнее. Первые две группы тесно связаны с существующим уровнем техники в области источников постоянного тока для катодной защиты и систем регулировки, в том числе автоматической регулировки защитного потенциала, и в основном определяются рынком соответствующей продукции. Поэтому учет их влияния на экономическую эффективность ЭХЗ при конкретных условиях проектирования относительно прост и не требует специального рассмотрения. Третья группа в значительной степени определяется взаиморасположением ПМК и источников переменного тока, и, следовательно, корректное ее рассмотрение невозможно без соответствующих данных. С другой стороны, при их наличии учет влияния потерь в линии питания на экономическую эффективность катодной защиты не представляет серьезных затруднений, и поэтому в силу ограниченного объема статьи анализ этого здесь не приводится.

Значительно большее влияние на уровень стоимости строительства и эксплуатации систем катодной защиты оказывают потери, указанные в пунктах третьем и четвертом. Поэтому остановимся на их анализе несколько подробнее.

Потери в цепи защитного тока и основные способы их сокращения

Анализу процессов, протекающих в цепи защитного тока, в последнее время уделяется большое внимание. Так, например, в справочнике по катодной защите [3] этот анализ проведен для морских сооружений (шпунтовая стена) с использованием следующей формулы:

$$P_{=} = R_{Kreis} i_s^2 A^2 + 2 i_s A P + P^2 / R_{Kreis}, \qquad (1)$$

где $P_{=}$ — мощность по постоянному току, расходуемая на катодную защиту; i_s — плотность

защитного тока; A — площадь защищаемой поверхности; P — смещение поляризационного потенциала защищаемой поверхности; R_{Kreis} — омическое падение напряжения на всех элементах цепи защитного тока (в данной формуле отдельно не учитывается анодная поляризация).

Использование формулы (1) для анализа экономической эффективности ПМК, помимо относительно легко преодолимых трудностей, обусловленных различием объектов и коррозионных сред, имеет и более существенные недостатки, связанные с отсутствием в рамках заявленного подхода возможности для анализа электрохимических процессов, протекающих в системе катодной защиты, и их влияния на потребляемую мощность. Значительно более удобным и наглядным является метод анализа с применением напряжений, который широко используется для оценки эффективности электрохимических процессов. В этом случае обычно применяется следующая формула:

$$E = (E_a - E_k) + |\eta_a| + |\eta_k| + \\ + E_{\text{э-т}} + E_{\text{конт}} + E_{\text{соед пр}}, \qquad (2)$$

где E — напряжение на выходе преобразователя катодной защиты; E_a — стационарный (коррозионный) потенциал анодного заземления; E_k — стационарный (коррозионный) потенциал защищаемого сооружения. $|\eta_a|$ и $|\eta_k|$ — абсолютные величины соответственно анодного и катодного перенапряжения; $E_{\text{э-т}}$ — падение напряжения на сопротивлении электролита; $E_{\text{конт}}$ — падение напряжения на контактах в цепи постоянного тока; $E_{\text{соед пр}}$ — падение напряжения на соединительных проводах (кабели) цепи постоянного тока.

Проведем краткий анализ влияния отдельных составляющих формулы (2) на величину потерь в цепи постоянного тока:

Влияние величины $(E_a - E_k)$. E_a и E_k определяются конкретными условиями коррозии анодного заземления и подземного металлического сооружения (ПМС). Колебания этих величин обычно составляют несколько десятых вольта, а токи в цепи постоянного тока крайне малы, что приводит к незначительному влиянию этих параметров на значение потерь мощности в этой цепи. Кроме того, необходимо отметить, что при использовании анодов, изготовленных из электроотрицательных материалов, при их растворении вместо потерь будет получен некоторый выигрыш в электрической мощности за счет использования их химической энергии. Все это приводит к тому, что при практических расчетах данный фактор, как правило, не принимают во внимание.

Влияние анодного перенапряжения η_a. На основании практических измерений [4] при катодной защите ПМК в грунте установлено, что на анодном заземлении за счет торможения электрохимического процесса наблюдается падение потенциала в пределах от одного до двух вольт. Это достаточно большая величина (она, как правило, составляет от 10 до 20 % общего падения напряжения на анодном заземлении при катодной защите в грунте). Поэтому ее формирование требует специального анализа. Рассмотрение будем проводить для электрохимического процесса любого типа. В общем виде с использованием традиционных обозначений он может быть представлен в следующей форме:

$$Ox + ze \leftarrow R. \qquad (3)$$

Здесь знаком « ← » показано направление (анодное) реакции. В соответствии с кинетической теорией электрохимических процессов анодный ток $\vec{i}$ (катодным током в этом случае можно пренебречь) будет определяться следующим уравнением [5]:

$$\vec{i} = i_{\text{o}} e^{-\frac{A}{RT}} e^{\frac{(\alpha z - z_{Ox})\zeta}{RT}} e^{\frac{(1-\alpha) z F \eta_a}{RT}}, \qquad (4)$$

где i_{o} — ток обмена, который, в свою очередь, определяется формулой

$$i_{\text{o}} = zFk_{\text{o}} C_{Ox}^{1-\alpha} C_R^{\alpha}, \qquad (5)$$

или

$$i_{\text{o}} = i_{\text{сто}} C_{Ox}^{1-\alpha} C_R^{\alpha}, \qquad (6)$$

z — число электронов, принимающих участие в электрохимической реакции; F — число Фарадея; $i_{\text{сто}}$ — стандартный ток обмена, $i_{\text{сто}} = zFk_{\text{o}}$; C_R и C_{Ox} —концентрации соответственно восстановленного и окисленного компонентов электрохимического процесса. Экспоненты, входящие в уравнение (4), ответственны за различные параметры электрохимической реакции. Так $e^{-\frac{A}{RT}}$ отвечает за наличие ингибиторов

(энергия активации $A > 0$) или активаторов процесса (энергия активации $A < 0$). Соответственно R и T в этом выражении, как и в дальнейшем, обозначают универсальную газовую постоянную и абсолютную температуру. Экспонента $e^{\frac{(\alpha z - z_{Ox})\zeta}{RT}}$ ответственна за изменение тока при наличии потенциала; α и z_{Ox} обозначают соответственно коэффициент распределения и заряд окисленного компонента реакции (3). Наконец, величина $e^{\frac{(1-\alpha)zF\eta_a}{RT}}$ характеризует зависимость анодного тока $\vec{i}$ от величины анодного перенапряжения η_a на жертвенных анодах.

Для получения зависимости η_a ($\eta_a > 0$) от различных параметров прологарифмируем уравнение (4) с учетом равенств (5) и (6). Тогда получим следующее соотношение

$$\eta_a = -\frac{RT}{(1-\alpha)zF}\ln i_{\text{сто}} - \frac{RT}{zF}\ln C_{Ox} -$$

$$-\frac{RT}{zF}\frac{\alpha}{1-\alpha}\ln C_R - \frac{\alpha z - z_{Ox}}{(1-\alpha)z}\zeta + \frac{RT}{(1-\alpha)zF}\ln|i_a|. \quad (7)$$

Точный расчет анодного перенапряжения весьма затруднен в силу многообразия и изменчивости видов почвенного электролита и широкого диапазона возможных потенциалов при реальной катодной защите ПМК, однако формула (7) позволяет наглядно показать основные возможности снижения величины η_a. Действительно, рост $i_{\text{сто}}$, C_{Ox} и C_R способствует снижению анодного перенапряжения, в то время как рост по абсолютной величине анодного тока ($i_a < 0$) его повышает. Потенциал ζ в зависимости от знака заряда реагирующих частиц может способствовать как повышению, так и понижению анодного перенапряжения. Однако на практике его влияние крайне мало и с трудом поддается учету, поэтому обычно этой величиной пренебрегают. Совокупный анализ формул (3)–(7) позволяет сделать рекомендовать для снижения величины анодной поляризации следующее:

контролировать возможное наличие ингибиторов и устранять их с заменой активаторами анодного процесса;

снижать величину ζ-потенциала, в частности путем добавления легкорастворимых соединений, с целью локализации перенапряжения в плотной части двойного электрического слоя;

увеличивать плотность тока обмена i_o за счет использования легкорастворимых анодных материалов и повышения концентрации растворителя с соответствующим повышением концентрации компонентов, принимающих участие в анодном процессе.

Этот перечень рекомендаций не является исчерпывающим, так как помимо чисто электрохимического перенапряжения существуют и другие его виды, но их рассмотрение выходит за рамки данной статьи. Кроме того, следует отметить, что влияние других видов перенапряжения может приводить к катастрофическому выходу из строя анодных заземлений. Такие явления наблюдались при значительных анодных токах в высокоминерализованных грунтовых водах и сопровождались образованием диэлектрических отложений на поверхности жертвенных анодов.

Влияние величины катодного перенапряжения η_k. По аналогии с анодным перенапряжением для величины катодного перенапряжения на ПМК можно получить следующую формулу:

$$\eta_k = \frac{RT}{\alpha zF}\ln i_{\text{сто}} + \frac{RT}{zF}\frac{1-\alpha}{\alpha}\ln C_{Ox} + \frac{RT}{\alpha zF}\ln C_R +$$

$$+\frac{\alpha z - z_{Ox}}{z}\zeta - \frac{RT}{\alpha zF}\ln|i_k|. \quad (8)$$

Катодный ток в этой формуле считается положительным ($i_k > 0$), а катодная поляризация — отрицательной ($\eta_k < 0$). По аналогии с влиянием анодного перенапряжения рост (по абсолютной величине) катодного перенапряжения наблюдается при сокращении $i_{\text{сто}}$, C_{Ox}, C_R и увеличении i_k. Однако для минимизации потерь в цепи защитного тока, в отличие от анодной поляризации, для η_k, наоборот, требуется максимальный рост при возможно малом защитном токе. В этом случае рост потерь мощности, обусловленный собственно катодной поляризацией защищаемого сооружения, с лихвой перекрывается выигрышем энергии на других сопротивлениях в цепи постоянного тока, а анализ формулы (8) позволяет сделать следующие рекомендации по увеличению абсолютной величины катодной поляризации:

контролировать возможное наличие активаторов реакции и устранять их заменой ингибиторами катодного процесса;

снижать плотность тока обмена i_o путем снижения концентрации окислителя (кислород, ионы водорода и т. д.) или, в случае наличия такой возможности, подбором соответствующих материалов для ПМК.

Как и в случае анодной поляризации, данный перечень не является исчерпывающим, ибо помимо чисто электрохимического перенапряжения существуют и другие его виды.

Влияние величины падения напряжения $E_{\text{конт}}$ на контактах в цепи постоянного тока. Из практики известно, что обычно падение напряжения на всех контактах в цепи постоянного тока ограничено величиной 0,05 В. Однако и это падение потенциала при больших токах защиты может вызывать потери мощности до 5 Вт и более, что при ухудшении качества соединений может приводить к катастрофическому выходу из строя систем ЭХЗ.

Влияние величины падения напряжения $E_{\text{соед пр}}$ на соединительных проводах (кабелях) в цепи постоянного тока. Протяженность соединительных проводов в цепи постоянного тока определяется геометрией площадки, на которой должна быть расположена система ЭХЗ, и возможным вредным влиянием системы катодной защиты на смежные подземные металлические сооружения. Для сокращения потерь мощности в этих условиях должна быть минимизирована протяженность проводов (кабеля). Пусть она составит l_k метров.

Выбор оптимального сечения кабеля постоянного тока обычно производят при помощи специального графика (смотри, например, справочник [4]) исходя из величины защитного тока, типа кабеля и срока службы установки электрохимической защиты или из величины максимально допустимого падения напряжения на нем, величина которого не должна превосходить 2 В. Кроме того, оптимальное сечение n кабеля, выраженное в квадратных миллиметрах, может быть определено и по следующей формуле:

$$n = I_s \sqrt{\frac{R_1 C t T}{w K_1}}, \qquad (9)$$

где I_s — величина защитного тока; K_1 — стоимость одного погонного метра кабеля сечением в один квадратный миллиметр; C — стоимость одного киловатт·часа электроэнергии; w — коэффициент полезного действия преобразователя; T — срок службы установки электрохимической защиты; R_1 — сопротивление одного погонного метра кабеля сечением в один квадратный миллиметр; t — число часов в году.

Тогда общие потери мощности P_k на омическом сопротивлении кабеля при оптимизации его сечения составят

$$P_k = I_s^2 \frac{R_1}{n}. \qquad (10)$$

Следовательно, при условии выбора оптимального сечения n кабеля тепловые потери на нем растут пропорционально увеличению удельного сопротивления материала кабеля и в квадратичной зависимости от роста защитного тока.

Влияние падения напряжения в электролите $E_{\text{э-т}}$. Традиционные системы электрохимической защиты характеризуются таким взаиморасположением защищаемых ПМК и анодных заземлений, при котором можно считать, что они находятся на бесконечном удалении друг от друга с точки зрения омического сопротивления между ними. Такой подход позволяет разбить $E_{э-m}$ на две части, независимые друг от друга, т. е. использовать следующую формулу:

$$E_{\text{э-т}} = E_{\text{т}} + E_a, \qquad (11)$$

где $E_{\text{т}}$ — падение напряжения на омическом сопротивлении растекания ПМК (трубопровода), равном $R_{\text{т}}$; E_a — падение напряжения на омическом сопротивлении растекания анодного заземления.

Тогда для общего сопротивления электролита $R_{\text{э-т}}$ можно записать следующее выражение:

$$R_{\text{э-т}} = R_{\text{т}} + R_a. \qquad (12)$$

Отсюда непосредственно следует, что изменение величин $E_{\text{э-т}}$ и $R_{\text{э-т}}$ линейно зависит от изменений параметров как анодного заземления, так и трубопровода. Следовательно, этот анализ можно проводить порознь для каждого из этих объектов.

Начнем рассмотрение с анодного заземления. Выбор оптимального количества анодов для срока службы T анодного заземления может быть рассчитан по следующей формуле [6]:

$$n_a = I_s \sqrt{\frac{F R_0 \rho C t T}{\rho_0 w K_0}} \qquad (13)$$

где F — фактор взаимовлияния анодов, определяющий увеличение сопротивления анодного

устройства в результате взаимного экранирования отдельных анодов, эта величина обычно колеблется в пределах от 1 до 2,5; t — количество часов в году, $t = 8760$ часов; T — расчетный срок эксплуатации анодного заземления (годы); ρ — удельное сопротивление грунта в районе расположения анодного заземления, которое может колебаться в очень широких пределах; C — стоимость одного киловатт/часа электроэнергии; K_0 — стоимость отдельного анода, включая его установку; w — коэффициент полезного действия преобразователя; R_0 — сопротивление растекания отдельного анода при удельном сопротивлении грунта ρ_0, равном 10 ом × м.

Тогда общие потери мощности P_a на омическом сопротивлении анодного заземления при оптимизации количества n_a анодов составят

$$P_k = I_s^2 \frac{R_0}{n_a} F \frac{\rho}{\rho_0}. \qquad (14)$$

Следовательно, при условии выбора оптимального количества анодов в анодном заземлении (n_a) тепловые потери на нем растут линейно с увеличением удельного сопротивления грунта и в квадратичной зависимости от роста защитного тока. Кроме того, они линейно зависят и от геометрии, а также от способа заложения анода, т. е. от величин R_0 и F.

Наряду с уже указанными способами оценки потерь мощности на различных элементах системы ЭХЗ, большое значение имеют мероприятия по ограничению величины защитного тока на защищаемом объекте. Сами по себе потери мощности на трубопроводе в силу больших размеров объекта обычно крайне малы. Действительно, практические измерения показывают, что при электрохимической защите в грунте общее смещение потенциала на сопротивлении растекания трубопровода, как правило, составляет 0,9 В. При этом падение напряжения на омическом сопротивлении составляет приблизительно 0,3 В, а смещение поляризационного потенциала в точке дренирования — соответственно 0,6 В. Очевидно, что в этом случае снижение потерь на всех элементах ЭХЗ может быть достигнуто путем повышения качества изоляции трубопровода и устранения его контактов с другими ПМС. Кроме того, дополнительным фактором, способствующим снижению потребления электрического тока, и в случае трубопровода служит его высокое продольное сопротивление, уменьшение которого способно существенно увеличить зону защиты трубопровода, приходящуюся на одну катодную станцию, и таким образом сократить потребление электрического тока на единицу защищаемой поверхности. При рассмотрении этого вопроса следует упомянуть значительное влияние на величину необходимого защитного тока также и поляризационного сопротивления ПМК. Однако, к сожалению, возможность его изменения при практическом осуществлении ЭХЗ, как правило, крайне мала. Следовательно, рассмотрение этого параметра в рамках данной работы, посвященной практическим вопросам снижения потерь в системе ЭХЗ, вряд ли уместно.

В статье проведен анализ и систематизация основных факторов, оказывающих влияние на потребление тока и потери мощности системой ЭХЗ при катодной защите ПМК от коррозии.

Подробно рассмотрены и систематизированы основные факторы, оказывающие влияние на потребление тока и потери мощности в цепи постоянного тока системы ЭХЗ.

Разработаны практические мероприятия по снижению потерь мощности в цепи постоянного тока системы ЭХЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9.602–2005.** Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Текст] / Госстандарт.— М.: Стандартинформ, 2006.

2. **ГОСТ Р 51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Госстандарт России, 1998.

3. **Bette, U.** Taschenbuch fur den kathodischen Korrosionsschutz [Text] / U. Bette, W. Vesper.— Essen: Vulkan-Verl, 2005.— 367 S.

4. **Von Baeckmann, W.** Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes [Text] / W. von Baeckmann, W. Schwenk.— Verlag Chemie. 1980.— 465 S.

5. **Дамаскин, Б.Б.** Введение в электрохимическую кинетику [Текст]: учебное пособие / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий // М.: Высшая школа, 1975.— 416 с.

6. **Киселев, В.Г.** Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений [Текст] / В.Г. Киселев// Научно-технические ведомости СПб ГПУ.— 2011. № 4(135).— С. 111–116.

REFERENCES

1. **GOST 9.602–2005.** Edinaia sistema zashchity ot korrozii i stareniia; Sooruzheniia podzemnye; Obshchie trebovaniia k zashchite ot korrozii [Tekst].— Moskva: Standartinform, 2006. (rus.)

2. **GOST R 51164–98.** Truboprovody stal'nye magistral'nye. Obshchie trebovaniia k zashchite ot korrozii [Tekst].— Moskva: Gosstandart Rossii, 1998. (rus.)

3. **Bette Ulrich, Vesper Wolfgang.** Taschenbuch fur den kathodischen Korrosionsschutz [Tekst].— Essen: Vulkan-Verl., 2005.— 367 S. (rus.)

4. **W. von Baeckmann, W. Schwenk.** Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes [Tekst].— Verlag Chemie, 1980.— 465 S. (rus.)

5. **Damaskin B.B., Petrii O.A.** Vvedenie v elektrokhimicheskuiu kinetiku [Tekst]: uchebnoe posobie [Tekst] // M.: Vysshaia shkola, 1975.— 416 s. (rus.)

6. **Kiselev V.G.** Osnovnye printsipy proektirovaniia katodnoi zashchity podzemnykh metallicheskikh sooruzhenii [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPb GPU.— 2011. № 4(135).— S. 111–116. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КИСЕЛЁВ Владимир Геннадьевич — доктор технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kis_vg@mail.ru

AUTHORS

KISELEV Vladimir G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kis_vg@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 536.6

В.В. Османов

ГРАДИЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ТЕПЛОМЕТРИИ В ТОПКАХ КОТЛОВ

V.V. Osmanov

GRADIENT HEAT FLUX GAUGES FOR MEASUREMENT IN INDUSTRIAL BOILER FURNACES

В статье описывается принцип действия, процесс создания, исследования и градуировки компактных высокотемпературных градиентных датчиков теплового потока для прямого измерения тепловосприятия ограждающими поверхностями камер сгорания промышленных котлов, приводятся их метрологические характеристики.

ДАТЧИК. ИЗМЕРЕНИЕ. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК. КАМЕРА СГОРАНИЯ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОТЕЛ.

The item describes action principle, development, research, graduation and metrological data of compact high temperature gradient heat flux gauges for direct heat flux density measuring in industrial boiler furnace walling.

THE GAUGE. MEASUREMENT. THERMAL STREAM. FURNACE. POWER BOILERS.

Основная проблема изучения теплообмена в камерах сгорания энергетических котлов — это получение первичной информации о тепловых потоках. Используемая сегодня топочная теплометрия основана на термометрии с применением стационарных калориметров, переносных термозондов (ВНИИМТ, усовершенствованный ВТИ), температурных вставок (ЦКТИ) и др. [1]. Применение этих методов осложнено трудоемкими монтажными операциями, вынужденным внедрением в герметичный контур циркуляции котла и громоздкостью контрольно-измерительных средств и оборудования. Большинства недостатков указанных выше методов лишен метод стационарного прямого измерения воспринятого теплового потока с помощью компактных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) [2, 3]. Значительное преимущество ГДТП — в прямом измерении интегрального воспринятого теплового потока. Датчик представляет собой искусственный многослойный композит, обладающий анизотропией тепло- и электропроводности. При возникновении градиента температуры на его противоположных гранях наблюдается поперечный эффект Зеебека: появляется термоЭДС при прохождении теплового потока через сечение датчика. Разработка и исследования ГДТП на основе природных монокристаллов с рабочей температурой до 500 К ведутся с 1996 года С.З. Сапожниковым, В.Ю. Митяковым и А.В. Митяковым на кафедре теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) [4]. Этой же группой исследователей в 2007 году были созданы ГДТП на основе искусственных композитов из различных материалов. В частности, получены композитные системы из термостойких (до 1300 К) и коррозионностойких (например, никель + + сталь 12Х18Н10Т) материалов [5, 6]. Это открыло новые возможности для применения ГДТП в условиях топок котлов и камер сгорания. Работы в этом направлении получили продолжение на кафедре реакторных и котельных установок» СПбГПУ [7, 8]. Первый опыт применения ГДТП в топочной технике проведен в лабораторных условиях на жаротрубном водогрейном котле ВТГ-80. Тепловая мощность котла — 100 кВт, температура нагрева воды — 370 К, давление в водяном контуре — 0,4 МПа, топливо — соляровое масло. Эксперимент показал работоспособность ГДТП в топочных условиях. Успешное

промышленное освоение ГДТП осуществлено в 2008 году на паровом котле БКЗ-210 ст. № 9 ТЭЦ-4 г. Кирова [7, 9]. Тепловая мощность котла — 140 МВт, температура перегретого пара — 813 К, давление перегретого пара — 14 МПа, топливо — кузнецкий каменный уголь марок Г и Д, фрезерный торф, природный газ. Результаты испытаний показали возможность диагностики топочного режима, процессов шлакования и пульсаций тепловосприятия, но одновременно выявили необходимость совершенствования технологии изготовления ГДТП. Применяемый в лабораторном и промышленном эксперименте способ приварки отходящих от датчика электродов с помощью точечной сварки приводит к охрупчиванию зоны электрода вокруг места сварки и возможности его откалывания от датчика в процессе сборки либо термических нагрузок. Для устранения указанного недостатка предложена технология приварки электродов методом диффузионной сварки, которая обеспечивает большую по сравнению с точечной сваркой площадь контакта электрода с датчиком и высокую механическую прочность. Технология изготовления ГДТП новой конструкции заключается в двухэтапной диффузионной сварке биметаллических (никель + + сталь 12Х18Н10Т) слоистых заготовок — анизотропных термоэлементов. На первом этапе спекается слоистая заготовка, на втором этапе к полученной заготовке диффузионной сваркой привариваются пластины, которые после нарезки будут служить электродами. Полученная заготовка с пластинами нарезается электроискровым методом на собственно датчики (рис. 1).

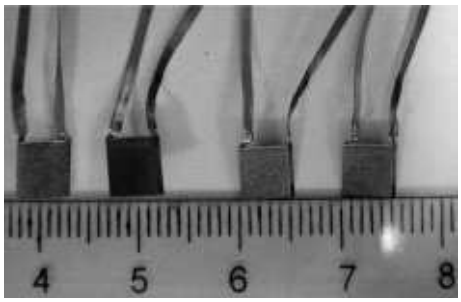


Рис. 1. Образцы ГДТП с электродами

С целью исследования влияния температуры ГДТП на термоЭДС был создан градуировочный стенд с возможностью поддержания заданной температуры датчиков в широком диапазоне плотностей воспринятого теплового потока. В основу абсолютной (джоуль — ленцевой) градуировки ГДТП заложено определение зависимости термоЭДС, генерируемой датчиком, от плотности теплового потока, проходящего сквозь датчик. Градуировочный стенд представляет собой трубку с установленными на ней двумя градуируемыми ГДТП и тремя термопарами для контроля температуры стенки трубки (рис. 2). Коаксиально внутри трубки расположен нагреватель в виде электрической лампы накаливания, а снаружи — защитный кожух. В зазоре между трубкой и кожухом прокачивается холодный воздух с регулируемым расходом для поддержания заданной температуры ГДТП независимо от тепловыделения нагревателя. Толщины стенок трубки и ГДТП близки и составляют соответственно 0,1 и 0,5 мм. Термические сопротивления датчика ($9{,}4\cdot10^{-6}$ м^2·К/Вт) и трубки ($6{,}6\cdot10^{-6}$ м^2·К/Вт)) отличаются незначительно, что обеспечивает практически одинаковую температуру датчика и трубки. За характерную температуру датчиков принимается средняя температура по трем термопарам в стационарном режиме с погрешностью ±5 К. Скорость охлаждающего воздушного потока в зазоре труб составляла 0,5–40 м/с. Принимая толщину кольцевого зазора за характерный размер, можно

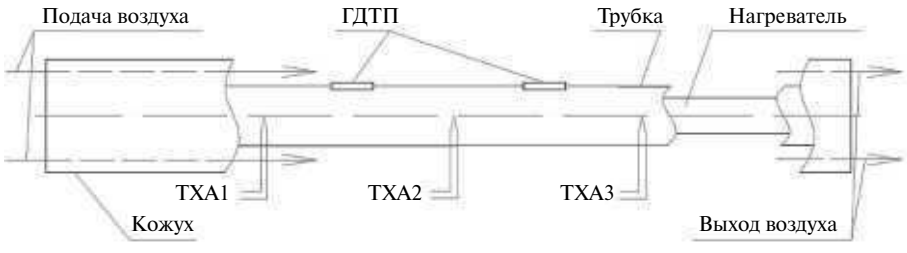


Рис. 2. Градуировочный стенд

получить, что эти скорости соответствуют $Re = 250–2 \cdot 10^4$. Это позволяет обеспечить переход от ламинарного к турбулентному режиму движения с высоким коэффициентом теплоотдачи. Рабочие условия градуировки были близки к внутритопочным: максимальная плотность теплового потока составляла 73 кВт/м^2, температура трубки поддерживалась постоянной и равной 373, 473, 573 и 673 К. Мощность тепловыделения на нагревателе регулируется изменением напряжения. Плотность теплового потока на поверхности трубки, воспринятая датчиком, определялась как

$$q_д = \frac{P}{\pi dl} = \frac{UI}{\pi dl}, \qquad (1)$$

где $q_д$ — воспринятая датчиком плотность теплового потока, Вт/м^2; P — мощность тепловыделения на нагревателе, Вт; d и l — диаметр и длина трубки соответственно, м; U [В] и I [А] — измеренные значения напряжения и силы тока на клеммах нагревателя.

Анализ тепловых потерь проводился на основе термометрической съемки стенда с помощью тепловизора марки Testo 875–2i с погрешностью ±2 К. Так, концевые потери вызваны керамическими клеммниками нагревателя, которые выступают за трубку с ГДТП на 12 мм с каждой стороны, а температура защитного кожуха за счет интенсивного охлаждения воздухом и небольшой толщины стенки (0,1 мм) оставалась постоянной при различной мощности нагревателя и практически не отличалась от температуры в помещении. За счет этого тепловыми потерями от наружного охлаждения кожуха можно пренебречь. Все тепловыделение нагревателя, за исключением концевых потерь, воспринимается трубкой с ГДТП и отводится охлаждающим воздухом, поэтому плотности теплового потока, проходящего сквозь трубку и сквозь датчики, одинаковы. Оценка концевых потерь проводилась по общепринятой методике [10] с учетом конвективной и лучистой составляющих тепловых потерь. Их величина не превышает 2 %.

Методика измерения воспринятого теплового потока с помощью ГДТП состоит в измерении термоЭДС при известной вольт-ваттной чувствительности и площади датчика:

$$q = \frac{E}{S_0 F_д}, \qquad (2)$$

где q — измеряемая с помощью ГДТП воспринятая плотность теплового потока, Вт/м^2; E — измеренное значение термоЭДС, мкВ; S_0 — вольт-ваттная чувствительность, мкВ/Вт; $F_д$ — площадь ГДТП в плане, м^2.

Градуировка ГДТП состоит в определении вольт-ваттной чувствительности. Из одной заготовки отградуированы два датчика. Осуществлена трехкратная повторяемость опытов. Вольт-ваттная чувствительность определялась на основе выражения (2) следующим образом:

$$S_0 = \frac{E}{q_д F_д} = \frac{E\pi dl}{UIF_д}. \qquad (3)$$

Усредненные по двум ГДТП результаты градуировки представлены на рис. 3.

Как показывают результаты градуировки, характер зависимости вольт-ваттной чувствительности от плотности воспринятого теплового потока практически линейный. Среднее значение вольт-ваттной чувствительности в диапазоне плотностей теплового потока 10–73 кВт/м^2 и температур 373–673 К составляет 124 мкВ/Вт. На рис. 3, она стремится к постоянному значению 122 мкВ/Вт, что составляет менее 2 % относительного отклонения от среднего значения.

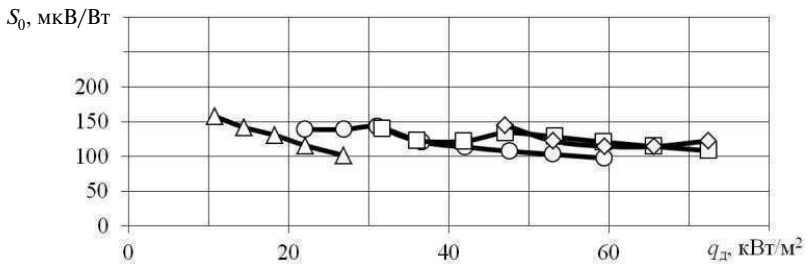


Рис. 3 Результаты градуировки при различных температурах ГДТП:
— 373 К; —473 К; — 573К; — 673 К

Таким образом, при измерении плотности воспринятого теплового потока влиянием температуры ГДТП можно пренебречь. Данный результат демонстрирует важнейшую метрологическую характеристику ГДТП — стабильность вольт-ваттной чувствительности в широком диапазоне температур и плотностей теплового потока.

Анализ погрешности градуировки проведен в соответствии с [11] на основе суммарной стандартной неопределенности. Стандартная неопределенность измерения вольт-ваттной чувствительности составила ΔS_0 = 6 мкВ/Вт и получена через значения термоЭДС, плотности воспринятого датчиком теплового потока и площади ГДТП при 673 К по формуле

$$\Delta S_0 = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2}, \qquad (4)$$

где f — функция, определяемая выражением (3); x — аргумент в выражении (3). Относительная погрешность определения вольт-ваттной чувствительности составила δS_0 = 5,5 %.

Разработаны и созданы ГДТП на основе слоистого анизотропного термостойкого композита Ni + сталь 12Х18Н10Т для теплометрии в топках котлов. Усовершенствована технология приварки электродов к ГДТП с помощью диффузионной сварки, которая обеспечивает большую по сравнению с точечной сваркой площадь контакта электрода с датчиком и высокую механическую прочность. Разработана методика изотермической градуировки датчиков и создан градуировочный стенд. Результаты градуировки демонстрируют стабильную вольт-ваттную чувствительность на уровне 122 мкВ/Вт в широком диапазоне плотностей воспринятого теплового поток при различной температуре. Это позволяет разработать методику градиентной теплометрии в топках современных котлов с использованием ГДТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трембовля, В.И.** Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева.— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 416 с.;

2. **Сапожников, С.З.** Градиентные датчики в нестационарной теплометрии процессов [Текст] / С.З. Сапожников, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков // XIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов.— Москва, 2003.— Т. 1.— С. 127–130.

3. **Митяков, В.Ю.** Градиентная теплометрия в радиационном и сложном теплообмене [Текст] / В.Ю. Митяков, В.В. Османов // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях.— Тез. докл. XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева.— Звенигород, 23–27 мая 2011.

4. **Сапожников, С.З.** Изучение радиационно-конвективных тепловых потоков с помощью градиентных датчиков [Текст] / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников // Вторая Росс. национ. конф. по теплообмену: Тез. докл. науч. конф. 26–30 октября 1998 г.— М., 1998.— Т.6.— С. 331–334;

5. **Сапожников, С.З.** Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте [Текст] / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 203 с;

6. **Пат. 75467 РФ, МПК G 01 K 17/06.** Датчик теплового потока (варианты) [Текст] / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников.— № 2007137839; заявл. 04.10.2007; опубл. 10.08.2008.— Бюл. № 22.

7. **Sapozhnikov S.Z.** Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces [Text] / S.Z. Sapozhnikov, K.A. Grigoryev, V.Yu. Mitiakov, A.V. Mitiakov, Yu.A. Roundyguine, V.V. Osmanov // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.— P. 504–506.

8. **Сапожников, С.З.** Основы градиентной теплометрии [Текст] / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.— 203 с.

9. **Османов, В.В.** Градиентная теплометрия в вихревой топке модернизированного котла БКЗ-210 [Текст] / В.В. Османов, К.А. Григорьев, А.В. Митяков // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Матер. докл. VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова.— Казань, 15–17 сентября 2010 г.— Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2010.— С. 277–280.

10. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.— М.: Энергия, 1975.— 488 с.

11. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 43–2001.

REFERENCES

1. **Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeev A.A.** Thermal testing of boilers [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1991. (rus.)

2. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov A.V., Mitiakov V.Yu.** Gradient gauges in time-dependent heat flux measurement [Tekst] / XIII School-Seminar of Young Scientists and Specialists.— Moscow, 2003.— Vol. 1.— P. 127–130 (rus.)

3. **Mitiakov V.Yu., Osmanov V.V.** Gradient heat flux measurement in the radiative and complex heat transfer [Tekst] // The problems of gas dynamics and heat and mass transfer in new energy technologies: Abstracts of XVIII Workshop for young scientists and specialists under the leadership of A. Leontiev.— Zvenigorod, 23–27 may 2011. (rus.)

4. **Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V., Sapozhnikov S.Z.** Researching of radiation-convective heat flow using gradient sensors [Tekst] // The Second Russian National conference of heat exchange: Abstracts of science conference 26–30 october 1998 г.— Moscow., 1998.— Vol. 6.— P. 331–334. (rus.)

5. **Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux gauges in the heat engineering experiment [Tekst].— Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2007.— 203 p. (rus.)

6. **Pat. 75467 Russia, MPK G 01 K 17/06.** Heat flux sensor (variants) [Tekst] / V.Yu. Mitiakov, A.V. Mitiakov, S.Z. Sapozhnikov.— № 2007137839; appl. 04.10.2007; publ. 10.08.2008.— Bull. № 22. (rus.)

7. **Sapozhnikov S.Z., Grigoryev K.A., Mitiakov, V.Yu. [et all.].** Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces [Text] // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.— Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.— P. 504–506.

8. **Sapozhnikov S.Z. Mitiakov V.Yu., Mitiakov A.V.** Basics of the gradient heat flux measurement [Tekst]. — Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2012.— 203 p. (rus.)

9. **Osmanov V.V., Grigoryev K.A., Mitiakov A.V.** Gradient heat flux measurement in the vortex furnace of the upgraded boiler BKZ-210 [Tekst] // The problems of heat and mass transfer and hydrodynamics in power-plant engineering: Report Abstracts of VII school of young scientists and specialists of academician V.E. Alemasov.— Kazan, 15–17 september 2010 г.— Kazan: Publishing House of the Kazan university, 2010.— P. 277–280. (rus.)

10. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** Heat transfer [Tekst].— M.: Energiya, 1975.— 488 p. (rus.)

11. Recommendations on interstate standardization RMG 43–2001 [Tekst]. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ОСМАНОВ Виктор Викторович — ассистент кафедры реакторных и котельных установок Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: osmanov_victor@mail.ru

AUTHORS

OSMANOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: osmanov_victor@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 532.5.032

Б.Ф. Балунов, Е.Н. Сайкова, Ю.Г. Сухоруков

ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗОРОВ В ПЕРЕГОРОДКАХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

B.F. Balunov, E.N. Saykova, Yu.G. Sukhorukov

GAPS HYDRAULIC RESISTANCE IN REGENERATIVE HEATERS GRIDS

Приведены результаты экспериментального исследования по определению коэффициента гидросопротивления трения в узком кольцевом зазоре, образованном при проходе теплообменных труб через отверстия в дистанционирующих перегородках вертикальных регенеративных подогревателей. На основе результатов исследования предложены соотношения для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ в реальных зазорах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ. УЗКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЗАЗОР. ВЕРТИКАЛЬНЫЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЬ. ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИЕ ПЕРЕГОРОДКИ.

The results of investigation of friction HydrauLIC resistance COEFFICIENT determination in a narrow circular GAP are described. The narrow circular GAP is made by passing of heat-exchange pipes through the holes in the spacer gridS of the vertical regenerative heaters. Based on the investigation results some ratios for calculation of friction HydrauLIC resistance COEFFICIENT $\lambda_{тр}=f(\mathrm{Re})$ ARE PROPOSED.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION. FRICTION HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT. NARROW CIRCULAR GAP. VERTICAL REGENERATIVE HEATER. SPACER GRIDS.

Чтобы взаимно дистанционировать теплообменные трубы в вертикальных пароводяных регенеративных подогревателях, установлены с определенным шагом дистанционирующие перегородки (ДП). Теплообменные трубы пропускаются через сверления в ДП, имеющие несколько больший диаметр по сравнению с внешним диаметром труб. Уменьшение диаметра сверления затрудняет сборку трубного пучка, но позволяет снять часть конденсата, стекающего по внешней поверхности труб и повысить интенсивность теплоотдачи при конденсации пара на этой поверхности.

Особенно значительны протечки конденсата и даже проскоки пара через перегородку, образующую верхнюю грань выгородки, в которой расположен охладитель конденсата. Для организации в нем противоточного движения теплообменивающих сред конденсат из придонной части основного объема подогревателя поднимают в транспортной части выгородки до ее верхней грани на 2–4 м. Поэтому перепад давления на перегородке достигает 20–40 кПа.

Для оценки эффективности и целесообразности применения тех или иных мер по снижению протечек через ДП необходимо знать расход этих протечек. При этом в соотношениях

$$G_{заз} = \left(\frac{F}{\sqrt{\Sigma\zeta}} \right)_{заз} \sqrt{2\Delta p \rho_{конд}}\,, \qquad (1)$$

где

$$\sum\zeta = \zeta_{вх} + \zeta_{вых} + \lambda_{тр}\frac{H_{ДП}}{d_э}\,; \qquad (2)$$

$$\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re};\ \Delta/d_э), \qquad (3)$$

используемых при расчете расхода однофазного потока через одиночный зазор отсутствуют рекомендации для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{тр}$ для реального зазора. Так, отверстия в перегородках просверливаются без чистовой обработки поверхности и имеют шероховатость $\Delta = (25–30)10^{-3}$ мм, которая лишь на порядок отличается от эквивалентного диаметра рассматриваемого зазора $d_э = 4(F/П)_{заз} = (d_{отв} - d_{тр})$.

В соотношениях (1)–(3): $G_{заз}$ — массовый расход через зазор в ДП, кг/с; $F_{заз}$ — площадь проходного сечение зазора, м^2; $\Sigma\zeta$ — суммарный коэффициент гидросопротивления зазора в ДП; Δp — перепад давления между верхней и нижней гранями ДП, Па; $\rho_в$ — плотность воды, кг/м^3; $\zeta_{вх}$ и $\zeta_{вых}$ — коэффициенты гидросопротивления соответственно входа потока в зазор и выхода из него; $H_{дп}$ — высота ДП, м.

Нашей целью была разработка соотношений для расчета значения $\lambda_{тр}$ применительно к реальным условиям работы вертикальных регенеративных подогревателей на основе экспериментального исследования и имеющихся рекомендаций.

Описание экспериментальной установки.

Схема установки представлена на рис 1. Основная исследуемая ее часть — фрагмент узла прохода теплообменных труб (*2*) вертикального подогревателя через ДП (*1*). При создании этого

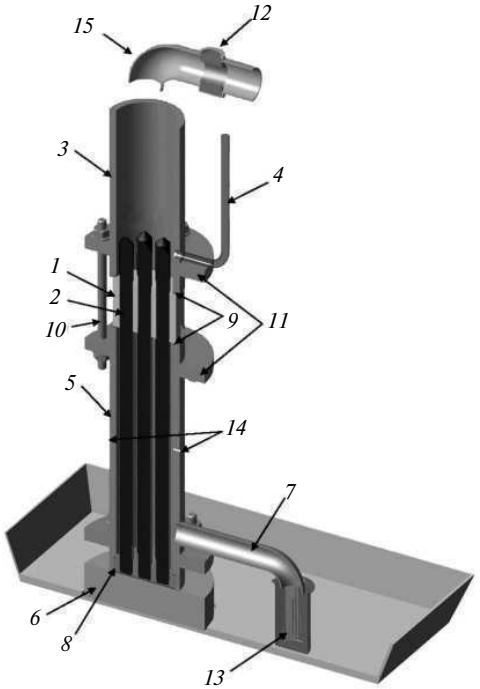


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 — исследуемая ДП; *2* — имитаторы теплообменных труб; *3* — верхняя камера; *4* — водоуказательная трубка; *5* — нижняя камера; *6* — днище нижней камеры; *7* — водоотводящая труба; *8* — дополнительная ДП; *9* — резиновые уплотнения; *10* — болтовые соединения; *11* — фланцы; *12* — шаровой кран; *13* — мерная мензурка; *14* — отверстия для выравнивания с атмосферным давления в нижней камере; *15* — трубопровод подвода конденсата

узла использовались натурные материалы как для перегородки (сталь 20), так и для трубок (сталь 12Х18Н10Т или латунь 68). Натурными были сохранены и геометрические размеры элементов: диаметр трубок — 15,99 мм, толщина $H_{дп}$ ДП — 16 или 60 мм, диаметр отверстий в них — 16,13–16,59 мм. В экспериментах использовались шесть имитаторов перегородок, отличающихся высотой и диаметром отверстий в них. Геометрические характеристики исследованных ДП приведены в таблице. Каждая ДП имела семь отверстий, расположенных по гексагональной решетке с шагом 22 мм. Сверление отверстий в ДП были выполнены по заводской технологии. Диаметры всех отверстий измерялись нутромером с погрешностью ±0,05 мм. Замеры проводились с обоих торцов ДП в двух перпендикулярных плоскостях. Отличие между ними не превышало 0,05 мм. В таблице приведен усредненный диаметр всех отверстий. В отверстия устанавливались заглушенные с верхнего торца имитаторы теплообменных труб высотой 340 мм. Диаметры труб измерялись микрометром с погрешностью ±0,01 мм.

Геометрические характеристики исследованных перегородок

Номер варинта ДП	$H_{дп}$, мм	$d_{отв}$, мм
1	16	16,54
2	16	16,13
3	16	16,31
4	16	16,59
5	60	16,52
6	60	16,33

Над ДП располагалась верхняя камера *3* — вертикальная труба диаметром 76/68 мм и высотой 1,8 м. Через верхний открытый торец этой трубы по трубке *15* с регулирующим краном *12* подавался от ТЭЦ НПО «ЦКТИ» турбинный конденсат с температурой 9,5–54 °С. Конденсат имел следующие характеристики: прозрачность более 30 см; pH = 7,0; хлориды — 3 мг/л; солесодержание — 4,2 мг/л; электропроводимость — 7 мкСм/см. Регулировкой расхода подаваемого конденсата устанавливался заданный уровень воды над ДП в рассматриваемом опыте. Для его измерения верхняя камера была снабжена стеклянной водоуказательной трубкой *4*. Под ДП располагалась нижняя камера *5*, в верхней части

стенки которой имелись отверстия *14* для создания под исследуемой ДП *1* атмосферного давления и для контроля отсутствия полного водяного заполнения нижней камеры. В придонной части камеры располагалось сливное отверстии для водоотводящей трубы *7*. После стабилизации уровня воды в верхней камере под ней на фиксированный промежуток времени $\tau = (30–60)$ с, устанавливалась мерная мензурка требуемого объема $V = (25$ мл$–2$ л$)$.

При проведении опытов в стационарных условиях измерялись следующие параметры воды:

уровень h в верхней камере относительно верхнего среза ДП с максимальной абсолютной погрешностью $\Delta h = \pm 0{,}5$ мм;

объемный расход воды через установку определялся по темпу заполнения мерной мензурки — $G' = V/\tau$ (среднеквадратичная относительная погрешность (СКОП) составила $\delta G \approx 0{,}021$);

температура $t_в$ воды на сливе из установки измерялась лабораторным термометром с максимальной абсолютной погрешностью $\Delta t_в = \pm 0{,}2$ °C.

Перед каждой серией опытов проводилась протирка и промывка установки конденсатом. Серия экспериментов с конкретным типоразмером ДП и материалом трубок состояла из 7–21 опытов, проводимых при различных значениях уровня h воды в верхней трубе. В каждой серии первый и последний опыт дублировался при идентичных значениях h для контроля отсутствия снижения расхода воды из-за засорения зазора продуктами коррозии и механическими включениями. Лишь при получении идентичных значений расхода (отличие менее 2 %) проведенная серия опытов допускалась к дальнейшей обработке.

Анализ результатов экспериментов

Обобщение результатов экспериментов проводилось в виде функции $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$, где* $\lambda_{тр} = (\Sigma\zeta - \zeta_{вх} - \zeta_{вых}) d_э / H_{дп}$ при $\Sigma\zeta = \dfrac{2\Delta p}{\rho_в W^2} = \dfrac{2g(F^2_{пр})_{заз}\rho^2_в(h + H_{др})}{G'^2_{заз}}$, а $\mathrm{Re} = w d_э/\nu_в = 4G/\Pi\rho_в\nu_в$ — число Рейнольдса. Среднеквадратичная относительная погрешность определения значения $\Sigma\zeta$ достигала $\delta(\Sigma\zeta) = 0{,}57$ в основном из-за высокой погрешности определения составляющей $\delta\left(F^2_{пр}\right) = 0{,}56$. В то же время СКОП определения остальных рассмотренных комплексов — весьма умеренны: $\delta((h + H_{др})/G^2) = 0{,}03$; $\delta(\mathrm{Re}) \approx \delta(G) = 0{,}02$.

Для рассматриваемых условий в соответствии с рекомендациями [1] $\zeta_{вх} = 0{,}5$; $\zeta_{вых} = 1{,}0$.

Результаты обработки $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ представлены на рис. 2 для всех рассматриваемых ДП с их дифференциацией. СКОП определения значения $\lambda_{тр}$ достигала $\delta(\lambda_{тр}) = 0{,}69$, что приводило к заметному расслоению данных по типоразмерам ДП.

В экспериментах охвачен диапазон чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = 4{,}6–2400$, формально практически весь относящийся к ламинарному течению ($\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{пр} = 2200$). Однако приведенные предельные числа Re относятся лишь к цилиндрическим гладким трубам. Смена формы канала изменяет профиль скорости ламинарного потока и может изменить число $\mathrm{Re}_{пр}$. Так в работах [2–4] для стержневых сборок (продольное течение при шероховатости стержней $\Delta \approx 0{,}005$ мм) $\mathrm{Re}_{пр} = 700–1200$. Наличие шероховатости поверхности канала должно вызвать более раннюю турбулизацию потока. В работе [5] приведен график Л. Моуди $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re};\ d/\Delta)$ при малых значениях $d/\Delta \geq 20$, но лишь для турбулентной области ($\mathrm{Re} > 4000$). Только в справочнике [1] дано соотношение для расчета предельного числа $\mathrm{Re}_{пр} = f(d/\Delta)$ для цилиндрических труб при $d/\Delta \geq 16{,}5$:

$$\mathrm{Re}_{пр} = 754 \exp(0{,}0065 d/\Delta). \qquad (4)$$

Для рассмотренных в нашей работе значений $d_э/\Delta = 10{,}7–21{,}4$ расчет по (4) дает $\mathrm{Re}_{пр} = 770$.

Предельное значение Re обычно связывается с отходом от пропорциональности потерь давления Δp и скорости потока w, что в случае применения формулы Дарси $\Delta p = \lambda_{тр}(L/d_э)\rho_в w^2/2$ эквивалентно отходу от обратной пропорциональности:

$$\lambda_{тр} = A/\mathrm{Re}, \qquad (5)$$

где для цилиндрических труб $A = 64$. Рассматриваемые здесь узкие кольцевые зазоры практически подходят под определение «плоская щель», для которой длина большей грани ($a = \pi \overline{d}_{отв} \approx \pi d_{тр}$) поперечного сечения намного превышает длину меньшей грани $b = 0{,}5(d_{отв} - d_{тр})$.

* Все использованные обозначения эксплицированы в конце статьи.

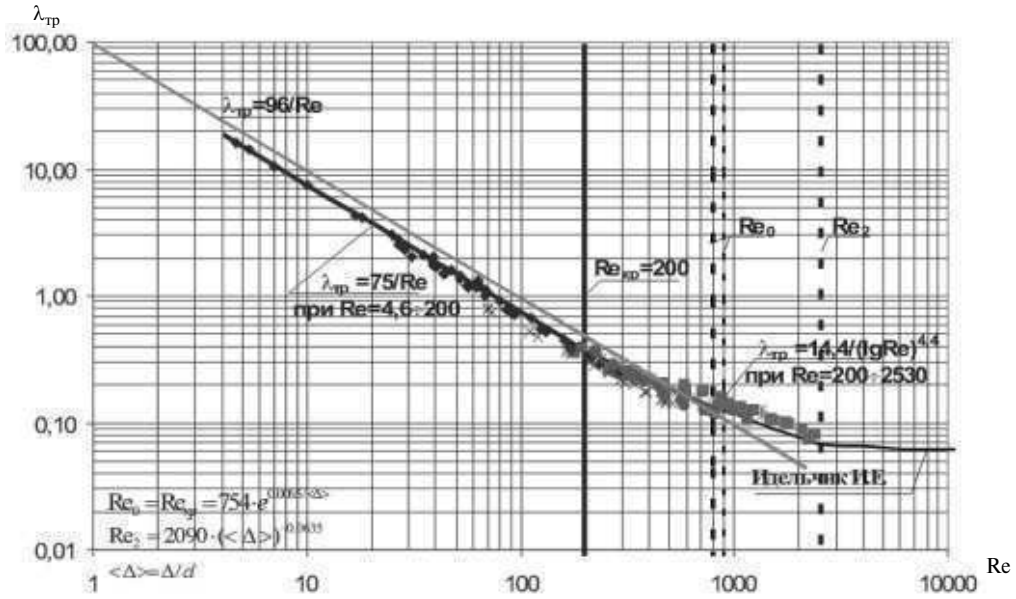


Рис. 2. Обобщение результатов всех экспериментов из [2] в виде зависимостей $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ для шести вариантов ДП: ■ — 1; ◆ — 2 и 6; × — 3; ∗ —4; ● —5

Для таких каналов согласно рекомендациям [6] $A = 96$. На рис. 2 представлена линия, рассчитанная по (5) при $A = 96$, а также линия, обобщающая результаты наших экспериментов. Ее отрезок при Re = 4,6–200 описывается соотношением

$$\lambda_{тр} = 75/\mathrm{Re}. \qquad (6)$$

Таким образом, для рассматриваемых зазоров допустимо принять значение $\mathrm{Re}_{пр} = 200$. Более низкое значение числителя в (6) по сравнению с приведенным выше для «плоской щели», вероятно, связано с некорректностью расчета проходного сечения и эквивалентного диаметра зазора по измерениям нутромером и микрометром диаметров соответственно отверстия и трубки. В обоих случаях измерения проводились по максимальным выступам шероховатости, которые могли не лежать в одном сечении и занимать лишь незначительную долю всей высоты зазора. Поэтому истинные значения проходного сечения и эквивалентного диаметра могли отличаться от рассчитанных по результатам измерений на величину, соответствующую увеличению зазора на $\Delta\delta \le \Delta_{отв}+\Delta_{тр} = (0{,}03–0{,}04)$ мм. С учетом указанных выше максимально возможных отличий в значениях $d_{отв}$ и $d_{тр}$ проведенные соответствующие расчеты дали более высокие величины $\lambda_{тр}$ и их обобщение при $A > 96$, что подтверждает корректность высказанного утверждения о причине отличия в значениях A.

В нашей работе максимальные значения Re = 2400 имели место в экспериментах с ДП1 и ДП4, для которых отношение $d_э/\Delta = 18–24$. В справочнике [1] для трубы с близким значением $d/\Delta = 22$ представлена линия $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$, которая нанесена на рис. 2. В области Re = 2500–6000 эта линия имеет слабое снижение значения $\lambda_{тр}$ с ростом Re и описывается соотношением

$$\lambda_{тр} = 0{,}014\mathrm{Re}^{-0{,}092}. \qquad (7)$$

При Re>6000 описываемая линия выходит на автомодельное значение относительно числа Рейнольдса:

$$\lambda_{тр} = 0{,}061. \qquad (8)$$

Эта линия представлена на рис. 2. Ее характер дает основание полагать, что для каналов, имеющих такую же относительную шероховатость, область значений Re>2500 является турбулентной; в ней значение $\lambda_{тр}$ слабо зависит от формы канала и допустимо применение рекомендаций [1] к рассматриваемым «плоским щелям» при идентичных значениях $d_э/\Delta$.

Кроме того, на рис. 2 наблюдается плавный переход от результатов проведенных нами экс-

периментов к линии $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$, соответствующей рекомендации [1]. Это дает основание использовать для расчета значений $\lambda_{тр}$ в рассматриваемых зазорах при $\mathrm{Re} > 2500$ соотношения (7), (8).

В промежуточной зоне ($\mathrm{Re} = 200–2500$) отрезок линии, обобщающей результаты наших экспериментов, описывается соотношением

$$\lambda_{тр} = 14{,}4/(\lg \mathrm{Re})^{4{,}4}. \qquad (9)$$

Таким образом, используя соотношения (6)–(9), можно определить величину $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ для всех условий, интересующих практику.

В заключение отметим, что рекомендации [1] представлены в графическом виде $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ при параметре d/Δ (минимальное значение $d/\Delta = 16{,}5$) и охватывают диапазон чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = 630–10000$. Эти рекомендации предполагают немонотонный характер изменения $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ в переходной области течения потока. Аналогичный характер изменения отображен в монографии Г. Шлихтинга [5], а также в экспериментах И. Никурадзе [8], проведенных при искусственной песочной шероховатости поверхности трубы. Рассматриваемые здесь узкие кольцевые каналы обладают неравномерной «технической» шероховатостью поверхности. Для используемых на практике «технических» труб, как и в настоящей работе, имеет место в переходной области плавное монотонное снижение значения $\lambda_{тр}$.

На основе результатов проведенного экспериментального исследования по определению гидросопротивления трения однофазного потока в узких шероховатых зазорах, образованных при проходе теплообменных труб через отверстия в дистанционирующих перегородках вертикальных регенеративных подогревателей, предложены соотношения для расчета коэффициента гидросопротивления трения $\lambda_{тр} = f(\mathrm{Re})$ при $d_э/\Delta = 10{,}7–24$.

Предложенные соотношения охватывают широкий диапазон значений чисел Рейнольдса от ламинарной области, где $\lambda_{тр} f(1/\mathrm{Re})$, до автомодельной турбулентной области, где $\lambda_{тр} \neq f(\mathrm{Re}) = \mathrm{const}$. При обобщении использованы рекомендации справочников [1, 9], а также учебника Н.З. Френкеля [10].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Условные обозначения, принятые в статье: $d_{отв}$ и $d_{тр}$ — диаметры соответственно отверстия и трубки, м; $d_э$ — эквивалентный диаметр сечения канала, м; $F_{пр}$ — площадь проходного сечение канала, м^2; G и G' — соответственно объемный и массовый расходы, м^3/с и кг/с; $G_{заз}$ и $G'_{заз}$ — объемный и массовый расходы через один зазор в ДП, кг/с; g — ускорение свободного падения, м/с^2; $H_{дп}$ — высота ДП, м; h — высота уровня воды над ДП, м; h_Σ — суммарная высота ДП и уровня воды над ней, м; Δp — перепад давления, Па; Re — число Рейнольдса; $\mathrm{Re}_{пр}$ — предельное число Рейнольдса для ламинарного потока; $t_в$ — температура воды, °С; V — объем воды, м^3; w — скорость воды, м/с; δ — величина зазора между отверстиями в ДП и теплообменными трубами, м; Δ — средняя абсолютная шероховатость поверхности отверстий в ДП, м; $\lambda_{тр}$ — коэффициент гидросопротивления трения; $\nu_в$ — кинематическая вязкость воды, м^2/с; П и $П_\Sigma$ — периметр и общий периметр зазоров ДП; $\rho_в$ — плотность воды, кг/м^3; $\Sigma\zeta$ — суммарный коэффициент гидросопротивления зазоров в ДП; $\zeta_{вх}$ — коэффициент гидросопротивления входа конденсата в зазор; $\zeta_{вых}$ — коэффициент гидросопротивления выхода конденсата из зазора; τ — время, с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик— М.: Машиностроение, 1975.— 559 с.

2. **Бабыкин, А.С.** Интенсивность охлаждения частично осушенных твэлов в квазистационарных условиях [Текст] / А.С. Бабыкин, Б.Ф. Балунов, Т.С. Живицкая [и др.] // Атомная энергия.— 1993. Т. 75, вып. 4.— С. 276–281.

3. **Нехорошев, П.М.** Критические числа Рейнольдса при продольном течении жидкости в пучках стержней [Текст] / П.М. Нехорошев // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов.— 1981. Вып. 3 (16).— С. 52–57.

4. **Пустыльник, П.Н.** Теплообмен при вынужденном продольном обтекании воздухом пучка труб при граничном условии $T_{ст} = \mathrm{const}$ / П.Н. Пустыльник, Б.Ф. Балунов, А.Я. Благовещенский // Теплоэнергетика.— 1990. № 3.— С. 63–65.

5. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг— М.: Наука, 1974. — 711 с.

6. **Петухов, Б.С.** Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 470 с.

7. **Самойленко, Л.А.** Исследование гидравлического сопротивления трубопроводов при переходном режиме движении жидкости и газов [Текст] / Л.А. Самойленко, Е.А. Прегер // Труды ЛИСИ. — Л., 1966. Вып. 50.— С. 27–39.

8. **Nikuradze, J.** Stromungsgesetze in rouhen Rohren [Text] / J. Nikuradze // VDI Forschungscheft. — № 361. — 1933.— S. 16–53.

9. **РД 24.035.05–89.** Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС [Текст] / НПО ЦКТИ.— Л., 1991.

10. **Френкель, Н.З.** Гидравлика [Текст] / Н.З. Френкель.— М.-Л.: Госэнергиздат, 1956. — 456 с.

REFERENCES

1. **Idel'chik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam [Tekst].— M.: Mashinostroenie, 1975.— 559 s. (rus.)

2. **Babykin A.S.? Balunov B.F., Zhivitskaia T.S. [i dr.].** Intensivnost' okhlazhdeniia chastichno osushennykh tvelov v kvazistatsionarnykh usloviiakh [Tekst].— Atomnaia energiia.— 1993. T. 75, Vyp. 4.— C. 276–281. (rus.)

3. **Nekhoroshev P.M.** Kriticheskie chisla Reinol'dsa pri prodol'nom techenii zhidkosti v puchkakh sterzhnei [Tekst] // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Fizika i tekhnika iadernykh reaktorov. — 1981. Vyp. 3 (16).— C. 52–57. (rus.)

4. **Pustyl'nik P.N., Balunov B.F., Blagoveshchenskii A.Ya.** Teploobmen pri vynuzhdennom prodol'nom obtekanii vozdukhom puchka trub pri granichnom uslovii T_{sm} = const [Tekst] // Teploenergetika. — 1990. № 3.— C. 63–65. (rus.)

5. **Shlikhting G.** Teoriia pogranichnogo sloia [Tekst].— M.: Nauka, 1974. — 711 s. (rus.)

6. **Petukhov B.S. Genin L.G., Kovalev S.A.** Teploobmen v iadernykh energeticheskikh ustanovkakh[Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1986.— 470 s. (rus.)

7. **Samoilenko L.A., Preger E.A.** Issledovanie gidravlicheskogo soprotivleniia truboprovodov pri perekhodnom rezhime dvizhenii zhidkosti i gazov[Tekst] // L.: Trudy LISI. — 1966. Vyp. 50.— C. 27–39. (rus.)

8. **Nikuradze J.** Stromungsgesetze in rouhen Rohren [Tekst] // VDI Forschungscheft. —1933. № 361. — S. 16–53. (rus.)

9. **RD 24.035.05–89.** Teplovoi i gidravlicheskii raschet teploobmennogo oborudovaniia AES [Tekst] / NPO TsKTI.— L.: 1991. (rus.)

10. **Frenkel' N.Z.** Gidravlika [Tekst].— M.-L.: Gosenergizdat, 1956. — 456 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАЛУНОВ Борис Федорович — доктор технических наук профессор заведующий лабораторией оборудования АЭС с водоохлаждаемыми реакторами; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: balunov.ckti@mail.ru

САЙКОВА Елена Николаевна — младший научный сотрудник; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: e.saykova@gmail.com

СУХОРУКОВ Юрий Германович — кандидат технических наук заместитель генерального директора; ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»; 191167, ул. Атаманская, д. 3/6, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: teploobmen@ckti.ru.

AUTHORS

BALUNOV Boris F. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: balunov.ckti@mail.ru

SAYKOVA Elena N. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: e.saykova@gmail.com

SUKHORUKOV Yuriy G. — Joint-Stock Company «I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment; 191167, 3/6 Atamanskaya str., Saint-Petersburg, Russia; e-mail: teploobmen@ckti.ru..

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.671.001.024

Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский

ВЛИЯНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОГНОЗНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО НАСОСА С БЫСТРОХОДНОСТЬЮ n_s = 570

D.G. Svoboda, A.A. Zharkovsky

INFLUENCE OF PARAMETERS ON THE PROGNOSTIC CHARACTERISTICS OF THE AXIAL PUMP WITH SPECIFIC SPEED n_s = 570

Представлены результаты экспериментального и расчетного исследования осевого насоса с коэффициентом быстроходности $n_s = 570$. Получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных интегральных параметров. Разработанная методика может быть рекомендована для расчета характеристик проточных частей осевых насосов.

ОСЕВОЙ НАСОС. ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ. РАСЧЕТНАЯ СЕТКА. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА.

Results of experimental and computational research of the axial pump with specific speed $n_s = 570$ are presented. Good convergence between computational and experimental parameters was obtained. Developed method can be recommended for calculation of performance curves of the axial pumps.

AXIAL PUMP. FLOWING PART. COMPUTATIONAL GRID. INTEGRAL PARAMETERS. CALCULATION METHOD.

В статье обсуждаются результаты расчетных исследований осевого насоса ЦН-44 с коэффициентом быстроходности $n_s = 570$, коэффициентом подачи $k_Q = 0{,}454$ и коэффициентом напора $k_H = 0{,}165$. Проточная часть данного насоса служит моделью натурного осевого насоса ГЦН-1455. Расчетные данные сравнивались с характеристиками, полученными при экспериментальных исследованиях модельного насоса ЦН-44 на водяном стенде СПбГПУ. Модельная проточная часть создана на основе теоретических чертежей лопастной системы рабочего колеса (РК) и выправляющего аппарата (ВА) натурного насоса. Коэффициент линейного подобия $k_L = D_{\text{РК н}}/D_{\text{РК н}} = 0{,}69/0{,}272 = 2{,}5367$. На рис. 1 показаны модельные рабочее колесо и выправляющий аппарат.

Число лопаток РК составляет $Z_{\text{РК}} = 5$. Лопатки РК — поворотные. На выходе из РК устанавливается выправляющий аппарат. Число лопаток выправляющего аппарата с учетом требований минимального габаритного размера в осевом направлении, отсутствия условий для резонансных колебаний и достаточной прочности составляет $Z_{\text{ВА}} = 12$.

Пересчет основных параметров натурного насоса дает следующие значения для модельного насоса: $Q_{\text{м}} = 106{,}5$ л/с; $H_{\text{м}} = 1{,}658$ м; $n_{\text{м}} = 700$ об/мин. На экспериментальном стенде были получены рабочая и универсальная характеристики.

Ставились следующие задачи расчетного исследования:

Апробация методики, сравнение результатов численного и экспериментального исследований.

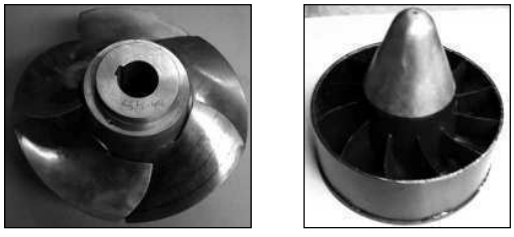


Рис. 1. Рабочее колесо и выправляющий аппарат модели насоса ЦН-44

Исследование влияния расчетных параметров на сеточную сходимость.

Исследование влияния модели турбулентности на расчетные интегральные параметры.

Сравнение результатов расчетов в стационарной и нестационарной постановках.

Расчет стационарного течения вязкой жидкости с граничным условием проскальзывания.

Исследование влияния свойств перекачиваемой жидкости на интегральные характеристики насоса.

Численное исследование насоса ЦН-44 проводилось по методике, включающей следующие этапы: создание геометрической модели исследуемой проточной части; построение расчетной сетки; выбор подходящей математической модели; задание граничных условий, параметров расчета; выполнение расчета; визуализация и анализ результатов расчета [1].

В программе твердотельного 3D-проектирования SolidWorks была построена геометрическая модель насоса, а также его проточная часть, имитирующая объем, внутри которого происходит исследуемое течение жидкости (рис. 2).

Расчетная область включала в себя один межлопастной канал рабочего колеса и один канал выправляющего аппарата. Данный подход возможен, так как в других каналах течение периодически повторяется. Это позволяет экономить вычислительные ресурсы и дает возможность использовать для расчета течения в отдельном канале достаточно густую расчетную сетку. При таком подходе предполагается, что течение в РК — осесимметричное и установившееся, а выход из РК ведет в осесимметричный элемент проточной части ВА.

Для построения расчетной сетки проточной части использовалась программа ICEM CFD. Расчетная сетка — неструктурированная, ячейки сетки в ядре потока представляли собой тетраэдры. Была построена сетка со следующими параметрами: максимальный размер элемента сетки принимался равным ~1 % от $D_{РК}$ и равнялся 3 мм. Для достижения равномерной точности расчета производилось сгущение элементов в местах быстрого изменения параметров — входных и выходных кромках рабочего колеса, скруглениях, поверхностях интерфейса. Здесь размер элемента сетки принимался 1,5 мм. Для описания пограничного слоя вблизи твердых стенок лопасти РК, основного и покрывающего дисков, неподвижных стенок НА и ВА было создано 11 слоев призматических элементов общей толщиной ~1,8 мм. Таким образом, общее количество элементов расчетной сетки насоса составило ~5,4 млн элементов, в том числе: для РК — 1,2 млн элементов, для направляющего аппарата — 2,9 млн элементов, для выпрямляющего аппарата — 1,2 млн элементов.

Для проведения расчетов использовался программный комплекс Ansys CFX 12. На входе в расчетную область задавалось полное давление 1 атм., на выходе — массовый расход. Расчет течения проводился в стационарной постановке. Режим течения — турбулентный. Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Интенсивность турбулентности на входе задавалась 5 %. На поверхности интерфейса условие сопряжения Stage — осреднение параметров расчета в окружном направлении. По результатам проведенных расчетов были построены характеристики рабочего колеса и насоса (рис. 3, 4). Следует иметь в виду, что при расчете вязкого течения были получены значения только гидравлического КПД, а объемный и механический КПД не учитывались.

Из сравнения расчетных и экспериментальных интегральных параметров потока можно убедиться, что расхождение по напору в зависимости от режима работы насоса находится в диапазоне 0,5–10 %. Расхождение по КПД составило 2–15 %.

Рис. 2. Твердотельные модели насоса ЦН-44 и его проточной части

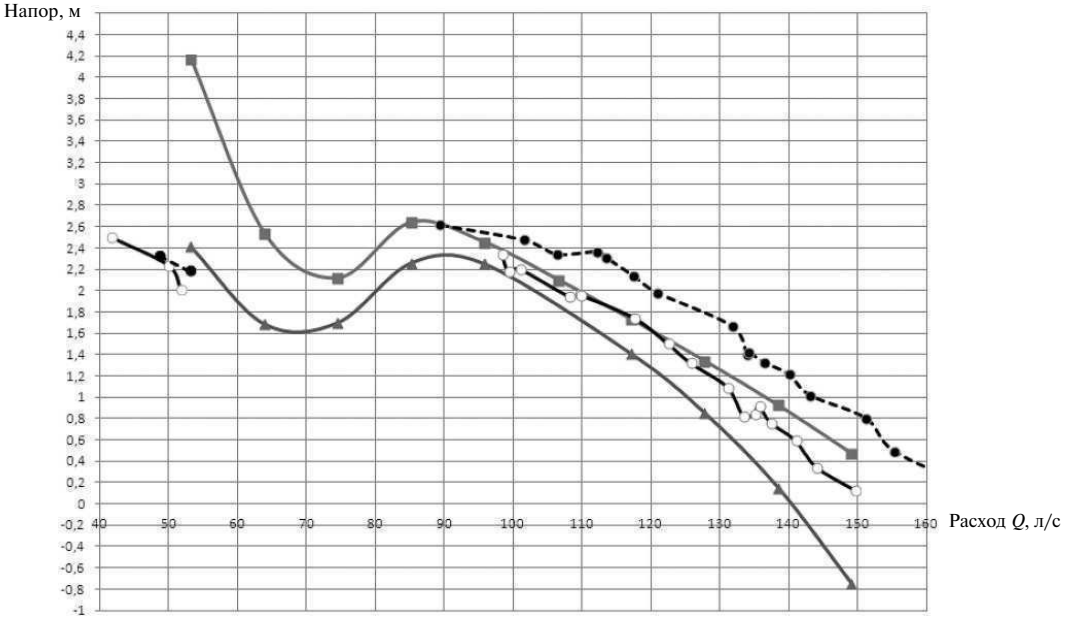


Рис. 3. Напорные характеристики насоса ЦН-44:
-■- — РК (расчет); -●- — РК (эксперимент); -▲- — ступень (расчет);
-○- — ступень (эксперимент)

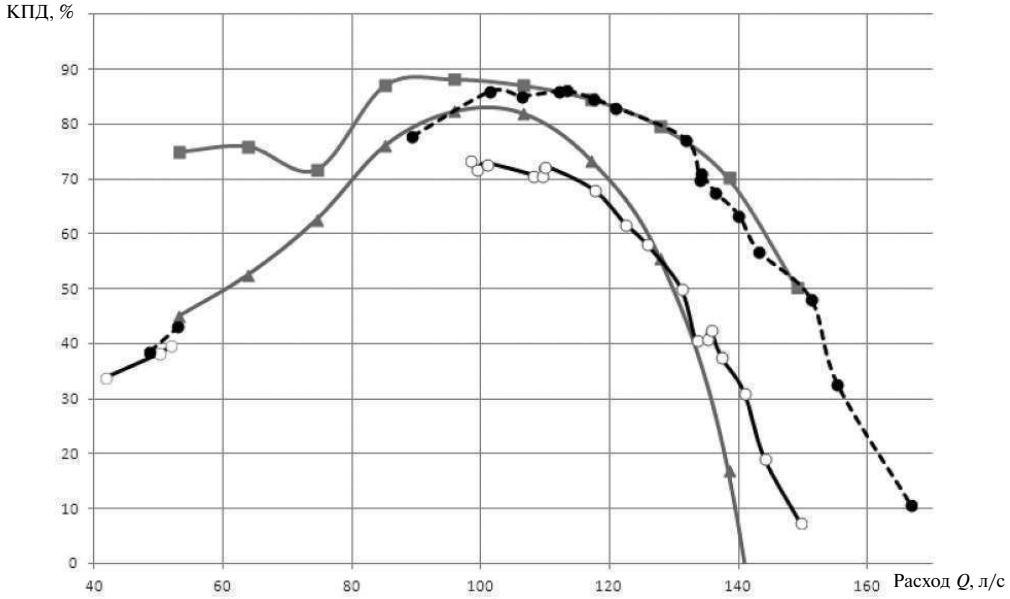


Рис. 4. Зависимость КПД насоса ЦН-44 от расхода
(обозначения — те же, что на рис. 3)

В целом, в оптимальном режиме работы насоса ЦН-44 имеет место хорошая согласованность интегральных параметров, определенных при численном и экспериментальном исследовании проточной части. Следовательно, данная методика может быть рекомендована для расчета характеристик проточных частей осевых насосов.

В неоптимальных режимах работы расхождение значений параметров, полученных путем численного расчета и в эксперименте, увеличивается. Это связано с ростом величины потерь в проточной части (в основном в выправляющем аппарате).

Было также проведено исследование решения на сеточную независимость. Для этого были выполнены расчеты на нескольких сетках, различающихся количеством узлов. Такое исследование позволяет определить, начиная с какого количества узлов получаемое решение практически перестает зависеть от густоты сетки. С помощью программы генератора сеток ICEM CFD были построены 5 вариантов расчетных сеток. Варианты сеток отличались друг от друга размером глобального максимального элемента и плотностью сетки вблизи кромок и скруглений НА, РК и ВА, а также поверхности интерфейса.

На рис. 5 изображен график зависимостей интегральных параметров РК от густоты расчетной сетки для оптимального режима работы насоса.

С уменьшением размера сетки происходит увеличение количества ее элементов, в связи с чем при расчетах изменение диссипации энергии происходит более плавно, а расчетные потери в элементах проточной части уменьшаются, особенно в ВА. При увеличении количества элементов свыше 2,5 млн изменение параметров происходит с меньшей интенсивностью. Для получения расчетной сетки такой густоты размер максимального глобального элемента должен быть в пределах 1–1,5 % от диаметра рабочего колеса, что является оптимальным значением для достаточно точных и экономичных (с точки зрения затрат вычислительных ресурсов и времени) расчетов. Данные рекомендации получены для расчетной модели, представляющей собой один межлопастной канал колеса.

В нашей работе исследовано влияние выбора модели турбулентности на интегральные параметры исследуемого осевого насоса. Проведено сравнение двух моделей турбулентности. Модель $k-\varepsilon$ дополнительно использует для замыкания уравнений движения два дифференциальных уравнения, описывающих перенос кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Модель турбулентности SST — модель переноса сдвиговых напряжений. На рис. 6 показаны характеристики насоса ЦН-44,

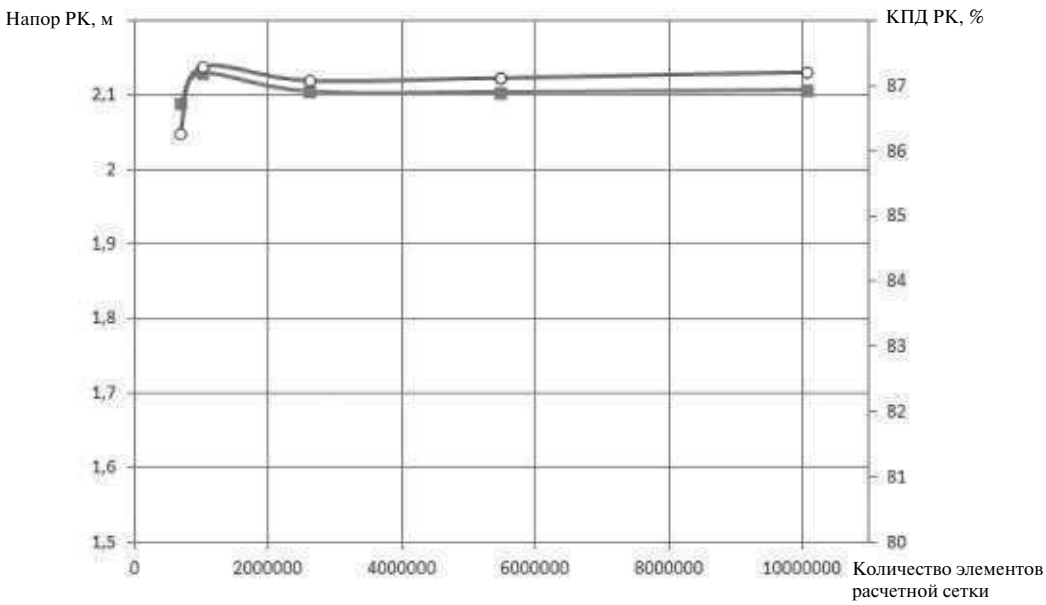


Рис. 5. Зависимость параметров РК от густоты расчетной сетки
(-■- — напор РК; -○- — КПД РК)

полученные в результате проведенных расчетов с использованием двух моделей турбулентности.

При использовании $k-\varepsilon$ модели турбулентности на результаты расчета сильно влияет расстояние, на которое удалены от твердой стенки ближайшие к ней узлы расчетной сетки. Первые узлы расчетной сетки должны попадать на границу вязкого подслоя. Поэтому при подготовке расчетной сетки в программе ICEM CFD вблизи входных и выходных кромок РК, поверхности лопаток и поверхности интерфейса проводилось сгущение элементов путем создания слоев призматических ячеек. В программе расчета течения Ansys CFX 12 для обязательного выполнения этого условия и страховки пользователя от ошибки реализованы масштабируемые функции стенки, благодаря которым программа автоматически определяет, в каких узлах сетки нужно переключиться на пристеночные функции. Это позволяет достигать более равномерной точности расчета в местах быстрого изменения параметров течения.

Из анализа полученных графиков следует, что при оптимальном и больших расходах модель турбулентности практически не влияет на значения напора и КПД насоса. Поэтому для более экономичных расчетов рациональнее использовать (k–ε)-модель турбулентности. При малых расходах — (0,5–0,7) $Q_{опт}$ — появляется расхождение значений напора и КПД рабочего колеса, а также ступени насоса, получаемых при расчете вязкой жидкости с использованием различных моделей.

Обычно при расчете течения в насосах используют стационарную постановку. Предполагается, что в насосе после первоначально развивающихся нестационарных процессов, например после пуска насоса, устанавливается устойчивый стационарный режим, и тогда при расчете интегральных параметров их значения не изменяются с течением времени.

Однако иногда при расчете течения в стационарном режиме решение не сходится. Причем, независимо от того, какие меры были приняты в отношении качества сетки или задания параметра шага времени TimeScale Control. Это объясняется либо самой природой нестационарного течения в данной проточной части насоса, когда стационарный режим не достигается, либо может быть признаком переходного режима.

В таких случаях необходимо для расчета течения в граничных условиях программного комплекса Ansys 12 задавать нестационарный режим Transient. В этом режиме в реальном времени

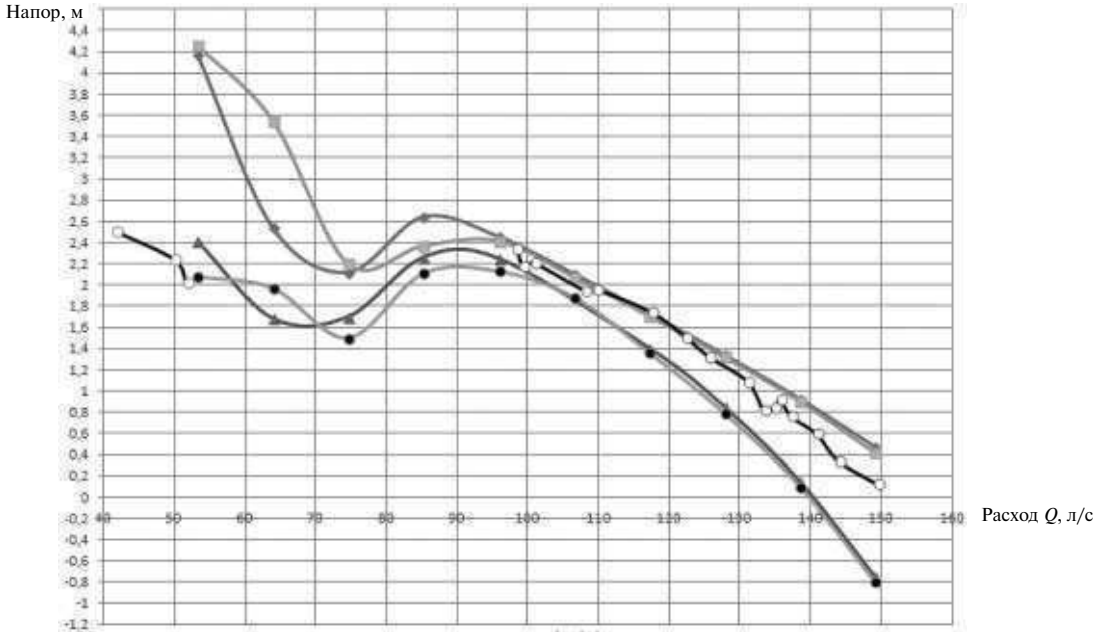


Рис. 6. Напорные характеристики насоса ЦН-44:
-◆- — РК (модель k–ε); -■- — РК (модель SST); -▲- — ступень (модель k–ε);
-●- — ступень (модель SST); -○- — ступень (эксперимент)

необходима информация для определения временных интервалов, на которых CFX-Solver рассчитывает поле течения, т. е. необходимо установить как физическое время, так и количество шагов по времени, а также максимальное количество итераций за такт.

Отправной точкой для правильного задания временного шага Time Steps в расчете принимался критерий Куранта — Фридрихса — Леви. Расчет течения жидкости в программном комплексе Ansys 12 выполняется путем численного решения системы дифференциальных уравнений Навье — Стокса. Известно, что необходимое условие устойчивости явного численного решения дифференциальных уравнений в частных производных достигается при выполнении некоторого ограничения на значение временного шага, иначе результаты будут неправильными. Данное условие названо критерием Куранта — Фридрихса — Леви (КФЛ). Критерий КФЛ имеет следующий вид:

$$\frac{V\Delta t}{\Delta L} < C,$$

где V — скорость переноса; Δt — временной шаг; ΔL — пространственный шаг; C — коэффициент Куранта, константа не зависящая от Δt и ΔL.

Тогда значение временного шага получим из соотношения

$$\Delta t < \frac{C\Delta L}{V}.$$

В качестве пространственного шага ΔL примем значение размера максимального глобального элемента расчетной сетки ΔL = 3 мм = = 0,003 м.

Скорость переноса V — значение максимальной относительной скорости в проточной части рабочего колеса насоса, V = 9 м/с.

Рекомендуемое значение коэффициента Куранта — $C \le 1$. При этом наблюдается устойчивая сходимость результатов расчета. Иногда положительные результаты достигаются и при больших значениях C, вплоть до 10.

Тогда

$$\Delta t < \frac{1 \cdot 0,003}{8} = 0,000375 \text{ сек.}$$

Примем значение временного шага расчета Time Steps равным 0,004 сек.

Общую продолжительность времени расчета зададим исходя из скорости вращения рабочего колеса насоса. Имеем n = 700 об/мин, или 11,6 об/сек. Значит, значения Total Time = 1 сек будет достаточно.

Исследование показало, что использование для расчетов интегральных параметров стационарной постановки режима течения жидкости в проточной части осевого насоса оправданно. Нестационарный режим требует значительно большего времени для расчета и больших вычислительных ресурсов, поэтому такой режим следует использовать для случаев, когда не удается достигнуть сходимости результатов расчета в стационарной постановке.

В программном комплексе Ansys CFX при расчете течения жидкости в проточной части лопастных насосов наиболее часто используют граничное условие прилипания. То есть считается, что на твердых непроницаемых поверхностях вязкая жидкость должна двигаться вместе с этими поверхностями, так как скольжение вдоль них или их пересечение невозможны. Однако в последние десятилетия было проведено множество экспериментальных исследований ньютоновских и неньютоновских жидкостей и обнаружено, что во многих случаях справедливо использование граничного условия проскальзывания. Поскольку в программном комплексе Ansys CFX предусмотрена возможность задавать различные сложные граничные условия, то было проведено расчетное исследование влияния граничного условия проскальзывания на интегральные характеристики

На оптимальном режиме с $\bar{Q}_{\text{опт}}$ = 1 разница значений напора и КПД, рассчитанных с использованием двух вариантов условий — проскальзывание и прилипание, составляет примерно 10 %. С ростом расхода эта разница увеличивается. С уменьшением расхода и скорости обтекания лопаток РК и ВА разница в расчетных интегральных параметрах для различных граничных условий уменьшается.

Расчетное исследование влияния свойств перекачиваемой жидкости на интегральные характеристики для исследуемого насоса было связано с тем, что обычно характеристики насосов рассчитывают для воды, так как большинство испытательных стендов приспособлены для проведения испытаний именно на воде.

В случае, если насос работает на более вязкой жидкости, то производят пересчет характе-

ристик (с воды на рабочую жидкость) с использованием эмпирических методик, одна из которых была предложена А.И. Степановым [2]. Методика основывается на многочисленных экспериментах, которые позволяют получить характеристику насоса, перекачивающего вязкую жидкость, путем пересчета характеристики для воды с помощью поправочных коэффициентов, полученных опытным путем. При этом пересчет проводят только для оптимального режима при максимальном КПД. Другая методика была предложена П.Д. Ляпковым [3]. Она также основана на экспериментальных данных испытаний насосов на вязкой жидкости. В ней предложены коэффициенты пересчета напора и КПД, зависящие от вязкости, но для разных режимов работы насоса. Таким образом, для пересчета рабочих характеристик насоса с воды на более вязкую жидкость эмпирическая методика требует наличия большой базы экспериментальных данных.

Программный комплекс ANSYS 12 использует методы вычислительной гидродинамики; с его помощью можно рассчитывать поток с различной плотностью и вязкостью внутри проточной части и определять их влияние на интегральные характеристики насоса. Такое расчетное исследование было проведено на основе модели осевого насоса ЦН-44.

Расчет интегральных характеристик проведен для жидкостей с коэффициентом кинематической вязкости в диапазоне $\nu = 0{,}15$–150 сСт. Коэффициент вязкости $\nu = 0{,}15$ сСт соответствует физическим свойствам тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ), на котором работает натурный насос, — эвтектического сплава «свинец — висмут» с молярной массой $M = 0{,}208$ кг/моль, плотностью $\rho = 10180$ кг/м^3, динамической вязкостью $\mu = 1{,}523 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

На рис. 7 изображены для оптимального режима работы графики напора, КПД, затраченной мощности насоса N в зависимости от вязкости жидкости при постоянном числе оборотов.

Представленные графики согласуются с экспериментальными данными, обобщенными А.И. Степановым. По ним можно сделать следующие выводы. При постоянном числе оборотов насоса и увеличении вязкости перекачиваемой жидкости напор, соответствующий оптимальной подаче, снижается. При увеличении вязкости с 0,1 до 150 сСт уменьшение напора рабочего колеса составило ~ 9 %, а ступени — 18 %. КПД насоса снизился на 22,5 %.

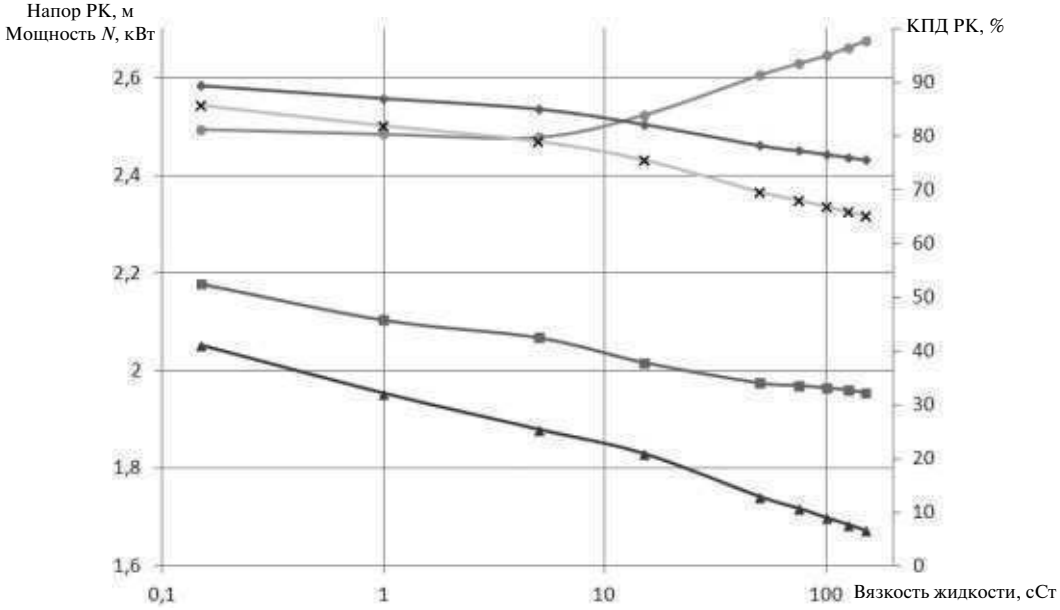


Рис. 7. Влияние вязкости на интегральные характеристики насоса ЦН-44

-■- — напор РК; -◆- — КПД РК; -●- — мощность РК;
-▲- — напор ступени; -×- — КПД ступени

С увеличением вязкости увеличивается и затраченная мощность насоса — на ~ 6 %.

В целом можно утверждать, что программный комплекс Ansys 12 позволяет с достаточной точностью прогнозировать интегральные характеристики осевого насоса с учетом влияния физических свойств перекачиваемой жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антоненко, С.С.** Изменение напорной и энергетической характеристики высокооборотного динамического насоса под влиянием вязкости перекачиваемой среды [Текст]: автореф. дисс. ... канд. тех. наук.— 05.05.17 / Антоненко Сергей Сергеевич.— Сумы, 2004.— 20 с.

2. **Безносов, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике [Текст]: Учебное пособие / А.В. Безносов, Т.А. Бокова.— Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012.— 535 с.

3. **Болдырев, А.В.** Численное моделирование трехмерных турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости в лопастных гидромашинах [Текст]: автореф. дисс. ... канд. тех. наук.— 01.02.05 / Болдырев Алексей Владимирович.— Казань, 2009.— 19 с.

4. **Гиневский, А.С.** Влияние вязкости жидкости на величину циркуляции вокруг профиля гидродинамической решетки [Текст] / А.С. Гиневский / ЦАГИ // Промышленная аэродинамика. Сб. 9.— М.: Оборонгиз, 1957.— С. 5–15.

5. **Кочевский, А.Н.** Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах [Текст] / А.Н. Кочевский, В.Г. Неня // Вісник Сумського державного університету.— Суми, 2003.— Вип. 13(59).— С. 195–210.

6. **Кузьмин, М.Ю.** О краевых задачах некоторых моделей гидродинамики с условиями проскальзывания на границе [Текст]: дисс. ... канд. физ.-матем. наук.— 01.01.02 / Кузьмин Михаил Юрьевич.— Воронеж, 2007.— 106 с.

7. **Ляпков, П.Д.** О влиянии вязкости на характеристику погружных центробежных насосов [Текст] / П.Д. Ляпков // Труды ВНИИ. Вып. 41.— М.: Недра, 1964.

8. **Московко, Ю.Г.** Методика проектирования и разработка энергоэффективных осевых вентиляторов с профилями лопаток специальной формы [Текст]: автореф. дисс. ... канд. тех. наук.— 05.04.06 / Московко Юрий Георгиевич.— Санкт-Петербург, 2011.— 16 с.

9. **Папир, А.Н.** Осевые насосы водометных движителей [Текст] / А.Н. Папир.— Л.: Судостроение, 1965.— 252 с.

10. **Степанов, Л.И.** Центробежные и осевые насосы. Теория, конструирование и применение [Текст] / Л.И. Степанов.— М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960.— 468 с.

REFERENCES

1. **Antonenko S.S.** Izmenenie napornoi i energeticheskoi kharakteristiki vysokooborotnogo dinamicheskogo nasosa pod vliianiem viazkosti perekachivaemoi sredy [Tekst]: avtoref. diss. ... kand. tekh. nauk.— 05.05.17 / Antonenko Sergei Sergeevich. Sumy, 2004.— 20 s. (rus.)

2. **Beznosov A.V., Bokova T.A.** Oborudovanie energeticheskikh konturov s tiazhelymi zhidkometallicheskimi teplonositeliami v atomnoi energetike [Tekst]: Uchebnoe posobie.— Nizhnii Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2012.— 535 s. (rus.)

3. **Boldyrev A.V.** Chislennoe modelirovanie trekhmernykh turbulentnykh techenii viazkoi neszhimaemoi zhidkosti v lopastnykh gidromashinakh [Tekst]: avtoref. diss. ... kand. tekh. nauk.— 01.02.05 / Boldyrev Aleksei Vladimirovich.— Kazan', 2009.— 19 s. (rus.)

4. **Ginevskii A.S.** Vliianie viazkosti zhidkosti na velichinu tsirkuliatsii vokrug profilia gidrodinamicheskoi reshetki [Tekst] / TsAGI // Promyshlennaia aerodinamika. Sb. 9.— M.: Oborongiz, 1957.— S. 5–15. (rus.)

5. **Kochevskii A.N., Nenia V.G.** Sovremennyy podkhod k modelirovaniiu i raschetu techenii zhidkosti v lopastnykh gidromashinakh [Tekst] // Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu.— Sumi, 2003.— Vip. 13(59).— s. 195–210. (rus.)

6. **Kuz'min M.Yu.** O kraevykh zadachakh nekotorykh modelei gidrodinamiki s usloviiami proskal'zyvaniia na granitse [Tekst]: disse. ...kand.fiz.-matem. nauk.— 01.01.02 / Kuz'min Mikhail Iur'evich.— Voronezh, 2007.— 106 s. (rus.)

7. **Lyapkov P.D.** Influence of viscosity on characteristic-performance of Centrifugal Submerged Pumps [Tekst] // VNII works, Issue 41.— M.: Bowels, 1964. (rus.)

8. **Moskovko Yu.G.** Metodika proektirovaniia i razrabotka energoeffektivnykh osevykh ventiliatorov s profiliami lopatok spetsial'noi formy [Tekst]: avtoref. ... kand. tekh. nauk.— 05.04.06 / Moskovko Iurii Georgievich.— Sankt-Peterburg, 2011.— 16 s. (rus.)

9. **Papir A.N.** Osevye nasosy vodometnykh dvizhetelei [Tekst].— L.: Sudostroenie, 1965.— 252 s. (rus.)

10. **Stepanoff L.I.** Centrifugal and axial flow pumps. Theory, design, and application [Tekst].— M.: State scientific-technical publishers of machine-building literature, 1960. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СВОБОДА Дмитрий Геннадьевич — ассистент кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: svoboda.dmitry@gmail.com

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru

AUTHORS

SVOBODA Dmitriy G. —St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia;

ZHARKOVSKY Alexander A., St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 622.22

В.В. Елистратов, И.Г. Кудряшева, Ю.А. Мирошникова

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГАЭС В СОВРЕМЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

V.V. Elistratov, I.G. Kudryasheva, Yu.A. Miroshnikova

SUBSTANTIATION OF PUMPED STORAGE POWER PLANTS REGIMES IN MODERN ECONOMIC CONDITIONS

В статье представлена авторская методика выбора рациональных режимов работы гидроаккумулирующей станции в энергосистеме в условиях функционирования нового энергетического рынка. Разработан алгоритм начисления тарифных надбавок за системный эффект ГАЭС.

ЭНЕРГОСИСТЕМА. РЕГУЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ. ТАРИФ. ГАЭС.

The article describes the technique of selection of rational work regimes of pumped storage plant in an energy system under conditions of new energy market. Variants of estimation of system effects from work of pumped storage power plant are offered. Possibilities of updating tariff policy for PSPP by adding tariff bonuses for system effects are examined.

ENERGY SYSTEM. OPERATION. SYSTEM SERVICES. TARIFF. PSPP.

В числе глобальных тенденций развития мировой энергетики отмечены: снижение доли использования органического топлива в процессах генерации электроэнергии, уменьшение выбросов CO_2 в атмосферу, повышение энергоэффективности и степени сбалансированности энергосистем, повышение качества энергообеспечения потребителей. Решение данных проблем в развитых странах, в том числе в США и ряде стран Евросоюза, обеспечивается рыночным регулированием электроэнергетического сектора и увеличением доли возобновляемых источников энергии, в частности ГЭС и ГАЭС, в структуре генерирующих мощностей.

В течение последнего десятилетия за рубежом происходит активное развитие рынков системных услуг, созданных для поддержания необходимого уровня надежности и качества функционирования энергосистемы посредством экономического стимулирования владельцев энергообъектов и потребителей к обеспечению свойств и параметров генерирующего и сетевого оборудования [1], требуемых для стабильного функционирования энергетической системы.

В России рынок услуг по обеспечению системной надежности начал работу в марте 2010 года после вступления в силу Постановления Правительства Российской Федерации от 03.03.2010 г. № 117 «Правила отбора субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по обеспечению системной надежности, и оказания таких услуг» [2].

Перечень услуг по обеспечению системной надежности, представленный в [2], ограничен небольшим количеством режимов работы энергетических установок по регулированию и резервированию. В перспективе планируется расширение данного списка и создание полноценного рынка системных услуг, что потребует разработки комплекса нормативных документов, регулирующих взаимоотношения участников данного рынка и основы ценообразования на нем [3].

Как определено в [2], оплата услуг формируется по результатам конкурсного отбора между производителями и потребителями согласно принципу маржинального тарифообразования. На разных энергетических установках предоставление услуг по поддержанию системной надежности является результатом многих технологических процессов и использования меха-

низмов с отличными друг от друга характеристиками, что обусловливает различие себестоимости данного товара. Стоимость данных услуг на ГАЭС по сравнению со станциями тепловой генерации очень мала, поскольку в нее не входит стоимость органического топлива. Высокая маневренность ГАЭС, широкий диапазон предоставляемых услуг по обеспечению системной надежности и их низкая себестоимость позволяют получить ощутимую прибыль в дополнение к прибыли на НОРЭМ («Независимый оператор рынка энергии и мощности»). Однако, анализ нормативной документации [2, 4] показал, что роль гидроэнергетических объектов на рынке системных услуг сильно недооценена: не учтены особенности функционирования объектов гидроэнергетики, показатели их маневренности, эффективность и многообразие услуг, которые они могут оказывать. Фактически данные нормативные акты «прописаны» под станции тепловой генерации, что подтверждают результаты первых конкурсных отборов: так *услуги по нормируемому первичному регулированию частоты* (*НПРЧ*) в 2013 году будут оказывать 9 субъектов электроэнергетики: ООО «Башкирская генерирующая компания», ОАО «ОГК-2», ОАО «Мосэнерго», ОАО «Генерирующая компания», ОАО «ИНТЕР РАО — Электрогенерация», ЗАО «Нижневартовская ГРЭС», ОАО «ЭОН Россия», ОАО «Фортум», ОАО «Энел ОГК-5». Для оказания услуг по НПРЧ были отобраны 54 энергоблока тепловых станций, обеспечивавшие плановую величину резервов первичного регулирования до ±959,16 МВт. По результатам отборов на девяти электростанциях 65 гидрогенераторов (суммарная установленная мощность более 9,4 ГВт) работали только в режиме синхронного компенсатора (СК) [5].

Для обоснования эффективности участия ГАЭС на *рынке услуг по обеспечению системной надежности* с точки зрения материально-технических затрат на их реализацию, а также получения наибольшей прибыли и максимального системного эффекта авторы статьи провели работу по адаптации рекомендаций и методик, действующих на отечественном и зарубежных электроэнергетических рынках [6–12], и разработали методику выбора рациональных режимов работы ГАЭС в энергосистеме в сложившихся рыночных условиях.

В настоящее время решение об участии станции в режимах, обеспечивающих системную надежность, принадлежит генерирующей компании, в состав которой входит ГАЭС. Главная цель компании в действующей системе рыночных взаимоотношений — получение максимальной прибыли.

В нашей работе рассмотрены следующие режимы работы ГАЭС по обеспечению системной надежности (рис. 1):

Рис. 1. Режимы работы ГАЭС по обеспечению системной надежности, учтенные в расчетной модели

регулирование и изменение нагрузки по заданному графику — режимы турбинный (ТР) и насосный (НР), автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ);

резервирование мощности (вращающийся (ВР) и невращающийся (НВР) резервы);

поддержание напряжения за счет регулирование реактивной мощности в режиме синхронного компенсатора.

Анализ отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам управления и оптимизации режимов работы ГАЭС, а также особенностям их функционирования в условиях плановой и рыночной экономик, показал, что данными вопросами занимались Т.М. Алябышева, Н.В. Арефьев, Ю.С. Васильев, В.М. Горнштейн, М.П. Федоров, Т.А. Филиппова, В.С. Шарыгин, Д.С. Щавелев и др. В их работах отражены фундаментальные методики оптимизации режимов работы энергетических объектов с точки зрения системного подхода. В работах В.В. Елистратова, В.А. Зубакина, А. Вуоринена, М. Дж. Каради, Дж. Раймонда, Дж. Уарнока и др. рассматривалось и учитывалось влияние на выбор режимов современных рыночных механизмов и рисков. Наш анализ позволил выделить критерии выбора рациональных режимов работы ГАЭС и составить их классификацию, представленную на рис. 2.

Основой разработанной методики выбора рациональных режимов служит экономико-математическая модель работы ГАЭС в энергосистеме. Данная модель характеризует работу ГАЭС в рамках суточного графика нагрузки энергосистемы и основывается на определении мощности станции, работающей в различных технологических режимах, с учетом ряда ограничений: режимных, системных и смежных водопользователей.

Выбор рациональных режимов работы ГАЭС в энергосистеме осуществляется по критерию получения максимальной годовой прибыли станции, рассчитываемой как разность годового дохода ГАЭС и ее годовых эксплуатационных издержек.

В модели учтены затраты, имеющие место при работе станции в режимах по обеспечению системной надежности, а также системный эффект ГАЭС [13]. Наряду с тарифом, определяемым согласно действующим рекомендациям, предложено начислять надбавку, пропорциональную системной эффективности ГАЭС, денежный эквивалент которой определяют следующие показатели:

снижение затрат на топливо ТЭС;

дополнительная прибыль от снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу;

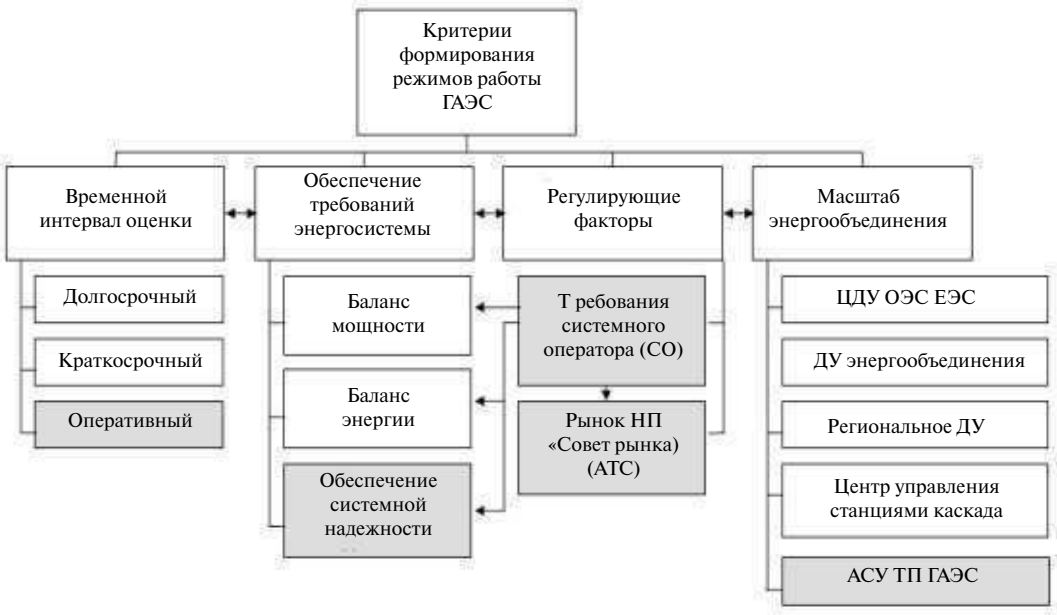


Рис. 2. Классификация критериев формирования режимов работы ГАЭС по обеспечению системной надежности

уменьшение расходов на ремонты оборудования ТЭС;

дополнительная прибыль в случае превышения количества переходов в процессе регулирования нормативных значений за счет увеличения амортизационных отчислений (для режимов СК и АРЧМ).

Алгоритм выбора рационального режима работы ГАЭС представлен на рис. 3.

Разработанная методика реализована в программном комплексе «Эффективность ГАЭС на рынке услуг по обеспечению системной надежности» и апробирована на примере работы Днестровской ГАЭС в ОЭС Украины [14].

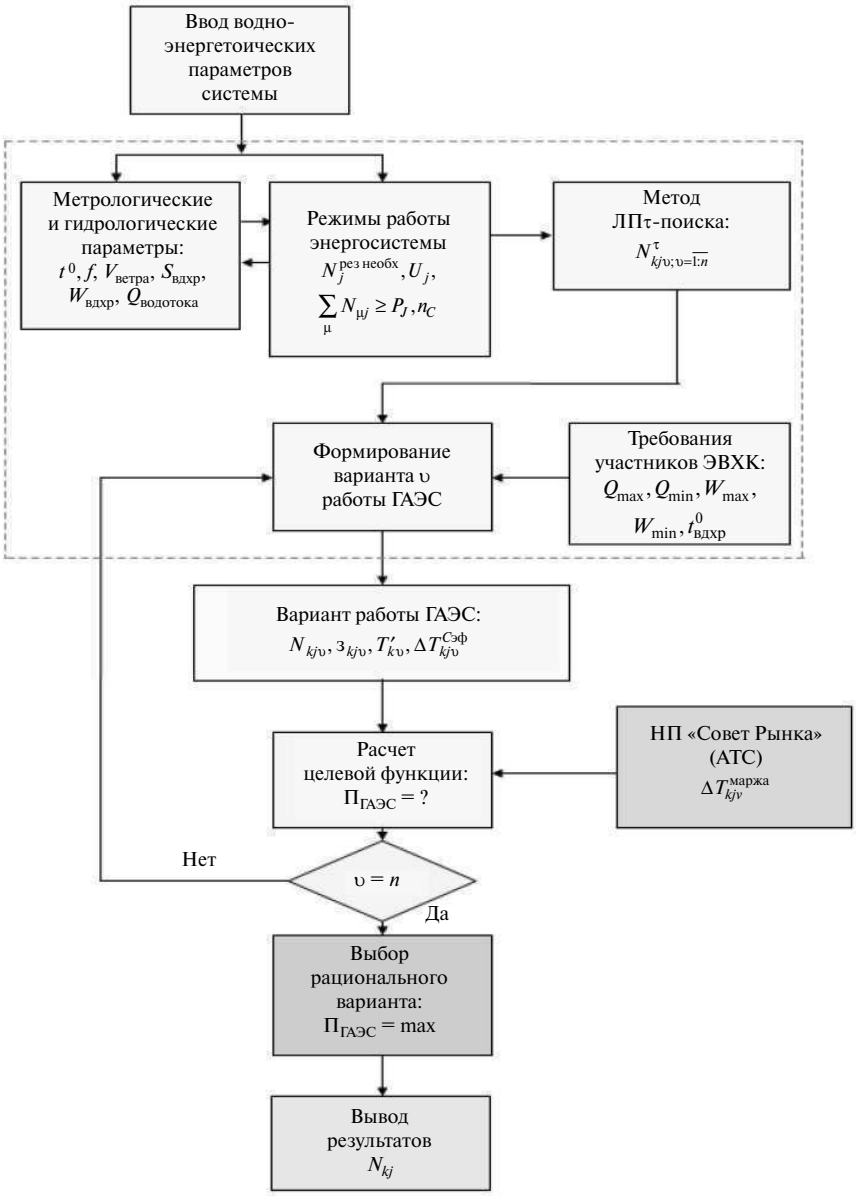


Рис. 3. Алгоритм выбора рациональных режимов работы ГАЭС

t_0 — среднемесячная температура воздуха региона; f — характерная влажность воздуха; Vветра — характерные скорости ветра; $S_{вдхр}$ — площадь водосбора; $W_{вдхр}$ — объем водохранилища; $Q_{водотока}$ — расходные характеристики стока; $N_j^{рез.необх}$ — необходимая мощность резерва (вращающегося и невращающегося), определяемая СО по условиям работы энергосистемы; U_j — напряжение в контрольном пункте энергосистемы, определяемое в зависимости от значений реактивной мощности; $N_{\mu j}$ — мощность станции μ; P_j — потребление в энергосистеме в дискретный промежуток ремени j; n_c — частота электрического тока в энергосистеме; $N_{kj\upsilon}$ — мощности ГАЭС, задействованные в режиме k в дискретный промежуток времени j для варианта υ; υ — порядковый номер варианта расчета; n — количество вариантов работы ГАЭС в режимах по обеспечению системной надежности; Q_{min} и Q_{max} — соответственно максимально и минимально допустимые расходы станции по условиям требований участников ЭВХК; W_{min} и W_{max} — соответственно максимально и минимально допустимые объемы водоема ГАЭС по условиям требований участников ЭВХК; $t_{вдхр}$ — значение температуры воды в водохранилище; $з_{kj\upsilon}$ — удельные эксплуатационные затраты на единицу установленной мощности в режиме k для варианта υ; $T'_{k\upsilon}$ — тарифы на работу ГАЭС в режиме k для варианта υ; $\Delta T^{Сэф}_{k_j}$ — тарифная надбавка за системный эффект ГАЭС при оказании услуги k в дискретный промежуток времени j для варианта υ; ПГАЭС — годовая прибыль ГАЭС; $\Delta T^{маржа}_{k_j}$ — разница между тарифами ГАЭС за оказание услуги k с учетом системных эффектов и рыночным значениям тарифа на данную услугу в дискретный промежуток времени j для варианта υ; N_{kj} — мощности ГАЭС; задействованные в режиме k в дискретный промежуток времени j

Таблица 1

Варианты работы ГАЭС в течение суток

Зона графика нагрузки	Режимы работы станции, продолжительность		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Ночь	НР (6)		
Утро	СК (2)		
День (пик дневной нагрузки)	ТР и АРЧМ, 3 час.	НВР, 3 час.	ВР нагрузка 50 %, 3 час.
День (спад дневной нагрузки)	НР (4)	–	НР, 4 час.
Вечер (пик вечерней нагрузки)	ТР и АРЧМ, 4 час		
Вечер (спад нагрузки)	СК, 5 час.		

По результатам анализа суточных графиков нагрузки ОЭС Украины и Днестровской ГАЭС выбраны три расчетных варианта оперативных режимов работы этой станции в шести характерных зонах суточного графика нагрузки. Они представлены в табл. 1.

Графическое отображение работы ГАЭС в суточном графике нагрузки приведено на рис. 4.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: $Э_{1s}$ — суточная выработка электроэнергии в режиме ТР, кВт·ч; $Э_{2s}$ — суточное потребление электроэнергии в режиме НР, кВт·ч; $Э_{3s}$ — суточная выработка электроэнергии в режиме АРЧМ, кВт·ч; $Э_{4s}$ — суточное потребление электроэнергии при работе в режиме СК, кВт·ч; $Э_{5s}$ и $Э_{6s}$ — суточная выработка электроэнергии, кВт·ч, при работе в ТР за счет мощностей, задействованных соответственно в режимах ВР и НВР.

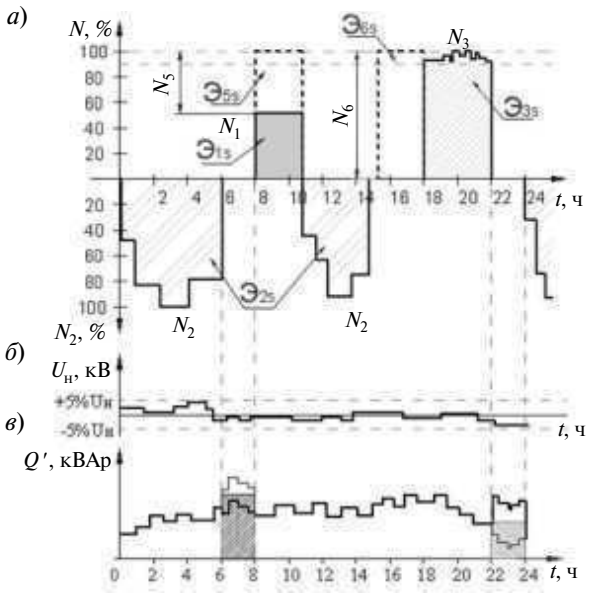


Рис. 4. Суточные графики работы ГАЭС в режимах ТР, НР, АРЧМ, СК, ВР и НВР

(*а* — выработка и потребление электроэнергии; *б* — напряжение; *в* — выработка реактивной мощности)

Изменение структуры мощностей в ОЭС Украины в течение расчетного периода учитывалось посредством коэффициентов $k_{АЭС}$ и $k_{ТЭС}$, характеризующих долю участия атомных и тепловых станций в выработке электроэнергии, которую потребляет ГАЭС при работе в насосном режиме в часы ночного и дневного спадов нагрузки в энергосистеме.

Для каждого из трех вариантов проведены расчеты по определению денежного эквивалента системного эффекта и снижения эмиссии CO_2, полученных в результате работы ГАЭС в режимах НР, ТР, АРЧМ, СК, ВР и НВР в течение всего расчетного периода.

Результаты расчетов показали положительное влияние ГАЭС на функционирование всей энергосистемы, что отражается в изменении коэффициента неравномерности графика нагрузки от значения 0,72 до 0,8.

Результаты расчетов тарифов ГАЭС при работе в режимах по обеспечению системной надежности показывают, что с учетом надбавок за системные эффекты они составят от 1300 до 3000 руб./МВт·ч и попадают в доверительный диапазон от 1650 до 3850 руб./МВт·ч по данным отечественного и зарубежных электроэнергетических рынков (США, Германии, Франции и др.).

Анализ полученных расчетных данных о влиянии на гидроагрегаты количества переходов в режимы СК и АРЧМ в процессе регулирования показал, что вследствие активного участия ГАЭС в таких режимах происходит снижение ресурса гидроагрегатов: на 50 % для АРЧМ и на 3 % для СК. Это снижение ресурса гидроагрегатов было учтено в расчетах посредством корректировки размеров амортизационных отчислений, что привело к увеличению одноставочного тарифа на электроэнергию ГАЭС на 4 %.

Расчет одноставочного тарифа на электроэнергию Днестровской ГАЭС с учетом всех надбавок показывает, что его значения изменяются в диапазоне 1458–1950 руб./МВт·ч и составляют 107–143 % от величины, рассчитанной согласно действующим рекомендациям (1363 руб./МВт·ч).

Результаты расчета прибыли Днестровской ГАЭС с учетом и без учета тарифных надбавок для выбранного рационального варианта представлены на рис. 5.

Таким образом, введение тарифных надбавок за системный эффект значительно улучшает показатели экономической эффективности Днестровской ГАЭС (см. рис. 5): сроки окупаемости DPP ($T_{ок}$) строительства второй очереди станции уменьшаются на 3 года, чистый дисконтированный доход (ЧДД) NPV увеличивается более, чем в 2,5 раза, внутренняя норма доходности (ВНД) IRR и индекс доходности (ИД) PI — в 2 раза (табл. 2.).

Таблица 2

Показатели эффективности работы Днестровской ГАЭС в рациональных режимах с учетом и без учета тариф

Сценарий	$T_{ок.д}$ (DPP), лет	ЧДД (NPV), млрд. руб.	ВНД (IRR), %	ИД (PI)
Рациональный с тарифными надбавками	9,47	20, 1	13,67	4,35
Рациональный без тарифных надбавок	12,41	7, 2	6,71	2,20

Выводы, сделанные в нашем исследовании:

Максимальный системный эффект наблюдается в периоды работы энергосистемы, характеризуемые высокой долей АЭС ($k_{АЭС}\to1$), ночную базисную энергию которых ГАЭС потребляет в НР.

Режим АРЧМ рационален в часы пика вечерней нагрузки при работе ГАЭС в энергосистемах любого типа.

Значение коэффициента $k_{ТЭС}$ — главный определяющий фактор при выборе рациональных режимов работы ГАЭС в часы пика дневной нагрузки.

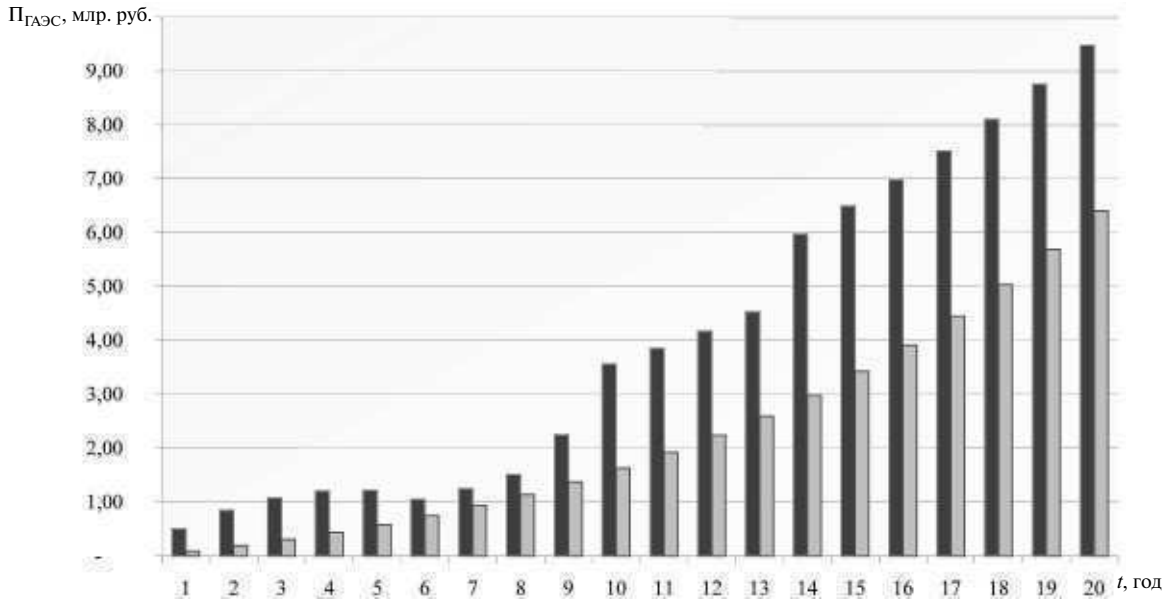


Рис. 5. Диаграмма изменения прибыли ГАЭС для рационального варианта с учетом (■) и без учета (■) тарифных надбавок

Режим АРЧМ рационален в часы дневного пика графика нагрузки при работе ГАЭС в периоды, характеризуемые низкими значениями коэффициента $k_{ТЭС}$ ($k_{ТЭС}\to 0$).

Режим НВР рационален в часы дневного пика графика нагрузки при работе ГАЭС в энергосистемах, характеризуемых высокими значениями коэффициента $k_{ТЭС}$ ($k_{ТЭС}\to 1$).

При превышении в процессе регулирования количеством переходов в режимы АРЧМ и СК нормативных значений следует провести корректировку амортизационных отчислений ГАЭС в сторону их увеличения. Корректировка амортизационных отчислений на примере Днестровской ГАЭС привела к увеличению одноставочного тарифа на электроэнергию на 4 %.

Тарифы на электроэнергию ГАЭС должны включать надбавки за работу в режимах, обеспечивающих системную надежность, экономию органических видов топлива, снижение выбросов CO_2 и затрат на ТЭС, что увеличит размеры гарантированной прибыли станции, явится стимулом для дополнительных инвестиций в строительство и модернизацию ГАЭС и повысит эффективность работы энергосистемы в целом.

Данные исследования выполняются при поддержке Госконтракта № 14.B37.21.0302 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» и гранта Президента РФ НШ-4807.2012.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учебный центр НП «Совет рынка». Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации [Текст].— М.: 2012.— 368 с.

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.03.2010 г. № 117 «Правила отбора субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по обеспечению системной надежности, и оказания таких услуг» [Текст].— М., 2010.

3. **Шкатов, В.А.** Системные услуги на рынке электроэнергии [Электрон. ресурс] / В.А. Шкатов // Интернет-версия журнала «ЭнергоРынок».— 2004— № 9.

4. **Методические указания** по расчету цен (тарифов) на услуги по обеспечению системной надежности [Текст].— Утв. Приказом Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) от 31 августа 2011 г. № 201-э/1.

5. СО ЕЭС завершил отбор мощностей для оказания услуг по обеспечению системной надежности [Электрон. ресурс].— Интернет-издание информ. агентства «Big Electric Power News». Раздел: Производство.— 27.12.2012.— Доступ: http://www.bigpower-news.ru/news/document47027.phtml

6. **Алябышева, Т.М.** О методах оптимизации режимов энергосистем и энергообъединений [Текст] / Т.М. Алябышева, Ю.И. Моржин, Т.Н. Протопопова, Е.В. Цветков // Электрические станции.— 2005. №1.— С. 44–49.

7. **Васильев, Ю.С.** Автоматизированное управление в гидроэнергетике / Ю.С. Васильев, Т.С. Жакова, И.С. Саморуков.— СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008.— 131 с.

8. **Васильев, Ю.С.** Компьютерные технологии в научных исследованиях и проектировании объектов возобновляемой энергетики [Текст] / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, И.Г. Кудряшева.— СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008.— 259 с.

9. **Горнштейн, В.М.** Методы оптимизации режимов энергосистем [Текст] / В.М. Горнштейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев.— М.: Энергоиздат, 1981.— 336 с.

10. **Филиппова, Т.А.** Оптимизация энергетических режимов агрегатов гидроэлектростанций [Текст] / Т.А. Филиппова.—М.: Энергия, 1975.— 203 с.

11. **Vuorinen Asko.** Business Strategies in Ancillary Service Markets [Text].— Ekoenergo Oy. 2007.

12. **Сидоренко, Г.И.** Экономика установок нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [Tekst] / Г.И. Сидоренко, И.Г. Кудряшева, В.И. Пименов.— СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008.— 248 с.

13. **Елистратов, В.В.** Методы повышения системной и экономической эффективности гидроаккумулирующих станций [Текст] / В.В. Елистратов, И.Г. Кудряшева, Ю.А. Мирошникова // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.— Т. 266.— СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2012.— С. 99–108.

14. **Кудряшева, И.Г.** О значении гидроаккумулирующих станций в энергосистеме Украины [Текст] / Кудряшева И.Г., Ю.А. Мирошникова // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 2 (123).— С. 109–113.

REFERENCES

1. Uchebnyi tsentr NP «Sovet rynka». Sovremennaia rynochnaia elektroenergetika Rossiiskoi Federatsii [Tekst].— Moskva, 2012.— 368 s. (rus.)

2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 03.03.2010 g. № 117 «Pravilakh otbora sub»ektov elektroenergetiki i potrebitelei elektricheskoi energii,

okazyvaiushchikh uslugi po obespecheniiu sistemnoi nadezhnosti, i okazaniia takikh uslug» [Tekst].— (rus.)

3. **Shkatov V.A.** Sistemnye uslugi na rynke elektroenergii [Tekst] // Internet-versiia zhurnala «EnergoRynok».— 2004. № 9. (rus.)

4. Metodicheskie ukazaniia po raschetu tsen (tarifov) na uslugi po obespecheniiu sistemnoi nadezhnosti [Tekst].— Utv. Prikazom Federal'noi sluzhby po tarifam (FST Rossii) ot 31 avgusta 2011 g. № 201-e/1(rus.)

5. SO EES zaverenie otbor moschnostey dla okozania uslug [Elektron. resurs]: http://www.bigpowernews.ru/news/document47027.phtml. (rus.)

6. **Aliabysheva T.M., Morzhin Iu.I., Protopopova T.N., Tsvetkov E.V.** O metodakh optimizatsii rezhimov energosistem i energoob»edinenii [Tekst] // Elektricheskie stantsii.— 2005. №1.— S. 44–49. (rus.)

7. **Vasil'ev Yu.S., Zhakova T.S., Samorukov I.S.** Avtomatizirovannoe upravlenie v gidroenergetike [Tekst].— SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 131 s. (rus.)

8. **Vasil'ev Yu.S., Kubyshkin L.I., Kudriasheva I.G.** Komp'iuternye tekhnologii v nauchnykh issledovaniiakh i proektirovanii ob»ektov vozobnovliaemoi energetiki [Tekst].— SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 259 s. (rus.)

9. **Gornshtein V.M., Miroshnichenko B.P., Ponomarev A.V.** Metody optimizatsii rezhimov energosistem [Tekst].— M.: Energoizdat, 1981.— 336 s. (rus.)

10. **Filippova, T.A.** Optimizatsiia energeticheskikh rezhimov agregatov gidroelektrostantsii [Tekst].— Moskva: Energiia, 1975.— 203 s. (rus.)

11. **Vuorinen, Asko.** Business Strategies in Ancillary Service Markets [Text].— Ekoenergo Oy, 2007.

12. **Sidorenko G.I., Kudriasheva I.G., Pimenov V.I.** Ekonomika ustanovok netraditsionnykh i vozobnovliaemykh istochnikov energii [Tekst].— SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 248 s. (rus.)

13. **Elistratov V.V., Kudriasheva I.G., Miroshnikova Iu.A.** Metody povysheniia sistemnoi i ekonomicheskoi effektivnosti gidroakkumuliruiushchikh stantsii [Tekst] // Izvestiia VNIIG im. B.E. Vedeneeva, SPb.: Izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2012.— T. 266. S. 99–108. (rus.)

14. **Kudriasheva I.G., Miroshnikova Iu.A.** O znachenii gidroakkumuliruiushchikh stantsii v energosisteme Ukrainy [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2011. № 2 (123).— S. 109–113. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕЛИСТРАТОВ Виктор Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры водохозяйственного и гидротехнического строительства, директор научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбГПУ, председатель научного совета по проблемам возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского центра РАН, Заслуженный энергетик РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; elistratov@cef.spstu.ru

КУДРЯШЕВА Ирина Григорьевна — кандидат технических наук доцент кафедры водохозяйственного и гидротехнического строительства старший научный сотрудник научно-образовательного Центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; kudr@cef.spstu.ru

МИРОШНИКОВА Юлия Александровна — инженер научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; miroshnikova_85@mail.ru

AUTHORS

ELISTRATOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politeknicheskaya Str.29, St. Petersburg, Russia; e-mail: elistratov@cef.spbstu.ru

KUDRYASHEVA Irina G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politeknicheskaya Str.29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kudr@cef.spbstu.ru

MIROSHNIKOVA Julia A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politeknicheskaya Str.29, St. Petersburg, Russia; e-mail: miroshnikova_85@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.577

Е.А. Кондратьева, А.А. Кондратьев,
В.В. Сергеев, А.М. Симонов

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ КОМПРЕССОРАМИ

E.A. Kondratyeva, A.A. Kondratyev,
V.V. Sergeev, A.M. Simonov

SELECTION OF PARAMETERS OF HEAT PUMPS WITH CENTRIFUGAL COMPRESSOR

Рассмотрена методика анализа эффективности и выбора показателей тепловых насосов при различных заданных условиях, приведен ряд количественных показателей их работы в рассматриваемых областях среднего и высокого температурных уровней при работе на хладагенте R134a. Методика позволяет выбрать оптимальное рабочее вещество.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС. ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР. КОМБИНИРОВАННЫЙ ЦИКЛ. ТУРБИНА. ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ. КПД.

This paper includes overview of effectiveness analysis method and the method of heat pump parameters selection under different conditions. An example of several numerical indexes of heat pump's operation at middle and high temperature levels utilizing refrigerant R134a. This method allows to choose optimal working refrigerant based on given temperature range.

HEAT PUMP. CENTRIFUGAL COMPRESSOR. COMBINED CYCLE. TURBINE. HEAT PERFOMANCE. HEAT EFFICIENCY RATINGS. EFFICIENCY.

Тепловые насосы находят все более широкое применение в теплоэнергетике, и потому их развитие и совершенствование весьма актуально для отрасли. Основное их использование — в системах отопления и теплоснабжения индивидуальных и общественных помещений, а также в промышленных технологических процессах. Во всех этих случаях применения тепловых насосов решается задача сбережения энергоресурсов.

В соответствии с назначением тепловых насосов определяются параметры их теплопроизводительности Q_h. Величины Q_h находятся в пределах от 5–10 кВт и ниже для установок индивидуального теплоснабжения, но достигают 1–2 МВт в установках промышленнго применения [1].

Тепловые насосы, как и холодильные машины, работают по обратному термодинамическому циклу, где один из главных процессов — это сжатие в компрессоре. Весьма значительное число потребителей тепловых насосов, как индивидуальных, так и промышленных, обеспечивается установками с компрессорами объемного сжатия, в основном поршневыми. Крупные установки с тепловой мощностью Q_h примерно более 500 кВт работают с центробежными компрессорами. Одно из важных направлений совершенствования энергетических машин связано с расширением применения центробежных компрессоров с производительностью, которая обеспечивается компрессорами объемного сжатия. При этом реализуются такие преимущества центробежных компрессоров по сравнению с поршневыми, как улучшение массо-габаритных показателей установок, повышение их надежности, ресурса, снижение затрат на обслуживание при эксплуатации. Замена поршневых компрессоров центробежными при обеспечении определенных значений теплопроизводительности Q_h и температурных режимов работы актуальна также и для тепловых насосов. Задачей

при этом является установление нижних границ значений теплопроизводительности $Q_{h\,\min}$, при которых эта замена оказывается оправданной, не приведет к снижению эффективности работы компрессора. Границы связаны с допустимыми диаметральными размерами рабочего колеса компрессора, ниже которых невозможно обеспечить оптимальные соотношения формы проточной части. Важно также установить, при каких параметрах теплового насоса возможно применение центробежного компрессора в одноступенчатом исполнении. Применение в тепловых насосах одноступенчатых центробежных компрессоров делает их более конкурентными; реализуются их большие преимущества перед установками с поршневыми компрессорами благодаря компактности, надежности, простоте в эксплуатации и обслуживании.

В число задач нашего исследования входит определение областей параметров тепловых насосов — температурных режимов и теплопроизводительностей, при которых целесообразно применять установки с центробежными компрессорами.

Рассмотрены показатели циклов тепловых насосов для двух температурных режимов их работы: среднетемпературного и высокотемпературного. При среднем температурном режиме приняты величины температур вырабатываемого тепла в пределах t_k = (40–50) °С. При таких температурах, в частности, предполагается работа панельного и воздушного отопления, а также теплоснабжения. При высоком температурном режиме рассмотрены температуры вырабатываемого тепла в интервале t_k = (55–75) °С, что соответствует применению тепловых насосов в различных промышленных технологических процессах, а также в отоплении и теплоснабжении. Температуры t_0 нижнего уровня лежат в пределах от –10 °С до +50 °С. На нижнем температурном уровне предполагается использование тепла окружающей среды, а также утилизация сбрасываемого производственного тепла.

Наряду с тепловыми насосами, работающими по обратному циклу, известно применение установок с циклом трансформации тепла, включающим прямой и обратный циклы. Такие циклы имеют в определенных условиях перспективы применения в теплонасосных установках с центробежным компрессором и приводом от турбины, работающей на хладагенте [2]. При такой схеме установки достигается ряд достоинств: отсутствие повышающей передачи (мультипликатора) для привода компрессора, а при расположении приводной турбины в одном корпусе на одном валу с компрессором обеспечивается возможность полной герметичности турбокомпрессорного агрегата без применения специальных уплотнений.

Принципиальная схема и цикл такой установки представлены на рис. 1 и 2. В испарителе подводится тепло q_0 к хладагенту от внешней среды — источника нижнего температурного уровня t_0; образовавшийся в процессе кипения (*4–1*) пар поступает в компрессор, сжимается (*1–2*), идет в конденсатор, где конденсируется (*2–3*) с выделением тепла $q_к$ верхнего температурного уровня $t_к$ во внешнюю среду — потребителю. Осуществляется обратный цикл.

После конденсатора часть жидкого хладагента подается насосом (*3–5*) в парогенератор, кипит, перегревается (*5–6*) за счет тепла $q_г$, поступает в турбину и далее, смешавшись с паром хладагента после компрессора, направляется в конденсатор. Осуществляется прямой цикл. Потребителю поступает тепло, выделившееся в результате конденсации пара после компрессора и после турбины. При исследовании были построены в координатах *i*-lg*p* (удельная энтальпия — давление) и рассчитаны 120 вариантов

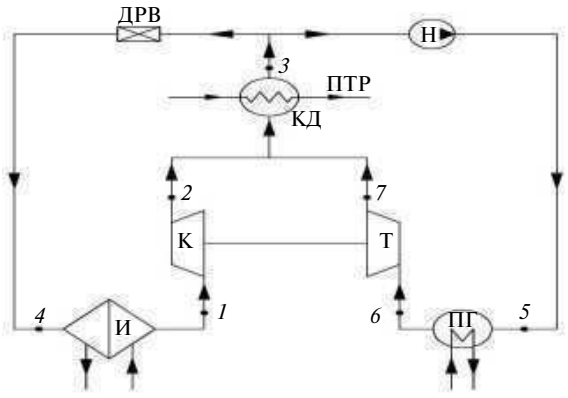


Рис. 1. Схема теплового насоса с приводной турбиной, работающей на паре хладагента:
К — компрессор; Т — турбина; КД — конденсатор; И — испаритель; ПГ — парогенератор; ПТР — потребитель тепла; ДРВ — дроссельный вентиль; Н — насос; *1* — вход в компрессор; *2* — выход из компрессора; *3* — выход из конденсатора; *4* — вход в испаритель; *5* — вход в парогенератор; *6* — вход в турбину; *7* — выход из турбины

циклов тепловых насосов. В качестве рабочего вещества принят альтернативный озоносберегающий хладагент R134a [3], близкий по термодинамическим свойствам хладону R12, который подлежит исключению из применения.

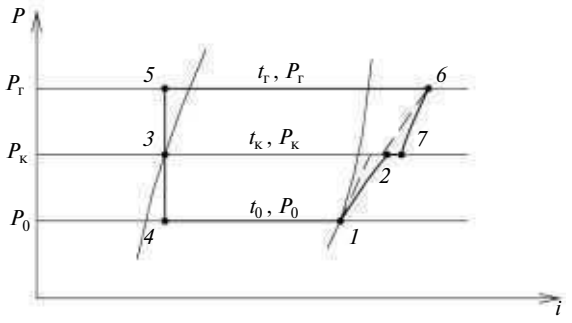


Рис. 2. Схема цикла теплового насоса с приводной турбиной, работающей на хладагенте.
Пунктирной линией обозначены процессы в компрессоре и турбине при s = const

В процессе исследования определялись основные показатели термодинамической эффективности тепловых насосов, работающих соответственно по основному обратному и специальному комбинированному с приводной турбиной циклам: μ — тепловой (отопительный) коэффициент, φ — коэффициент трансформации, η_t — степень термодинамического совершенства. Величина μ теплового коэффициента, равная отношению q_h удельной теплопроизводительности к удельной затраченной работе определяется следующим выражением: $\mu = (i_2 - i_3)/(i_2 - i_1)$, где разность энтальпий $i_2 - i_3$ соответствует теплу, выделяемому в конденсаторе, а $i_2 - i_1$ — соответствует затраченной работе в компрессоре [5]. Значение коэффициента трансформации φ получено из отношения тепловых потоков Q_h, Вт, выделяемого в конденсаторе и $Q_г$, Вт, затраченного в парогенераторе. Выражая величины Q_h и $Q_г$ через соответствующие значения разностей энтальпий $(i_2 - i_3)$ процессов в конденсаторе и $(i_6 - i_5)$ — в парогенераторе, учитывая массовые расходы хладагента $\bar{m}_к$ через компрессор и $\bar{m}_т$ через турбину, а также условие равенства мощностей компрессора и турбины, получим

$$\varphi = \left(1 + \frac{i_6 - i_7}{i_2 - i_1}\right)\left(\frac{i_2 - i_3}{i_6 - i_5}\right).$$

В качестве критерия эффективности работы теплового насоса также принят η_t коэффициент термодинамической эффективности, равный отношению тепловых коэффициентов данного цикла и цикла Карно при одинаковых температурных условиях: $\eta = \mu/\mu_к$. При определении $\mu_к$ теплового коэффициента цикла Карно температурный уровень, при котором отводится тепло в конденсаторе, определяется по среднеинтегральной температуре $T_{ср}$ согласно зависимости

$$T_{ср} = \frac{\int_3^2 Tds}{S_2 - S_3},$$

где S_2 и S_3 значения энтропий в точках, соответствующих состоянию хладагента на выходе из компрессора и выходе из конденсатора [6]. По результатам расчетов определен также целый ряд других показателей, характеризующих параметры процессов в компрессоре и турбине. Эти показатели будут рассмотрены ниже.

Результаты расчетов представлены на рис. 3–7. Расчеты циклов в указанном интервале температур проведены как для идеальных условий работы компрессора и турбины при адиабатических процессах, так и с учетом газодинамических потерь в их проточной части, определенных различными величинами изоэнтропных КПД $\eta_к$ компрессора и $\eta_т$ турбины. Принятый диапазон изменения КПД включает их значения $\eta_{ад} = 0{,}8–0{,}85$ и выше, реально достигаемые в современных машинах, и значения $\eta_{ад} = 0{,}75$ достаточно низкого уровня.

На рис. 3–4 представлены результаты расчетов циклов, построенных без учета потерь. Они показывают, что коэффициенты μ и φ меняются в широких пределах, достигают более низких значений μ = 4,3–6,8 и φ = 1,3–1,45 с уменьшением температур нижнего уровня и существенно возрастают с ростом температур этого уровня, достигая весьма высоких величин. Кривые μ(*t*) и φ(*t*) на рис. 3, 4 ограничивают области значений, в пределах которых могут находиться реальные показатели эффективности тепловых насосов с учетом потерь при заданных температурных условиях. В рассматриваемой области температур показатели эффективности тепловых насосов μ и φ, сохраняя свои значения больше единицы, меняются в широких пределах. Это явно выраженные

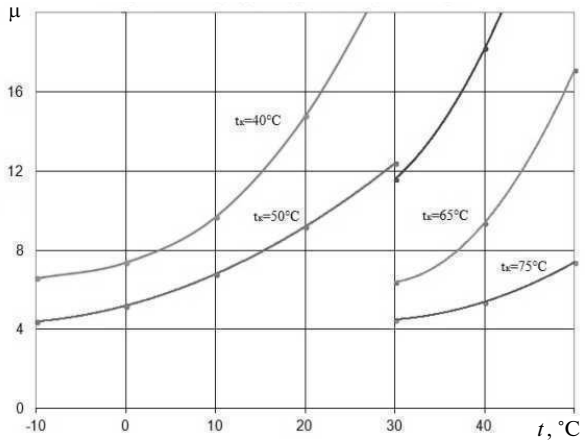


Рис. 3. Зависимость теплового коэффициента μ от температуры нижнего температурного уровня t_0 при различных температурах $t_к$ верхнего температурного уровня без учета потерь

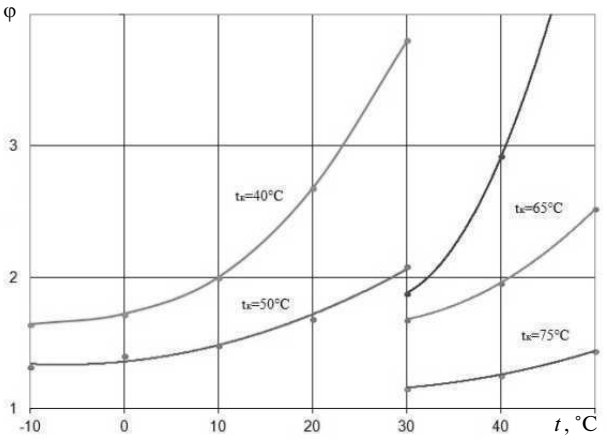


Рис. 4. Зависимость теплового коэффициента φ от температуры нижнего температурного уровня t_0 при различных температурах $t_к$ верхнего температурного уровня без учета потерь

зависимости от $\Delta t = t_к - t_н$ — разницы повышения температур в тепловом насосе, т. е. от разности температур $t_к$ среды потребителя, получившей тепло в конденсаторе, и $t_н$ внешней среды, отдающей тепло в испарителе. С повышением этой разницы эффективность теплового насоса снижается. Например, изменение значений этой разности от $\Delta t_{min} = 5^\circ$ до $\Delta t_{max} = 50^\circ$ приводит к изменению показателей φ от $\varphi_{max} = 6{,}7$ до $\varphi_{min} = 1{,}3$. При равных условиях показатели φ эффективности тепловых насосов, работающих по специальному циклу трансформации тепла, ниже показателей μ обычных тепловых насосов обратного цикла. Это объясняется тем, что различаются процессы, определяющие затрату потребляемой энергии на осуществление сравниваемых по показателям μ и φ циклов. Коэффициент φ характеризует эффективность сложного процесса, включающего совместную работу прямого и обратного циклов [7]. При этом количество энергии, затрачиваемой на работу теплового насоса, является тепловой энергией, преобразуемой в парогенераторе и в паровой турбине в механическую энергию на валу компрессора. Коэффициент μ учитывает только механическую энергию, подводимую на привод компрессора.

На рис. 5–7 представлены данные, которые показывают влияние на показатели эффективности теплового насоса μ и φ коэффициентов полезного действия $\eta_к$ компрессора и $\eta_т$ турбины. Изменения КПД рассмотрены в широких пределах значений: от весьма низких, ниже среднего уровня в современных турбомашинах, до высоких реально достигаемых величин $\eta = 0{,}8–0{,}85$ и более. Данные показывают значительную роль влияния эффективности турбомашин на экономичность тепловых насосов.

Расчеты включают также определение показателей эффективности тепловых насосов, значений коэффициентов η_t — степеней термодинамического совершенства циклов. Величины η_t выражаются отношением тепловых коэффициентов рассматриваемого и обратимого циклов при одинаковых режимах работы: $\eta_t = \mu/\mu_к$. В качестве обратимого цикла принят цикл Карно, тепловой коэффициент которого $\mu_к$ определяется только температурами верхнего и нижнего уровней: $\mu_к = T_к/(T_к - T_0)$. Расчеты показывают, что величины η_t, характеризуя полезность затраченной работы цикла, зависят от КПД компрессора и турбины, увеличиваясь с ростом $\eta_к$ и $\eta_т$. Зависят также от разности температур $t_к$ верхнего и t_0 нижнего уровней, от близости давления и температуры процесса конденсации к их значениям в критической точке рабочего вещества, т. е. зависят от свойств хладагента. При приближении параметров процесса конденсации к критической точке значения η_t степени термодинамического совершенства снижаются. В рассматриваемой области параметров, характеризующих циклы тепловых насосов, меньшим

значениям коэффициентов η_t соответствуют величины μ_t = 0,55–0,65, наибольшим — μ_t = = 0,8–0,85. Наряду с рассмотренными показателями циклов тепловых насосов, был вычислен ряд параметров, характеризующих эффективность работы центробежных компрессоров при различных режимных условиях. В их числе: $\Pi = p_к/p_н$ — отношение давлений $p_к$ на выходе и $p_н$ на входе компрессора; u_2, м/с, — окружная скорость рабочего колеса компрессора; M_u — условное число Маха, определяющее характер течения потока в проточной части компрессора (дозвуковой или сверхзвуковой); n, об/мин, — максимальная частота вращения ротора компрессора [8].

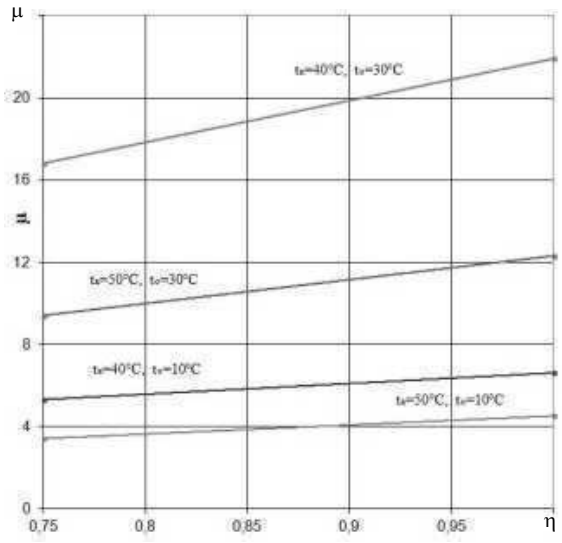


Рис. 5. Зависимость теплового коэффициента μ от КПД компрессора и турбины при различных температурах t_0 нижнего и $t_к$ верхнего температурного уровня

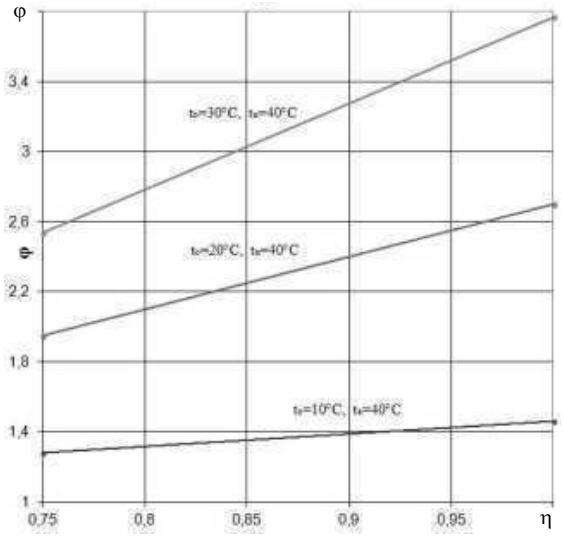


Рис. 6. Зависимость теплового коэффициента φ от КПД компрессора и турбины при различных температурах t_0 нижнего уровня и при температуре верхнего уровня $t_к$ = 40 °C

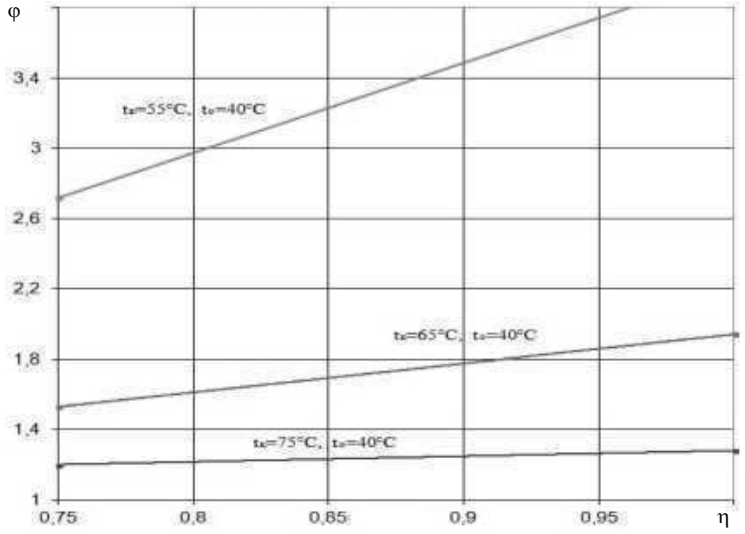


Рис. 7. Зависимость теплового коэффициента φ от КПД компрессора и турбины при различных температурах $t_к$ верхнего температурного уровня при температуре нижнего уровня t_0 = 40 °C

В рассмотренной области температурных режимов работы тепловых насосов их основные показатели, соответствующие свойствам примененного в качестве рабочего вещества хладагента R134a, дают возможность применения одноступенчатого сжатия в центробежном компрессоре при среднем температурном режиме работы — при $t_к$ = (40–50) °С, вплоть до наименьших температур нижнего уровня t_0 = (0–5) °С. При этих температурах условные числа M_u достигают предельных значений 1,45–1,5, соответствующих дозвуковому режиму течения потока в компрессоре. В области высоких температурных режимов максимальное значение чисел M_u достигается при температурах t_0 = 30 °С и $t_к$ = 75 °С и составляет величину M_u = 1,36, что также соответствует возможности одноступенчатого сжатия. При температурах t_0 = 50 °С и $t_к$ = 75 °С величина M_u снижается до значения M_u = 0,48. Для достижения требуемых параметров тепловых насосов, учитывая возможные условия их работы при высоких числах M_u, целесообразно применение центробежных компрессоров с высоконапорными ступенями.

Параметры работы ступеней в условиях тепловых насосов близки параметрам центробежных ступеней компрессоров, применяемых в ряде энергетических машин, таких, как малорасходные газотурбинные установки (транспортного типа, для передвижных электростанций, пожарных насосов), агрегаты наддува двигателей внутреннего сгорания, холодильные машины и др. [9]. В СПбГПУ имеется значительный опыт исследования и разработки подобных ступеней [4]. На основе этого опыта установлены допустимые параметры ступени компрессора для условий режимов работы тепловых насосов. В числе этих параметров: $D_{2\min}$ — минимальный диаметральный размер рабочего колеса компрессора; рекомендуемые значения коэффициентов $\Phi_р$ расхода и $\psi_т$ напора; n — максимальная частота вращении ротора. Эти данные важны для установления $Q_{h\,\min}$ — минимальных значений теплопроизводительности тепловых насосов, при которых возможно применение центробежных компрессоров в рассмотренной области температурных режимов. Значения $Q_{h\,\min}$, Вт, определяются по зависимости, полученной с использованием вычисленных параметров центробежных ступеней в виде

$$Q_{h\min} = D_{2\min}^2 \frac{\pi \Phi_p u_2}{4v}(i_2 - i_3).$$

Здесь v, м^3/кг, — удельный объем хладагента на входе в ступень компрессора; u_2, м/с, — окружная скорость рабочего колеса; i_2 и i_3, Дж/кг, — значения энтальпий соответственно на входе и выходе конденсатора [10]. Указанные параметры задаются в следующих пределах: $D_{2\min}$ = = (0,065–0,075) м, $\Phi_р$ = (0,06–0,08). При расчете окружной скорости u_2 принимается коэффициент напора $\psi_т$ в пределах (0,05–0,07). Удельный объем пара х ладагента v, энтальпии i_2 и i_3 определяются при расчете соответствующего цикла. В результате расчетов получено, что минимальные значения теплопроизводительности тепловых насосов с применением в них центробежных компрессоров лежат в пределах от 65 до 75 кВт при наименьших температурах нижнего уровня и возрастают до 160–180 кВт в области высокого температурного режима.

В результате проведенного исследования разработана методика анализа эффективности и выбора показателей тепловых насосов при различных заданных условиях. Получен ряд количественных показателей их работы в рассматриваемых областях среднего и высокого температурных уровней при работе на хладагенте R134a. Методика позволяет выбрать оптимальное рабочее вещество. Расчетные данные показали, что в определенных областях параметров целесообразно применение тепловых насосов с центробежными компрессорами, в том числе тепловых насосов, работающих по комбинированному циклу с приводной турбиной. Такие установки перспективны, в частности для применения на утилизируемом тепле, при необходимости работы с переменными режимами на нагрев и на охлаждение, при работе в качестве повышающих термотрансформаторов, в системах кондиционирования воздуха.

Рассмотренная методика подлежит в дальнейшем развитию и дополнению исследованиями теплообменных аппаратов тепловых насосов и паровой турбины, работающей на хладагенте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рей, Д.** Тепловые насосы [Текст] / Д. Рей, Д. Макмайкл / Пер.с англ.— М.: Энергоиздат, 1982.— 224 с.

2. **Чистяков, Ф.М.** Холодильные турбоагрегаты [Текст] / Ф.М. Чистяков.— М.: Машиностроение, 1967.— 288 с.

3. Холодильные машины [Текст]: Учебник / Под ред. Л.С.Тимофеевского.— СПб.: Политехника, 2005.—998 с.

4. **Симонов, А.М.** Исследование и разработка центробежных ступеней с повышенными коэффициентами напора [Текст] / А.М. Симонов // Труды научной школы компрессоростроения.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000.— С. 189–212.

5. **Морозюк, Т.В.** Теория холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Т.В. Морозюк.— Одесса: Негоциант, 2006.— 712 с.

6. **Сакун, И.А.** Тепловые и конструктвные расчеты холодильных машин [Текст] / И.А. Сакун.— Л.: Машиностроение, 1987.— 423с.

7. **Янтовский, Е.И.** Промышленные тепловые насосы [Текст] / Е.И. Янтовский.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 128 с.

8. **Васьков, Е.Т.** Термодинамические основы тепловых насосов [Текст]: Учебное пособие / Е.Т. Васьков.— СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2007.— 127 с.

9. **Цуранов, О.А.** Холодильная техника и технология [Текст] / О.А. Цуранов, А.Г. Крысин.— СПб: Лидер, 2004.— 448 с.

10. **Кошпен, Ж.Л.** Учебник по холодильной технике [Текст] / Пер. с франц. под редакцией д-ра техн. наук В.Б. Сапожникова.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.— 1142 с.

REFERENCES

1. **Rei D., Makmaikl D.** Teplovye nasosy [Tekst] / Per. s angl.— M.: Energoizdat, 1982.— 224 s. (rus.)

2. **Chistiakov F.M.** Kholodil'nye turboagregaty [Tekst].— M.: Mashinostroenie, 1967.— 288 s. (rus.)

3. Kholodil'nye mashiny [Tekst]: Uchebnik / Pod red. L.S. Timofeevskogo.— SPb.: Politekhnika, 2005.— 998 s. (rus.)

4. **Simonov A.M.** Issledovanie i razrabotka tsentrobezhnykh stupenei s povyshennymi koeffitsientami napora [Tekst] // Trudy nauchnoi shkoly kompressorostroeniia.— SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2000.— S. 189–212. (rus.)

5. **Moroziuk T.V.** Teoriia kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov [Tekst].— Odessa: Negotsiant, 2006.— 712 s. (rus.)

6. **Sakun I.A.** Teplovye i konstruktvnye raschety kholodil'nykh mashin [Tekst].— L.: Mashinostroenie, 1987.— 423 s. (rus.)

7. **Yantovskii E.I.** Promyshlennye teplovye nasosy [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1989.— 128 s. (rus.)

8. **Vas'kov E.T.** Termodinamicheskie osnovy teplovykh nasosov. Uchebnoe posobie [Tekst].— SPb.: Izd-vo SPbGASU, 2007.— 127 s. (rus.)

9. **Tsuranov O.A., Krysin A.G.** Kholodil'naia tekhnika i tekhnologiia [Tekst].— SPb: Lider, 2004.— 448 s. (rus.)

10. **Koshpen Zh.L.** Uchebnik po kholodil'noi tekhnike [Tekst] / Perevod s frants. pod redaktsiei d-ra tekhn. nauk V.B. Sapozhnikova.— M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1998.— 1142 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНДРАТЬЕВА Екатерина Алексеевна — аспирант кафедры атомной и тепловой энергетики Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kondratyeva.e.a@mail.ru

КОНДРАТЬЕВ Алексей Анатольевич — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: alexeykondratyev@mail.ru

СЕРГЕЕВ Виталий Владимирович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой атомной и тепловой энергетики Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: sergeev_vitaly@mail.ru

СИМОНОВ Анатолий Михайлович — доктор технических наук профессор кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: simonov-33@mail.ru

AUTHORS

KONDRATYEVA Ekaterina A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kondratyeva.e.a@mail.ru

KONDRATYEV Alexey A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: alexeykondratyev@mail.ru

SERGEEV Vitaly V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: sergeev_vitaly@mail.ru

SIMONOV Anatoly M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: simonov-33@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.165

Н.А. Забелин, А.В. Лыков, В.А. Рассохин

ОЦЕНКА РАСПОЛАГАЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ РОССИИ

N.A. Zabelin, A.V. Lykov, V.A. Rassokhin

CALCULATION OF AVAILABLE HEAT POWER OF SMOKE FUMES OF GASOCOMPRESSOR UNITS OF RUSSIA'S UNITED GAS TRANSMISSION SYSTEM

В статье рассмотрена структура парка газоперекачивающих агрегатов ОАО «ГАЗПРОМ». Произведена оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов газотурбинных установок.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ГАЗОТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ. ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЕ АГРЕГАТЫ. УХОДЯЩИЕ ДЫМОВЫЕ ГАЗЫ. ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ.

In clause are viewed Gazprom's structure of fleet of gascompressor units. Heat power gascompressor units smoke fumes are estimated.

ENERGY SAVING. GAS PIPELINE. GASCOMPRESSOR UNITS. SMOKE FUMES. HEAT POWER.

ОАО «Газпром» — глобальная энергетическая компания. Основные направления деятельности ОАО «Газпром» — геологоразведка, добыча, транспортировка, хранение, переработка и реализация газа, газового конденсата и нефти, а также производство и сбыт тепло- и электроэнергии в России и за рубежом. ОАО «Газпром» принадлежат магистральные газопроводы, объединенные в Единую систему газоснабжения (ЕСГ) России.

ЕСГ России — крупнейшая в мире система транспортировки газа (рис. 1), уникальный технологический комплекс, включающий в себя объекты добычи, переработки, транспортировки, хранения и распределения газа. ЕСГ обеспечивает непрерывный цикл поставки газа от скважины до конечного потребителя.

В состав ЕСГ входят 161,7 тыс. км магистральных газопроводов и отводов, 215 линейных компрессорных станций (КС), 6 комплексов по переработке газа и газового конденсата, 25 объектов подземного хранения газа.

Деятельность ОАО «Газпром» в области энергосбережения и экологии происходит в соответствии с требованиями действующего законодательства РФ, а также внутренними документами.

Распоряжением Правительства России №1715-р от 13.11.2009 г была принята «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [1]. В соответствии с этой стратегией одним из направлений развития газовой промышленности является развитие ЕСГ и ее расширение на восток России, усиление на этой основе интеграции регионов страны. При этом энергосбережение и энергоэффективность отнесены к одним из важнейших направлений.

В ОАО «Газпром» принят ряд нормативных документов в области энергосбережения, среди них — «Концепция энергосбережения и повышения энергоэффективности на период 2011–2020 гг.» [2]. Основная задача, сформулированная в концепции, — это максимальная реализация потенциала энергосбережения во всех видах деятельности и, как следствие, снижение техногенной нагрузки на окружающую среду. Компания продолжает проведение НИОКР и внедрение инновационных технологий, которые могут дать значительный эффект экономии энергоресурсов на собственные нужды. Одно из основных на-

Рис. 1. Единая система газоснабжения России

правлений — утилизация тепла уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ).

Обеспечение линейных КС и других объектов ЕСГ электроэнергией на собственные нужды — одна из актуальных задач ОАО «Газпром». Зачастую подвод линий электропередач к объектам ЕСГ трудно выполним и дорогостоящ из-за их удаленности от крупных электростанций и единой электрической сети.

Теплота уходящих газов ГТУ может быть использована в комбинированных газопаровых установках (ГПУ) для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия может использоваться как на собственные нужды КС, так и другими находящимися по близости промышленными и гражданскими объектами. Таким образов решаются сразу две важные задачи: утилизация тепла уходящих газов ГТУ и обеспечение КС электроэнергией на собственные нужды.

Для оценки возможности применения таких ГПУ в ЕСГ должны быть известны структура парка газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ЕСГ России, использующих в качестве привода ГТУ. Кроме того, должны быть известны следующие характеристики ГТУ: мощность ГТУ; расход, температура и располагаемая тепловая мощность уходящих газов.

Задачами данной статьи являются:

анализ парка ГПА ОАО «Газпром» (по России), использующих в качестве привода ГТУ;

исследование характеристик ГПА (мощности ГТУ, расход и температура уходящих газов ГТУ);

общая оценка теоретической тепловой мощности уходящих газов ГТУ, которая может быть использована в ГПУ для выработки дополнительной электрической энергии турбиной малой мощности [3].

Состав, %, компрессорного парка ОАО «Газпром» по типу привода: газотурбинный — 87,2, электрический — 12,3, поршневой — 0,5. В структуре парка ГПА насчитывается до 58 типов ГПА с ГТУ [4], различающихся по следующим критериям: типу (стационарные, судовые, авиационные); изготовителю (отечественное и зарубежное производства); кинематической схеме; классу мощности; температуре уходящих газов за ГТУ.

Количество и характеристики ГПА с газотурбинным приводом представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика парка ГПА ОАО «Газпром»

ГПА	ГТУ	Количество агрегатов (шт.)	Мощность, МВт	Расход уходящих газов, кг/с	Температура уходящих газов за ГТУ, °С
ГТК-10	ГТК-10	646	10	86	510
ГПА-Ц-16	НК-16СТ	618	16	103,1	412
ГПА-Ц-6,3	НК-12СТ	322	6	57,6	317
ГПУ-10	ДР-59Л	268	10	81,5	330
ГТ-6–750	ГТ-6–750	129	6	47,5	415
ГПА-16 Урал	ПС-90ГП-2	121	16	58	540
ГТК-10И	MS-3002	120	10	51,8	533
ГПА-Ц-16С	ДГ-90	109	16	70	430
ГТ-750–6	ГТ-750–6	95	6	58,6	302
ГПУ-16	ДЖ-59Л2	92	16	97,6	358
ГПА-Ц-8	НК-14СТ-8	86	8	37,1	537
ГТН-6	ГТН-6	80	6	47,5	415
ГТН-16	ГТН-16	72	16	86,1	408
ГТК-25ИР	MS-5002	72	22	114	345
ГТН-25	ГТН-25	43	28	150	428
ГПА-12Р Урал	ПС-90ГП-1	34	12	48,2	540
ГТК-25И	MS-5002	33	24	118	491
ГТК-10ИР	MS-3002R	30	10	52,1	353
ГПА-16МЖ	ДЖ-59Л2	28	17	97,5	362
ГПА-Ц-18	НК-18СТ	27	18	101,2	460
ГПА-10 Урал	ПС-90ГП-3	26	10	45,7	476
ГПА-12 Урал	ПС-90ГП-1	25	12	48,2	540
PGT-10	PGT-10	24	10	42,3	472
ГТНР-25И(В)	M 5322 R (B)	24	22	114	345
Коберра-182	AVON-101	23	13	77,6	411
ГПА-16МГ	ДГ-90	21	16	70	430
Центавр Т-3002	Центавр Т-3002	20	3	16,5	410
ГПА-25 Днепр	ДН-80Л1	18	25	87	450
ГПА-16Р АЛ	АЛ-31СТ	16	16	64,5	490
ГПА-4 РМ	ГТД-4РМ	15	4	22	386
Центавр Т-4500	Центавр Т-4500	12	3	18,2	450
Коберра 16МГ	ДГ-90П1	12	16	70	430
ГПА-16 Волга ДГ	ДГ-902.1	11	16	70	430
ГПА-16Р Урал	ПС-90ГП-2	10	16	58	540
ГПА-Ц-10	НК-14СТ-10	9	10	37.6	507
ГПА-Ц-16 АЛ	АЛ-31СТ	8	16	64.5	490

Окончание табл. 1

ГПА	ГТУ	Количество агрегатов (шт.)	Мощность, МВт	Расход уходящих газов, кг/с	Температура уходящих газов за ГТУ, °С
Центавр Т-4700	Центавр Т-4700	7	3	18.5	450
ГПА-Ц-25	НК-36СТ	7	25	101	425
ГТК-5	ГТК-5	6	4	45.5	283
ГПА-16 Нева	АЛ-31СТН	6	16	64.5	490
ГТНР-25И(С)	MS-5322R(C)	6	25	119.3	349
Балтика-25	GT10B2	6	25	78.6	543
ГПА-25ДН Урал	ДН80Л1.1	6	25	87	450
Дон	ГТ-750–6	5	6	58.6	265
ПЖТ-21С	АЛ-31	5	16	66.3	490
ГПА-25Р НК	НК-36СТ	5	25	101	425
Таурус-60S	Taurus 60C	4	5	21.7	490
ГПА-16 Волга	НК-38СТ	4	16	53.7	448
ГТН-25–1	ГТН-25	4	25	102.2	500
ГТНР-16	ГТНР-16	3	16	91.5	327
ГПА-Ц-25СД	ДУ80Л1	3	25	101	425
ГПА-Ц-4	Д-336–2-4	2	4	27.5	407
ГТ-700–5	ГТ-700–5	2	4	45.5	283
ГПА-10 РМ	ГТД-10РМ	2	10	33	518
ГПА-Ц-16Р НК38	НК-38СТ	2	16	53.7	448
ГПА-25Р Урал	ПС-90ГП-25	2	25	83	543
ГПА-4 Урал	Д-30	1	4	18.9	439
ГПА-Ц-6,3РМ	ГТД-6,3РМ	1	6	21.75	430

Количество ГПА с газотурбинным приводом, как следует из табл. 1, составляет 3388 агрегатов.

По данным табл. 1 составлено распределение количества z ГТУ в зависимости от их типа, которое представлено на рис. 2.

Построенное распределение количества z ГТУ в зависимости от типа ГТУ показало, что широкое использование для привода ГПА получили следующие ГТУ: ГТК-10 (646 шт.); НК-16СТ (618 шт.); НК-12СТ (322 шт.); ДР-59Л(268 шт.). Из распределения следует, что для ГПА с газотурбинным приводом используются в основном ГТУ отечественного производства.

Далее на основе проведенного анализа структуры ГПА производится оценка располагаемой тепловой мощности уходящих дымовых газов. В основу расчетов тепловой мощности положена формула

$$Q_{\text{т}} = G_{\text{г}} \left(h_4 - h_{\text{ух г}} \right) z ,$$

где $G_{\text{г}}$ — расход дымовых газов; h_4 — энтальпия дымовых газов на выходе из ГТУ; $h_{\text{ух г}}$ — энтальпия дымовых газов на выходе из теплообменника (ТО); z — количество ГТУ.

Для пояснения производимых расчетов на рис. 3 представлена упрощенная тепловая схема комбинированной ГПУ с котлом-утилизатором (КУ) и паровой турбиной (ПТ).

Выхлопные газы после ГТУ с температурой t_4 и энтальпией h_4 поступают в КУ, где они отдают свою теплоту теплоносителю второго контура.

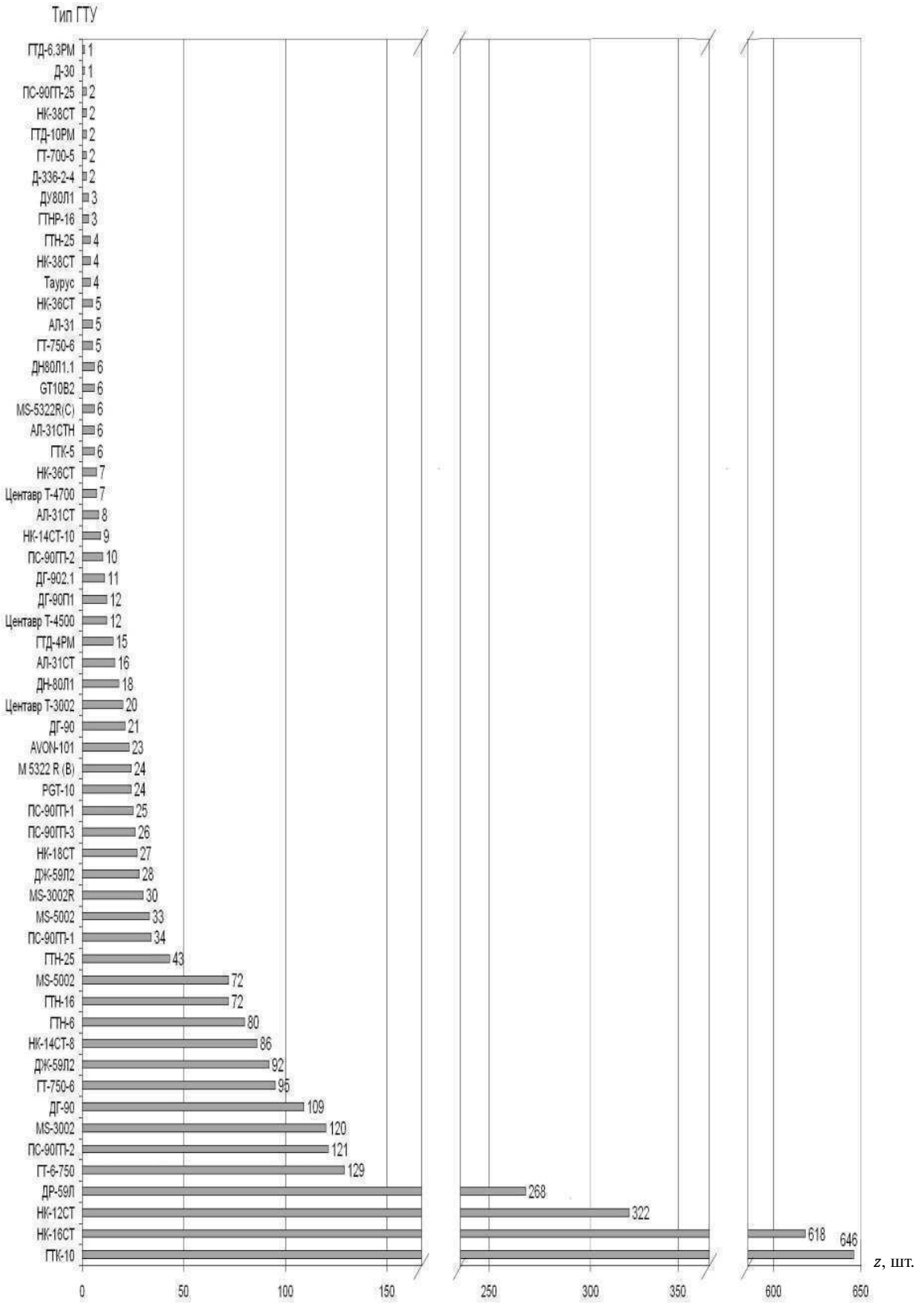


Рис. 2. Распределение количества *z* ГТУ в зависимости от типа ГТУ

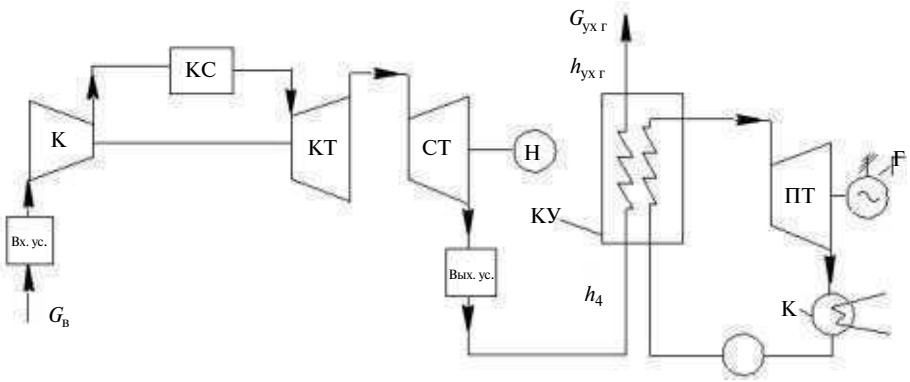


Рис. 3. Тепловая схема комбинированной ГПУ с КУ:

Вх. ус. и Вых. ус. — входное и выходное устройства; К — компрессор; КС — камера сгорания; КТ — компрессорная турбина; СТ — силовая турбина; Н — нагнетатель; КУ — котел-утилизатор; ПТ — паровая турбина; Г — электрический генератор; $К_н$ — конденсатор; ПН — питательный насос

Пар теплоносителя второго контура после КУ направляется в ПТ, которая приводит в действие электрогенератор. После КУ дымовые газы направляются в окружающую среду с температурой $t_{ух\ г}$ и энтальпией $h_{ух\ г}$.

При оценке располагаемой тепловой мощности величина температуры выхлопных газов $t_{ух\ г}$ на выходе из КУ была принята равной 110 °С. Значения температуры t_4, в зависимости от типа ГТУ, определялись по таблицам удельных выбросов загрязняющих веществ, которые представлены в СТО Газпром ХХХ-2008 [5]. Значения энтальпий выхлопных газов $h_4 = h_4(t_4)$ и $h_{ух\ г} = h_{ух\ г}(t_{ух\ г})$ определялись по таблицам теплофизических свойств продуктов сгорания стандартного углеводородного топлива при заданном коэффициенте избытка воздуха в камере сгорания $\alpha = 3$ [6, 7].

В результате проведенных расчетов было получено распределение располагаемой тепловой мощности в зависимости от типа ГТУ (ГПА), которое представлено на рис. 4.

Распределение количества ГТУ в зависимости от класса мощности, а также располагаемая мощность дымовых газов в зависимости от класса мощности ГТУ представлены в табл. 2.

В результате проведенных расчетов суммарная величина располагаемой тепловой мощности уходящих газов всех рассмотренных ГТУ составила 87,9 ГВт.

В процессе исследований была подробно проанализирована структура парка ГПА ОАО «Газпром» по типу и количеству ГТУ. Установлено, что наиболее широкое использование для привода ГПА получили следующие ГТУ: ГТК-10 (646 шт.); НК-16СТ (618 шт.); НК-12СТ (322 шт.); ДР-59Л (268 шт.).

Также была проведена оценка суммарной величины располагаемой тепловой мощности

Таблица 2

Класса мощности ГТУ, МВт	Количество ГТУ, штук	Располагаемая тепловая мощность дымовых газов ГТУ, МВт
до 5 МВт	65	421
5–10 МВт	1701	39829
10–15 МВт	204	4702
15–20 МВт	1189	35108
20 МВт и более	229	7809

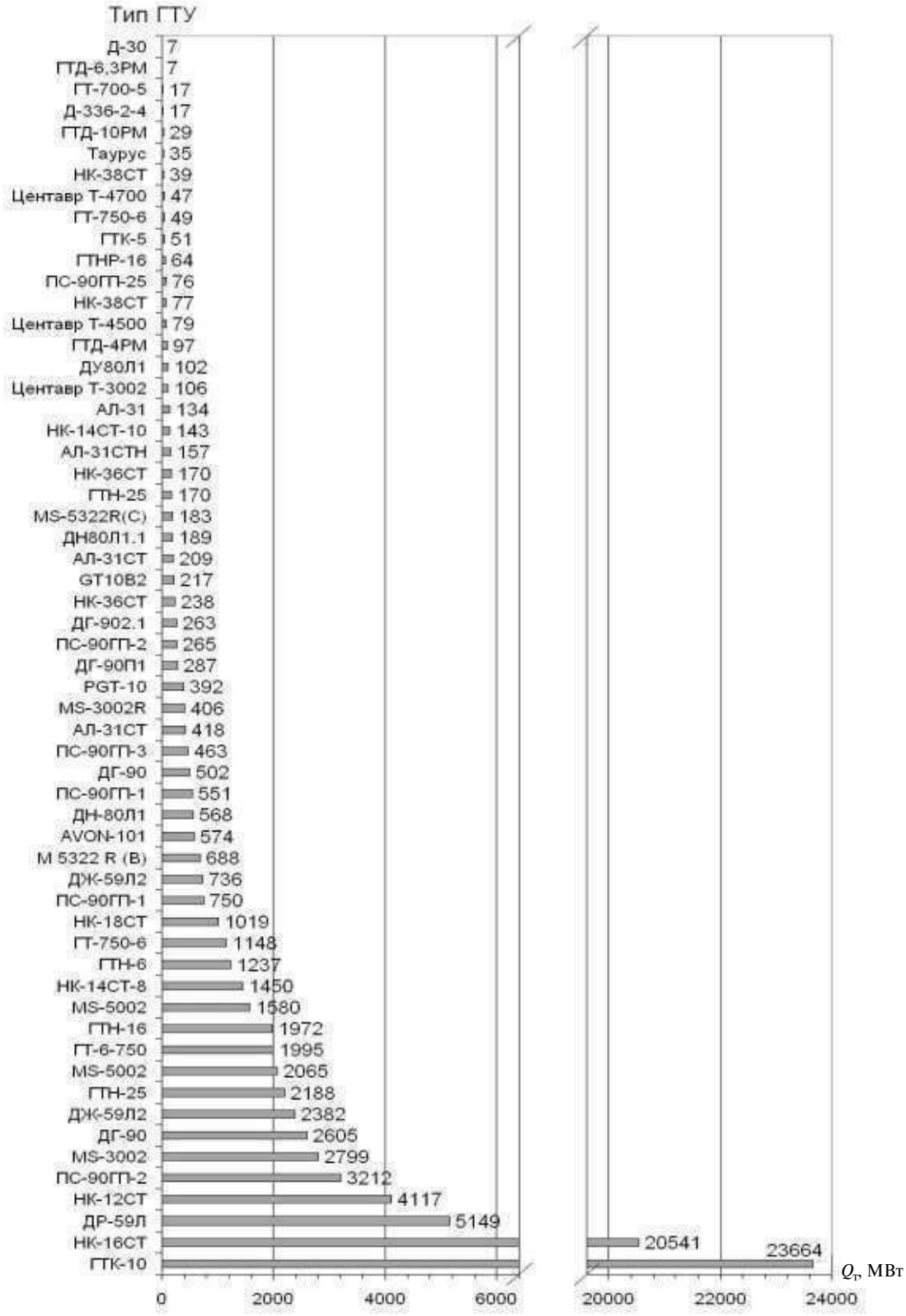


Рис. 4. Распределение располагаемой тепловой мощности в зависимости от типа ГТУ (ГПА)

уходящих газов всех рассмотренных ГТУ ЕСГ России, которая составила 87,9 ГВт. На основе этой оценки можно сделать вывод, что в ЕСГ России имеются значительные возможности в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство энергетики Российской Федерации [Электрон. ресурс] // Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy.

2. Концепция энергосбережения и повышения энергоэффективности на период 2011–2020 гг. [Электрон. ресурс]// Режим доступа: http://www.gazprom.ru/nature/energy.

3. **Беседин, С.Н** Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности с расширительной турбиной. [Текст]/ Беседин С.Н., Забелин Н.А., Рассохин В.А. и др. // Наука и техника в газовой промышленности.— 2010. № 4.— С. 96–103.

4. Каталог газотурбинного оборудования: каталог энергетического оборудования [Текст]. Том 1.— М.: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2011.— 392 с.

5. **СТО Газпром XXX-2008.** Технические нормативы выбросов. Газоперекачивающие агрегаты ОАО «Газпром» [Текст].— М., 2008.

6. **Арсеньев, Л.В.** Газотурбинные установки. Конструкции и расчет [Текст]: справочное пособие / Л.В. Арсеньев, Ф.Д. Бедчер, И.А. Богов [и др.].— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978.— 232 с., ил.

7. **Костюк, А.Г**. Паровые и газовые турбины для электростанций [Текст]: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Д. Трухний [и др.] / Под ред. А.Г. Костюка.— М.: Издательский дом МЭИ, 2008.— 556 с., ил.

REFERENCES

1. Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii [Elektron. resurs] // Rezhiinenergo.gov.ru/activity/energostrategy rezhim dostupa: http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy. (rus.)

2. Kontseptsiia energosberezheniia i povysheniia energoeffektivnosti na period 2011–2020 gg. [Elektron. resurs]// Rezhim dostupa: http://www.gazprom.ru/nature/energy. (rus.)

3. **Besedin, S.N Zabelin N.A., Rassokhin V.A. [i dr.].** Razrabotka i sozdanie avtonomnykh energeticheskikh ustanovok maloi moshchnosti s rasshiritel'noi turbinoi [Tekst] // Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti.— 2010. № 4.— S. 96–103. (rus.)

4. Katalog gazoturbinnogo oborudovaniia [Tekst]: katalog energeticheskogo oborudovaniia T. 1.— M.: zdatel'skii dom «Gazoturbinnye tekhnologii», 2011.— 392 c. (rus.)

5. **STO Gazprom XXX-2008.** Tekhnicheskie normativy vybrosov. Gazoperekachivaiushchie agregaty OAO «Gazprom» [Tekst].— M., 2008.

6. **Arsen'ev L.V. Bedcher F.D., Bogov I.A. [i dr.].** Gazoturbinnye ustanovki. Konstruktsii i raschet [Tekst]: spravochnoe posobie.— L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1978.— 232 s., il. (rus.)

7. **Kostiuk A.G., Frolov V.V., Trukhnii A.D. [i dr.].** Parovye i gazovye turbiny dlia elektrostantsii [Tekst]: uchebnik dlia vuzov / Pod red. A.G. Kostiuka.— M.: Izdatel'skii dom MEI, 2008.— 556 s., il. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — кандидат технических наук доцент директор Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: n.zabelin.turbo@mail.ru

ЛЫКОВ Алексей Викторович — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Lykov_AV@list.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: v-rassokhin@yandex.ru

AUTHORS

ZABELIN Nikolay A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: n.zabelin.turbo@mail.ru

LYKOV Alexsey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Lykov_AV@list.ru

RASSOKHIN Victor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: v-rassokhin@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.43

А.А. Метелев, А.С. Пономарев,
А.И. Макарин, В.С. Дворцов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫМ АВТОМОБИЛЬНЫМ БЕНЗИНОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

A.A. Metelev, A.S. Ponomarev,
A.I. Makarin, V.S. Dvortsov

CONTROL SYSTEM HIGHLY ACCELERATED PETROL INTERNAL COMBUSTION ENGINE

В статье рассматриваются современные требования к электронной системе управления высоконагруженным бензиновым двигателем. Представлены результаты расчета рабочего процесса двигателя. Предложен вариант натурной реализации системы управления для форсированного бензинового двигателя. Результатом работы является жгут электропроводки для системы управления высокофорсированным двигателем.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ. ФОРСИРОВАНИЕ. НАДДУВ.

The article deals with the modern requirements for electronic control of heavy-duty gasoline engine. The results of calculation of the workflow engine. A variant of the full-scale implementation of the management system for the forced gasoline engine. The result of a wiring harness for engine control system highly accelerated.

ENGINE MANAGEMENT SYSTEM. INTERNAL COMBUSTION ENGINE. HIGH PERFORMANCE. SUPERCHARGING.

Современный автомобильный бензиновый двигатель —это двигатель внутреннего сгорания (ДВС), оснащенный газотурбинным наддувом и непосредственным впрыском топлива в цилиндры. Удельные показатели мощности достигают 90 кВт/л рабочего объема двигателя. Работоспособность такого теплонапряженного двигателя обеспечивается электронной системой управления. Ее возможности позволяют согласовывать работу двигателя с турбокомпрессором, контролировать рабочий процесс в каждом цилиндре, отслеживать и корректировать по обратным связям другие важные параметры двигателя [1–3].

Наиболее распространенным автомобильным бензиновым ДВС в Российской Федерации является двигатель ОАО «АВТОВАЗ» марки ВАЗ-2112 и его модификации. Двигатель — без наддува, имеет 4 клапана на цилиндр, впрыск топлива осуществляется перед впускным клапаном (см. таблицу). Этот отечественный двигатель был выбран для исследования, поскольку прочность его основных деталей (блок цилиндров, коленчатый вал, шатун) приемлема для его форсирования.

Цель данного исследования — моделирование форсированной (по среднему эффективному давлению p_e и средней скорости поршня C_m) модификации двигателя ВАЗ-2112 и проектирование электронной системы управления (ЭСУД) данным двигателем.

Для достижения поставленной цели решались задачи по выбору прототипа двигателя для дальнейшего сравнения его заводских параметров с его же модифицированной версией. Затем составлялась схема ЭСУД, определялся необходимый и достаточный набор датчиков и обратных связей, выбирался электронный блок управления (ЭБУ), имеющий необходимый потенциал функций и каналов для обеспе-

чения работы двигателя. Рассчитывался рабочий процесс модифицированного двигателя для анализа параметров его работы и сохранения работоспособности деталей. В результате работы была составлена схема и изготовлен жгут ЭСУД для двигателя.

На первом этапе работы был рассчитан рабочий процесс модифицированного двигателя для общей оценки уровня форсирования, теплонапряженности деталей, конструкции ЭСУД двигателя. Использовалась программа AVL Boost. В результате расчетов получена индикаторная диаграмма рабочего процесса модифицированного двигателя (рис. 1).

Анализ индикаторной диаграммы показывает, что максимальное давление сгорания — $p_z = 82$ кг/см^2, что подразумевает использование бензина с октановым числом не менее 98. Полученные данные расчета позволяют в дальнейшем моделировать тепловое и напряженное состояние деталей цилиндропоршневой группы, работу поршневых колец, определить толщины масляных пленок в узлах трения двигателя, а также рассчитать детали на прочность.

Система управления должна обеспечивать нормальную работу двигателя в целом, а также отслеживать параметры работы систем двигателя, зависящие от внешних факторов, таких, как условия окружающей среды, физико-химические параметры топлива и масла, состояние деталей двигателя. Это необходимо для надежного функционирования двигателя при различных условиях эксплуатации.

Для создания системы управления необходимо определить набор датчиков, которые будут отслеживать контролируемые параметры и управлять двигателем и его подсистемами.

Так как двигатель оснащен турбокомпрессором, то необходимо применять электромагнитный клапан для управления давлением наддува. Для обеспечения необходимого уровня токсичности и регулирования состава топливной смеси на частичных и максимальных нагрузках необходимо применять широкополосный датчик кислорода [4], установленный в выпускном трубопроводе после турбокомпрессора. Для контролирования температуры отработавших газов каждого из цилиндров двигателя необходимо установить по одной термопаре в выпускной трубопровод максимально близко к выпускным окнам головки блока. Для получения параметров впускного воздуха необходимо применить датчик абсолютного давления и датчик температуры воздуха, которые будут установлены во впускном коллекторе двигателя. Для отслеживания состояния топлива необходимо применить датчик давления топлива в топливную рампу двигателя. Для определения признака вращения коленчатого вала, его ускорений и положения необходимо применить электромагнитный

Сравнительная характеристика стандартного и модифицированного двигателей ВАЗ-2112

Параметр, ед. измерения	Значения параметров	
	ВАЗ-21124	ВАЗ-21124 модифицированный
Размерность $S \times D$, мм	75,6×82,0	75,6×82,0
Топливо, ОЧИ, ед.	95	95 или 98
Мощность N_e, кВт/л.с., при n, об/мин	71/94 при 5600	200/270 при 6500
Степень сжатия	10,5	9,0
Крутящий момент M_e, Нм, при n, об/мин	125 при 3500	370 при 5500
Максимальное давление наддува p_k, кг/см^2, при n, об/мин	атмосферный	2,2 при 5500
ЭСУД	Январь 7.2	Корвет 11.38ЕТ
Вязкость моторного масла	10W-40	5W-30

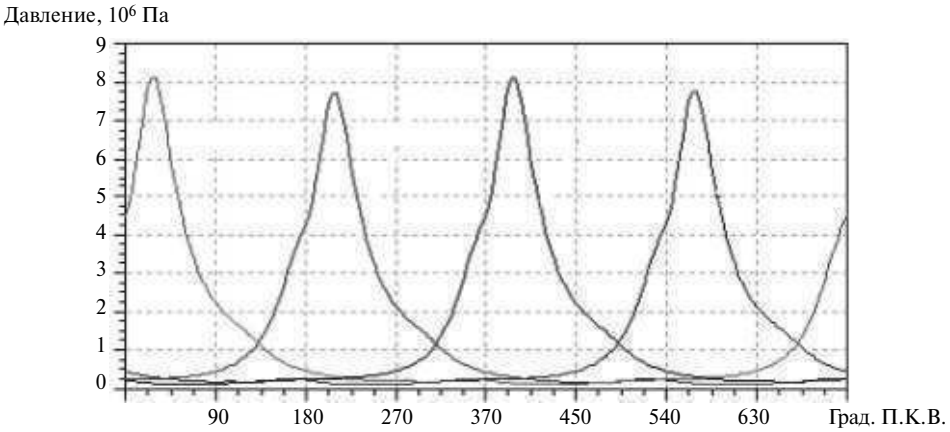


Рис. 1. Индикаторная диаграмма рабочего процесса модифицированного двигателя

(*а* — для первого цилиндра, *б* — для третьего цилиндра, *в* — для четвертого цилиндра, *г* — для второго цилиндра)

датчик положения коленчатого вала со специальным диском, имеющим 58 зубьев (алгоритм синхронизации «60 минус 2»), для определения верхней мертвой точки первого цилиндра и управления индивидуальными катушками зажигания. Для фазированной подачи топлива необходимо применять датчик фаз, который определяет положение впускного распределительного вала. Также необходимо использовать электронную дроссельную заслонку и датчик, который передает сигнал на блок управления о задаваемой нагрузке. Без этого набора датчиков проблематично достичь уровня токсичности отработавших газов двигателя согласно требованиям ЕВРО-4. Датчик детонации необходим для улавливания шумов двигателя и контроля процесса горения и отслеживания детонации. В качестве контрольных и управляющих элементов необходимо установить датчик температуры масла, температуры охлаждающей жидкости, температуры топлива и давления масла [5].

Данный набор датчиков позволит обеспечить надежную работу двигателя во всем диапазоне нагрузок.

Следующим этапом работы был выбор и обоснование блока управления ЭСУД, на основе которого проектируется система управления. Основными требованиями к выбору блока управления являются его открытые функции: параметры оптимизации и возможности корректировки необходимых параметров работы двигателя, выполнение норм токсичности (не менее ЕВРО-4). В свободной продаже имеются инженерные блоки управления различных производителей (например, Robert Bosch Gmbh, MecTronik S.r.l., Magnetti Marelli S.p.a., отечественный производитель ООО «АБИТ»). Также существуют блоки управления гражданских автомобилей, однако возможность корректировки и отладки их параметров невозможна, поскольку инженерные функции блока заблокированы производителями.

Перечисленные контроллеры имеют схожий набор функций и похожее программное обеспечение. Основные отличия касаются удобства интерфейса и стоимости. Исходя из этого для исследования был выбран блок управления Корвет 11.38ЕТ отечественного производителя ООО «АБИТ» [6]. Блок имеет четыре встроенных канала управления индивидуальными катушками зажигания, аппаратный драйвер для работы с электронным дросселем, а так же необходимое количество аналоговых и цифровых входов и 20 силовых выходов с разными значениями максимального тока. Это означает, что его аппаратная реализация справится с решением поставленной задачи.

Программное обеспечение, поставляемое к упомянутому ЭБУ, имеет две принципиально различных стратегии управления двигателем — прямую и моментную модели.

В основе первой лежит непосредственное задание положения дроссельной заслонки, топливоподачи, УОЗ, давления наддува, для каж-

дого режима работы двигателя по нагрузке и частоте вращения, а также их коррекции по тепловому состоянию двигателя, обратным связям и состоянию системы в целом (к примеру, коррекция по давлению топлива).

Моментная модель имеет иной алгоритм работы, в котором главным параметром нагрузки становится крутящий момент двигателя. Для ее функционирования необходимо иметь полную характеристику двигателя, ограниченную внешнюю скоростную характеристику, а также зависимости момента от УОЗ, состава смеси и отключения цилиндров. Кроме того, данная модель поддерживает обратные связи и функции контроля параметров двигателя.

Моментная модель имеет ряд преимуществ, связанных с удобством управления транспортным средством и возможностью работы с современными автоматическими коробками переключения передач.

Для проведения испытаний в стендовых условиях целесообразно выбрать первую модель по причине ее простоты и, следовательно, быстроты работы с двигателем.

Далее были детально рассмотрены вопросы изготовления жгутов.

Существуют две концепции изготовления жгутов: 1) полностью герметичная; 2) защищенная от механического и теплового воздействия узлов проводов с автомобильными влагозащищенными разъемами. В общемировой практике двигателестроения областью применения первой группы является авиация и двигатели спортивного и специального назначения. Вторая группа используется как на автомобилях и мотоциклетной технике, так и в судовой технике.

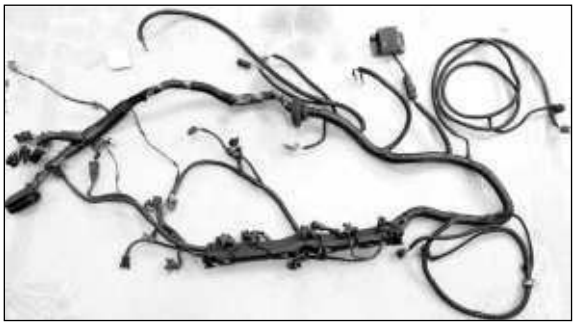


Рис. 2. Изготовленный жгут электропроводки системы управления на основе блока Корвет 11.38ЕТ для высокофорсированного бензинового двигателя

Второй тип электропроводки проще в изготовлении, дешевле и имеет приемлемые сроки службы — 10–15 лет.

В ходе исследования был разработан свой алгоритм изготовления жгута электропроводки, который включает:

1) составление электрической схемы соединений, учитывающей назначения контактов всех элементов, точек питания и заземления, необходимое сечение проводов;

2) учет воздействий на соединения при размещении их на двигателе и стенде (транспортное средство) расположения всех необходимых элементов (датчиков и исполнительных элементов) исходя из их назначения и условий работы (термостойкость, грязезащищенность, маслобензостойкость и т. д.);

3) выполнение чертежа жгута проводов с указанием длины, разветвлений, точек крепления самого жгута и его элементов (резиновые уплотнения, хомуты);

4) осуществление сборки жгута согласно электрической схеме и компоновочному чертежу.

В результате исследования получены: исходные данные о высокофорсированной версии двигателя ВАЗ-2112; выработан алгоритм изготовления жгутов электропроводки для ДВС; спроектирована система управления с необходимым и достаточным набором датчиков и управляющих элементов (рис. 2).

Возможности предлагаемой системы управления позволяют настроить весь диапазон режимов работы двигателя. С ее помощью можно произвести настройку аварийных режимов и реализовать программную и аппаратную защиту двигателя от выхода из строя датчиков, а также неисправностей, связанных с колебаниями внешних факторов (изменение физико-химических свойств топлива, состояния окружающей среды и т. п.).

В дальнейшем предполагается смоделировать температурно-напряженное состояние деталей двигателя, рассчитать условия работы подшипников. Планируется создание стенда на основе высокофорсированного бензинового двигателя, размещение на нем системы управления, ее настройка и отладка.

Работы выполняются при финансовой поддержке министерства образования и науки Российской Федерации, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение № 14.132.21.1721).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лангкабель, Г.Х.** Турбодвигатели и компрессоры [Текст] Справочное пособие / Г.Х. Лангкабель.— Л., 2003.— 351 с., ил.

2. **Дьяченко, Н.Х.** Конструирование и расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебник для вузов/ Н.Х. Дьяченко, Б.А. Харитонов, В.М. Петров [и др.]; Под ред. Н. Х. Дьяченко.— Л.: Машиностроение, 1979.— 392 с., ил.

3. **Померанцев, В.В.** Основы практической теории горения [Текст] / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов [и др.].— Л., 1973.— 263 с.

4. **Пономарев, А.С.** Принципы адаптации матрицы топливоподачи по широкополосному датчику кислорода [Текст] / А.С. Пономарев, А.К. Иванов // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч II.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— С. 77–78.

5. Системы управления бензиновыми двигателями [Текст] / Пер. с немецкого.— Первое русское издание.— М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005.— 432 с.: ил.

6. Системы управления ПВС [Электрон. ресурс].— http://www.abit.spb.ru/.

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

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

9. **Метелев, А.А.** Методика и результаты ресурсных испытаний моторных масел [Текст] / А.А. Метелев, А.Б. Зайцев, А.Ю. Шабанов // XXV Междунар. научно-техн. конф. «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей», посвященная 300-летию Царского села.— СПб.: Изд-во СПбГАУ, 2010.— С. 113–123.

10. **Метелев, А.А.** Об одной из химмотологических проблем применения бензинов в двигателях спортивных судов [Текст] / А.А. Метелев, А.Б. Зайцев, А.Ю. Шабанов // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: материалы междунар. науч. конф.. Ч. III.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— С. 75–77.

REFERENCES

1. **Langkabel G.Kh.** Turbodvigateli i kompressory [Tekst].— L.: Spravochnoye posobiye, 2003.— 351 s. (rus.)

2. **Dyachenko N.Kh., Kharitonov B.A., Petrov V.M. [i dr.].** Konstruirovaniye i raschet dvigateley vnutrennego sgoraniya: Uchebnik dlya vuzov / Pod red. N.Kh. Dyachenko.— L. Mashinostroyeniye, 1979.— 392 s. (rus.)

3. **Pomerantsev V.V. Arefyev K.M., Akhmedov D.B. [i dr.].** Osnovy prakticheskoy teorii goreniya [Tekst].— L., 1973.— 263 s. (rus.)

4. **Ponomarev A.S. Ivanov A.K.** Printsipy adaptatsii matritsy toplivopodachi po shirokopolosnomu datchiku kisloroda [Tekst] // XXXVI Nedelya nauki SPbGPU: Materialy Vserossiyskoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov. Ch II.— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008.— S. 77–78. (rus.)

5. Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami. Perevod s nemetskogo. Pervoye russkoye izdaniye.— M.: OOO «Knizhnoye izdatelstvo «Za rulem», 2005.— 432 s.: il. (rus.)

6. Systemy upravlenija DVS [Elektron resurs].— http://www.abit.spb.ru/. (rus.) Systemy upravlenija DVS.

7. **Shabanov A.Yu., Zaytsev A.B., Kudinov I.S., Metelev A.A.** Vliyaniye nekotorykh fiziko-khimicheskikh pokazateley motornogo masla na tekhniko-ekonomicheskiye i resursnyye pokazateli porshnevykh benzinovykh dvigateley [Tekst] // Dvigatelestroyeniye.— 2011. № 1.— S. 24–28. (rus.)

8. **Galyshev Yu.V., Shabanov A.Yu., Zaytsev A.B., Metelev A.A.** Metodika uskorennykh ispytaniy motornykh masel na izmeneniye ikh svoystv v techeniye sroka ekspluatatsii [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2012.— № 2-1(147). T. 1.— S. 71–76. (rus.)

9. **Metelev A.A., Zaytsev A.B., Shabanov A.Yu.** Metodika i rezultaty resursnykh ispytaniy motornykh masel [Tekst] // XXV Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobiley, traktorov i dvigateley», posvyashchennaya 300-letiyu Tsarskogo sela.— SPb.: Izd-vo SPbGAU, 2010.— S. 113–123. (rus.)

10. **Metelev A.A., Zaytsev A.B., Shabanov A.Yu.** Ob odnoy iz khimmotologicheskikh problem primeneniya benzinov v dvigatelyakh sportivnykh sudov [Tekst] // XXXVI Nedelya nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Ch.III, - SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008.— S. 75–77. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕТЕЛЕВ Андрей Александрович— аспирант кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petmet@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Сергеевич— ассистент кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: motoredmind @mail.ru

МАКАРИН Артем Игорьевич— аспирант кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: tem.makarin@gmail.com

ДВОРЦОВ Владимир Сергеевич — аспирант кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: privedig@mail.ru

AUTHORS

METELEV Andrey A.— St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya, 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: petmet@mail.ru

PONOMAREV Andrey S.— St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya, 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: motoredmind@mail.ru

MAKARIN Artjom I.— St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya, 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: tem.makarin @gmail.com

DVORTSOV Vladirmir S.— St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya, 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: privedig@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.315 (075.8)

Ю.К. Осина, М.Э. Борисова, М.Ф. Галиханов

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРЕТНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

J.K. Osina, M.E. Borisova, M.F. Galikhanov

EFFECT OF CARBON BLACK ON THE STABILITY OF THE ELECTRET STATE IN HIGH DENSITY POLYETHYLENE

Статья посвящена влиянию технического углерода на стабильность электретного состояния пластин ПЭВД, заряженных в поле коронного разряда при комнатной температуре. Изучена кинетика релаксации заряда в пластинах ПЭВД в изотермических условиях в широком интервале температур. Исследованы зависимости тока зарядка $I_{зар}f(t)$ в интервале температур 70–90 °С. Показано, что релаксация заряда обусловлена не собственной проводимостью, а освобождением носителей из ловушек.

ЭЛЕКТРЕТ. НЕПОЛЯРНЫЙ ПОЛИМЕР. ПОЛИЭТИЛЕН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (ПЭВД). СТАБИЛЬНОСТЬ. ЭЛЕКТРЕТНАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПРОВОДИМОСТЬ. ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ.

The article is devoted to the study of the effect of the carbon black on the stability of the electret state in the plates of LDPE, charged in the corona discharge at room temperature. The kinetics of charge relaxation in LDPE plates under isothermal conditions in a wide temperature range was studied. The dependence $I_{ch}f(t)$ in the temperature range 70–90 °C was obtained. It is shown that the relaxation of the charge is not due to intrinsic conductivity, but is caused by the release of carriers from traps.

ELECTRET. NON-POLAR POLYMER. HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE). STABILITY. ELECTRET POTENTIAL DIFFERENCE. CONDUCTIVITY. RELAXATION TIME.

Известно, что полимеры как активные диэлектрики обладают целым комплексом интересных и практически важных свойств. Полимерные электреты используются в электрических преобразователях, генераторах, фильтрах, элементах узлов трения и герметизации, антикоррозионных покрытиях. Особое внимание уделяется поиску новых электретных композиционных материалов.

Не ослабевает внимание к композиционным материалам на основе полимерных пленок, к числу которых относится полиэтилен высокого давления (ПЭВД) с электропроводящими и диэлектрическими мелкодисперсными наполнителями. Изучение электретного эффекта в этих материалах имеет практическое значение в связи с расширением области их применения: их начали использовать в медицинской промышленности и в качестве упаковочных материалов. Установлено, что введение 2–4 об. % технического углерода в полимерный материал повышает стабильность электретного состояния [1]. Однако до сих пор не ясен механизм релаксации заряда в композиционных материалах и влияние дисперсных наполнителей на кинетику релаксации заряда. Имеющийся объем информации не позволяет оценить роль собственной проводимости диэлектрика и освобождения носителей из ловушек.

Авторы работы [2] утверждают, что у композиционных материалов на основе ПЭВД с добавлением оксида кремния (SiO_2) повышение стабильности электретного состояния возможно при уменьшении содержания катализаторов электропроводности — молекул H_2O и H_2O_2, которые адсорбируются частицами наполнителя SiO_2. Более высокая температурная стабильность композитных пленок, содержащих аэро-

сил (диоксид кремния в аморфной фазе) [3] по сравнению с пленками, содержащими в качестве наполнителя белую сажу (диоксид кремния в кристаллической фазе) [3], обусловлена наличием в белой саже молекул H_2O_2. Оптическими методами установлено, что введение наполнителя SiO_2 в ПЭВД приводит к повышению плотности и степени кристалличности ПЭ в составе композита, а вследствие этого к снижению его влагопроницаемости, что в свою очередь ведет к уменьшению проводимости, а значит, к повышению стабильности электретного состояния композитных пленок.

Релаксация заряда может быть обусловлена не только собственной проводимостью, но и освобождением носителей из ловушек [4]. За последние годы получен большой объем данных о природе ловушек в полимерах. К числу ловушек относят: всевозможные нарушения структуры, дефекты мономерных единиц, нерегулярности полимерной цепи. Ловушками могут быть границы раздела мелкодисперсных наполнителей с полимерами. Для уточнения механизма релаксации заряда в каждом композиционном материале необходимы систематические исследования.

Данная статья посвящена изучению механизма релаксации заряда и влиянию технического углерода на стабильность электретного состояния пластин ПЭВД, заряженных в поле коронного разряда при комнатной температуре. Для этого была изучена кинетика релаксации заряда в пластинах ПЭВД при изотермических условиях в широком интервале температур (T = 22–80 °C). Исследованы зависимости тока зарядка $I_{зар}f(t)$ в интервале температур 70–90 °C, проведен анализ полученных экспериментальных данных.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе исследовались зависимости электретной разности потенциалов от времени — $U_{ЭРП}(t)$ —для пластин ПЭВД с 2 и 4 об. % технического углерода марки к. 354. Данный процент наполнения согласно работе [1] оптимален для повышения стабильности электретного состояния. Измерение $U_{ЭРП}$ производилось на образцах, хранившихся при комнатной и повышенных температурах в изотермических условиях. Изучая зависимости $U_{ЭРП}(t)$ при повышенных температурах, электрет хранили в термокамере, для измерения $U_{ЭРП}$ периодически извлекали из термокамеры; величина $U_{ЭРП}$ измерялась при комнатной температуре. Образцы представляли собой пластины прямоугольной формы площадью S = 11,2 см^2. Толщина h для пластин ПЭВД с 2 об. % технического углерода составляла 350 мкм, для пластин ПЭВД с 4 об. % технического углерода — 250 мкм. На одну поверхность образца был нанесен алюминиевый электрод толщиной 2 мкм диаметром 1 см. Данные образцы были предоставлены Казанским национальным исследовательским технологическим университетом (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»).

Величина $U_{ЭРП}$ измерялась методом компенсации с вибрирующим электродом [5]. Поляризация образцов проводилась в коронном разряде при отрицательной полярности коронирующего электрода, напряжение между иглой и плоским электродом $U_{кор}$ составляло 6 кВ, напряжение на сетке — 400 В; образец заряжался в течение 30 секунд. В этом случае на поверхность диэлектрика из газового разряда приходят отрицательные ионы: CO^-_3; CO^-; O^-. В результате обмена зарядов ионов с поверхностью диэлектрика образуется электрет с гомозарядом [5]. Эффективная поверхностная плотность заряда, рассчитанная с помощью выражения $\sigma_{эф} = \varepsilon\varepsilon_0 U_{ЭРП}/h$, составляла около $4\cdot10^{-5}$ Кл/м^2 для пластин ПЭВД с 2 и 4 об. % технического углерода.

Полученные зависимости $U_{ЭРП}(t)$ образцов, хранившихся при комнатной температуре, представлены на рис. 1. Зависимости $U_{ЭРП}(t)$ исходных и модифицированных образцов описываются спадающей с течением времени кривой. Эти зависимости характеризуются быстрым спаданием $U_{ЭРП}$ при малых временах хранения и относительно стабильным участком при больших временах.

Как видно из рис. 1, *а*, стабильность электретного состояния существенно возрастает у пластин ПЭВД с 2 и 4 об. % технического углерода по сравнению с исходными. Зависимости $U_{ЭРП}(t)$ при температурах 60–80 °C, как и при комнатной температуре, описываются спадающими кривыми. Установлено, что кривые $U_{ЭРП}(t)$, измеренные как при комнатной, так и при повышенных температурах, описываются суммой двух экспонент (рис. 1, *б*.) с временами релаксации τ_1 и τ_2:

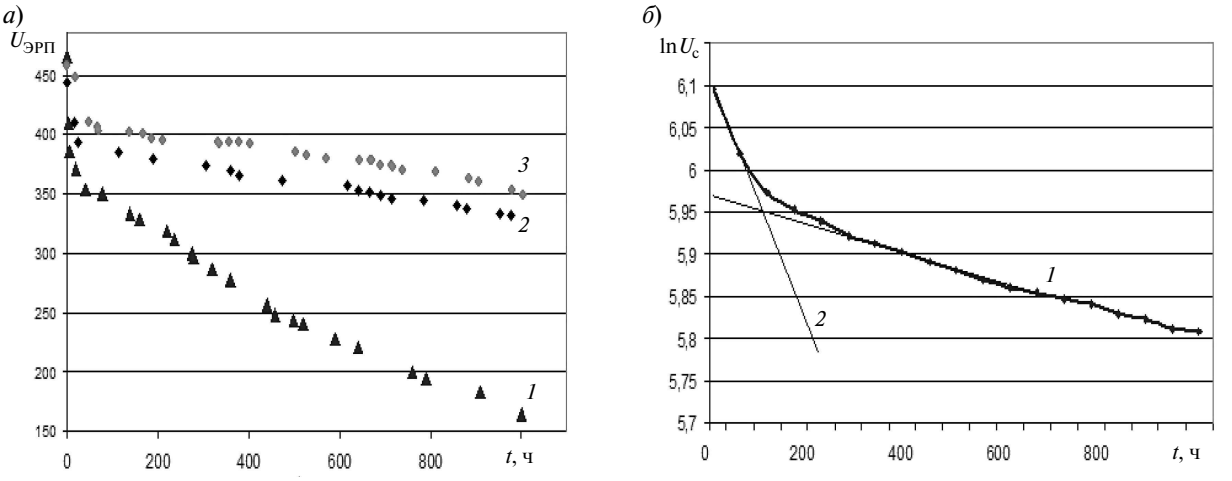


Рис. 1. Зависимость $U_{ЭРП}(t)$ (*а*) образцов, хранившихся при комнатной температуре (*1* — исходный ПЭВД; *2* — ПЭВД + 2 об. % технического углерода; *3* — ПЭВД + 4 об. % технического углерода) и зависимость $\ln(U_c) = f(t)$ (*б*) при комнатной температуре хранения для образцов ПЭВД с об. концентрацией 2 % технического углерода (*1* — первая экспонента; *2* — вторая экспонента)

$$U_{ЭРП} = U_{01}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \qquad (1)$$

При больших временах хранения величина $U_{ЭРП}$ стабилизируется, т. е. время релаксации заряда τ_i увеличивается. Значения U_{01}, U_{02}, и τ_1, τ_2, полученные при разложении кривых $U_{ЭРП}(t)$ на сумму экспонент, представлены в таблице. Величины времен релаксации τ_1, определяющих стабильность электретного состояния, рассчитывались методом наименьших квадратов с использованием компьютерной программы. При каждой температуре испытания проводились на партии идентичных образцов. Относительная погрешность времен релаксации τ_1 не превышает 15 %.

При анализе полученных кривых установлено, что времена релаксации τ_2 при малых временах хранения у пластин ПЭВД с 2 об. % углерода больше, чем у пластин ПЭВД с 4 об. % углерода, значения τ_1 при больших временах хранения практически одинаковы. С увеличением температуры времена релаксации заряда τ_1 и τ_2 уменьшаются.

Значения времен релаксации τ_i и предэкспоненциальных множителей U_{0i}

T, °C	U_{01}, В	τ_1, с	U_{02}, В	τ_2, с
ПЭВД + 2 об. % технического углерода				
22	387	$2{,}6\cdot10^7$	57	$4\cdot10^5$
60	257	$2{,}8\cdot10^5$	174	$5{,}7\cdot10^3$
70	205	$1{,}2\cdot10^5$	220	$4{,}5\cdot10^3$
80	173	$5{,}1\cdot10^4$	260	$2{,}5\cdot10^3$
ПЭВД + 4 об. % технического углерода				
22	412	$2{,}4\cdot10^7$	46	$1{,}2\cdot10^5$
60	405	$2{,}9\cdot10^5$	20	$1{,}6\cdot10^3$
70	421	$7{,}4\cdot10^4$	–	–
80	392	$4{,}2\cdot10^4$	61	$1{,}5\cdot10^3$

Предполагая, что разрядка электретов идет за счет собственной проводимости [6], из кривых $U_{ЭРП}(t)$ были рассчитаны зависимости. Учитывая, что

$$j = d\sigma/dt = \gamma E, \quad E = U/h, \quad \sigma = \varepsilon\varepsilon_0 U/h,$$

получим выражение для $\gamma(t)$:

$$\gamma(t) = -\varepsilon_0 \varepsilon \frac{dU_э}{dt} \frac{1}{U_э(t)}. \qquad (2)$$

По зависимостям $U_{ЭРП}(t)$ и формуле (2) были рассчитаны зависимости γ от времени t. В результате было установлено, что $\gamma = f(t)$ описываются спадающими кривыми во всем температурном интервале (22, 60–80) °С. При этом с увеличением температуры скорость спадания γ с течением времени возрастает, что хорошо согласуется с экспериментальными данными для полимерных диэлектриков [7]. Величина γ и скорость ее спада у пластин исходного ПЭВД существенно выше, чем у пластин ПЭВД с объемной концентрацией углерода 2 и 4 %.

Если разрядка происходит только за счет собственной проводимости, можно рассчитать $\gamma(t)$ из кривых $U_{ЭРП}(t)$ с помощью выражения (2), которая соответствует очень длительным временам измерения. Эта методика позволяет получить зависимости $\gamma(t)$ в интервале больших значений t, что нельзя сделать, измеряя токи с помощью электрометра.

Для уточнения механизма релаксации заряда изучались зависимости тока зарядки $I_{зар}(t)$ в изотермических условиях в интервале температур 70–90 °С. Напряжение, подаваемое на образец, составляло 300 В, площадь электродов — $2 \cdot 10^{-4}$ м^2. Из кривых $I_{зар}(t)$ рассчитывались зависимости $\gamma(t)$, приведенные на рис. 2, и определялись величины максвелловского времени релаксации $\tau_м$, соответствующие установлению сквозного тока $\tau_м = \varepsilon\varepsilon_0/\gamma$. Уменьшение электретной разности потенциалов за счет собственной проводимости определяется максвелловским временем релаксации $\tau_м$. Альтернативным механизмом релаксации заряда является освобождение захваченных носителей заряда из ловушек и их движение в поле электрета, что характеризуется временами релаксации заряда τ_i.

Механизм релаксации заряда, имеющий место в пластинах ПЭВД, может быть определен из сравнения τ_i с $\tau_м$. Если $\tau_i \ll \tau_м$, то релаксация заряда происходит за счет освобождения носителей заряда из ловушек. В случае если $\tau_i \gg \tau_м$, релаксация заряда обусловлена собственной проводимостью. Эти оценки подробно изложены в работе [4].

Из рис. 2 видно, что проводимость $\gamma(t)$ уменьшается в течение 15 минут, после чего достигает стабильного значения. Величины γ и $\tau_м$ практически не отличаются для образцов ПЭВД с 2 и 4 об. % углерода. Проводимость, рассчитанная по зависимостям $U_{ЭРП}(t)$, оказалась на порядок больше, чем проводимость, рассчитанная по зависимостям $I_{зар}(t)$. Этот факт указыва-

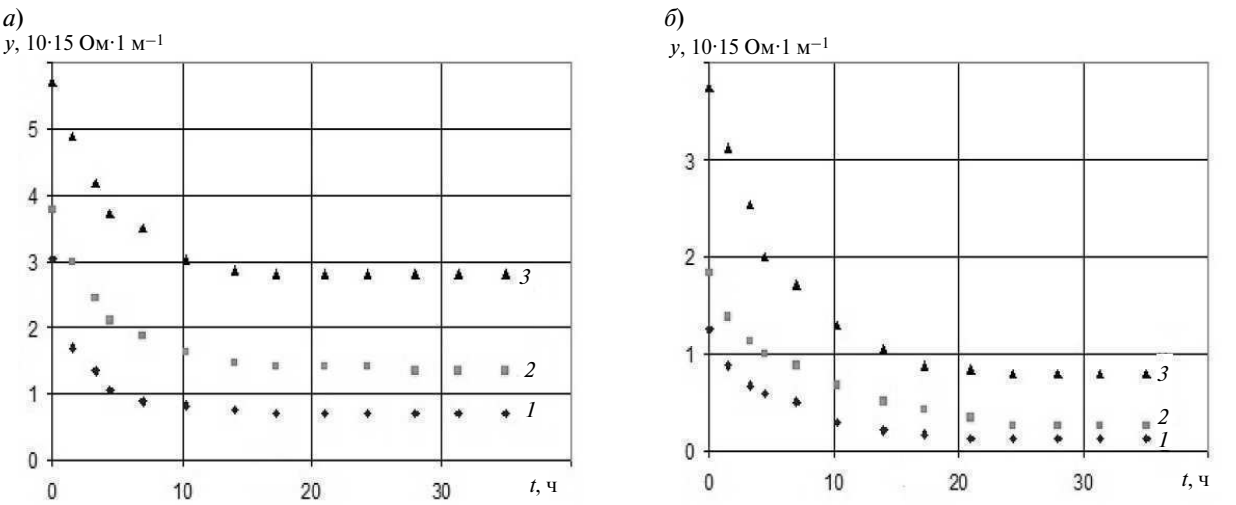


Рис. 2. Зависимость $\gamma(t)$ для ПЭВД с 2 % (*а*) и 4 % (*б*) об. % технического углерода при разных температурах: *1* — 70, *2* — 80, *3* — 90 °С

ет на то, что не собственная проводимость в основном ответственна за механизм релаксации заряда [7–9].

Температурные зависимости времен релаксации электретной разности потенциалов τ_1 и максвелловские времена релаксации $\tau_м$, определенные из кривых $I_{зар}(t)$, приведены на рис. 3. Эти зависимости в полулогарифмическом масштабе имеют прямолинейный характер, т. е. τ_i. как функции от $1/T$ описываются экспоненциальным законом $\tau = \tau_0 e^{-\frac{W}{kT}}$. Величина $\tau_м$ для образцов ПЭВД с 4 об. % технического углерода (рис. 3, кривая *4*) оказалась на два порядка больше, чем τ_1 (рис. 3, кривая *1*), а для образцов ПЭВД с 2 об. % углерода величина $\tau_м$ на 1,5 порядка больше чем τ_1 (рис. 3, кривые *3*, *2*). Это свидетельствует о том, что релаксация заряда идет не за счет собственной проводимости, а за счет освобождения носителей заряда из ловушек.

Стабильность электретного состояния определяется в основном временами τ_1 для образцов ПЭВД с 2 и 4 об. %, которые практически неразличимы. Причем на первом участке зависимостей $U_{ЭРП}(t)$ вероятно основную роль играет освобождение носителей заряда из мелких ловушек, а на втором участке — из более глубоких ловушек. Такой вывод хорошо согласуется с работами А.А. Рычкова, А.Е. Кузнецова [7, 8].

Энергии активации W, рассчитанные по наклону прямых $\lg\tau_i = f(5040/T)$, следующие:

τ_i и $\tau_м$	W, эВ.
исх. τ	0,3
2 % τ_1	1,0
4 % τ_1	1,0
2 % τ_2	0,8
4 % τ_2	0,7
2 % $\tau_м$	0,7
4 % $\tau_м$	1,0

Полученные данные показывают, что значения энергии активации W для времен релаксации τ_1 и τ_2 в образцах ПЭВД с 2 и 4 об. % мелкодисперсного наполнителя технического углерода близки и составляют соответственно 1,0 и 0,7 эВ. Значения энергии активации W времен релаксации τ_1 и $\tau_м$ одинаковы и равны 1,0 эВ.

Установлено, что введение 2 или 4 об. % мелкодисперсного технического углерода в ПЭВД повышает стабильность электретного состояния. Времена релаксации разности потенциалов τ_1 при больших временах хранения образцов, содержащих 2 и 4 об. % технического углерода, практически равны, однако при этом величина $U_{ЭРП}$ у образцов с 4 об. % технического углерода выше, чем у образцов с 2 об. %.

Изучены зависимости электретной разности потенциалов $U_{ЭРП}(t)$ и токи зарядки $I_{зар}(t)$ в широком интервале температур. Показано, что времена релаксации τ_1 и максвелловские времена релаксации $\tau_м$ (рассчитанные на стабильных участках кривых $I_{зар}(t)$) экспоненциально зависят от температуры. При этом значения энер-

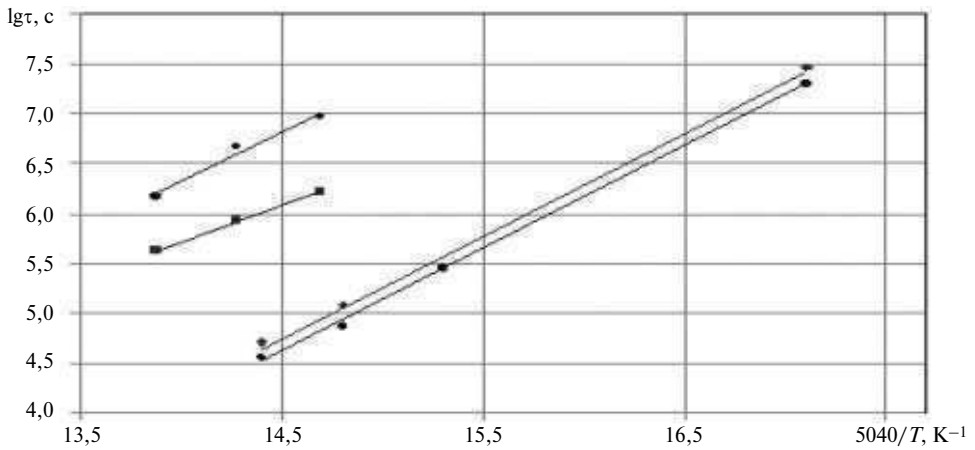


Рис. 3. Температурные зависимости времен релаксации электретной разности потенциалов пластин ПЭВД с добавлением об. % технического углерода:
1 — τ_1 (при 4 об. %), *2* — τ_1 (при 2 об. %), *3* — $\tau_м$ (при 2 об. %), *4* — $\tau_м$ (при 4 об. %)

гии активации для времен релаксации $\tau_м$ и τ_1 составляют W= 1эВ. Величина $\tau_м$ в образцах ПЭВД с 4 об. % оказалась на 2 порядка больше чем τ_1, а в образцах ПЭВД с 2 об. % величина $\tau_м$ на 1,5 порядка больше, чем τ_1, что свидетельствует в пользу механизма релаксации заряда за счет освобождения носителей из ловушек и их дрейфа через объем диэлектрика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галиханов, М.Ф.** Электреты на основе композиции полиэтилена высокого давления с техническим углеродом [Текст] / М.Ф. Галиханов, Д.А. Еремеев, Р.Я. Дебердеев // Пласт. массы.—2002. № 10. 26–28 с.

2. **Гороховатский, Ю.А.** О природе электретного состояния в композитных пленках ПЭВД с нанодисперсными наполнителями SiO_2 [Текст] / Ю.А. Гороховатский, Б.А. Тазенков, [и др.] // Известия РГПУ им. А.И. Герцена.— 2009. №95.— С. 63–67.

3. **Гороховатский, Ю.А.** Исследование стабильности электретного состояния в композитных пленках на основе ПЭВД с наноразмерными включениями аэросила [Текст]/ Ю.А. Гороховатский, И.Ю. Гороховатский [и др.] // Матер. XI межд. конф. «Физика диэлектриков».— СПб, 2008. Т. 2.— С. 346–349.

4. **Рычков, А.А.** Электретный эффект в структурах полимер-металл [Текст]: Монография / А.А. Рычков, В.Г. Бойцов.— СПб.: Изд-во РГПУ.— 2000.— С. 250–280.

5. **Борисова, М.Э.** Физика диэлектрических материалов, электроперенос и накопление заряда в диэлектриках [Текст]: Учебное пособие / М.Э. Борисова, О.В. Галюков, П.В. Цацынкин.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004.— С. 62–75.

6. **Лущейкин, Г.А.** Полимерные электреты [Текст] / Г.А. Лущейкин.— М.: Химия, 1984.— 184 с.

7. **Рычков, А.А.** Эффект стабилизации электретного заряда в пленках политетрафторэтилена с химически модифицированной поверхностью [Текст] / А.А. Рычков, В.Н. Пак, А.Е. Кузнецов // Известия РГПУ им. А.И. Герцена.— СПб.— 2007. Т. 7, №26.— С. 137–141.

8. **Еремеев, Д.А**. Изучение композиционных короноэлектретов на основе полиэтилена и белой сажи [Текст]/ Д.А. Еремеев, М.Ф. Галиханов, Р.Я. Дебердеев //Структура и динамика молекулярных систем.— 2003. Вып. X, ч. 1.— С. 122–125.

9. **Sessler, G.M.** Distribution and Transport of Charge in Polymers [Text] // Electrets/ Third edition.— Laplacian Press.-California.— 1999. Vol. 2.— P. 1–80.

REFERENCES

1. Galikhanov M.F., Yeremeev D.A., Deberdeev R.J. Electrets based on the composition density polyethylene with carbon black [Text] // Plast. mass.— 2002. № 10.— 26–28 s. (rus.)

2. **Gorokhovatsky Y.A., Tazenkov B.A. [and others].** On the nature of the electret state in the composite films of LDPE with nanodispersnymi fillers SiO_2 [Text] // Proceedings of the Herzen State Pedagogical University. A.I. Herzen.— 2009. № 95.— P. 63–67. (rus.)

3. **Gorokhovatsky Y.A., Gorokhovatsky I.Y. [and others].** A stability study of the electret state in composite films based on LDPE with nanoscale inclusions aeroforce [Text] // Mat. XI Intl. Conf. «Physics of dielectrics».— St. Petersburg.— 2008. Vol. 2.— P. 346–349. (rus.)

4. **Rychkov A.A., Boytsov V.G.** The electret effect in polymer-metal structures [Text]: Monograph.— SPb.: RGPU publishing house.— 2000.— P. 250–280. (rus.)

5. **Borisova M.E., Galyukov O.V., Tsatsynkin P.V.** Physics of dielectric materials, electron transport and charge accumulation in dielectrics [Text]: Textbook.— St. Petersburg.: Publishing House of the Polytechnic University, 2004.— P. 62–75. (rus.)

6. **Luscheykin G.A.** Polymer electrets [Text].— M.: Chemistry, 1984.— 184 s. (rus.)

7. **Rychkov A.A., Pak V.N., Kuznetsov A.E.** The stabilization effect of the electret charge in the films of polytetrafluoroethylene with a chemically modified surface [Text] // Proceedings of the Herzen State Pedagogical University. A.I. Herzen.— St. Petersburg.— 2007. № 26, Vol. 7.— P. 137–141. (rus.)

8. **Yeremeev D.A., Galikhanov M.F., Deberdeev R.J.** Study koronoelektretov composite based on polyethylene and carbon white [Text] // Structure and dynamics of molecular systems. 2003.— Iss. X. Part 1.— P. 122–125. (rus.)

9. **Sessler G.M.** Distribution and Transport of Charge in Polymers // Electrets/ third edition.— Laplacian Press. California.— 1999. Vol. 2.— P. 1–80. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОСИНА Юлия Константиновна — аспирант кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: julia_npf@list.ru

БОРИСОВА Маргарита Эдуардовна — доктор технических наук профессор кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vladimirl.borisov@gmail.com

ГАЛИХАНОВ Мансур Флоридович — доктор технических наук профессор кафедры технологии переработки полимеров и композиционных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета; 420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия; e-mail: mgalikhanov@yandex.ru

AUTHORS

OSINA Julia K. - Saint-Petersburg State Polytechnical University, 195251, st. Polytechnique, 29, of St. Petersburg, Russia; e-mail: julia_npf@list.ru

BORISOVA Margarita E. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vladimirl.borisov@gmail.com

GALIKHANOV Mansour F. — Kazan, Kazan State Technological University, 420015, Str. K. Marx, 68, Kazan, Russia; e-mail: mgalikhanov@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.313

Б.В. Сидельников, И.К. Кобяков

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

B.V. Sidelnikov, I.K. Kobyakov

METHODS OF REDUCING THE VOLTAGE ON THE WINDINGS OF EXCITATION IN THE UNSTEADY CONDITIONS OF ASYNCHRONOUS GENERATORS

Рассмотрены нестационарные процессы в цепях возбуждения и статора асинхронизированных гидрогенераторов как причины, вызывающие перенапряжения на распределенных обмотках возбуждения. Перенапряжения рассчитывались в системе имитационного моделирования Matlab/Simulink. Проведен сравнительный анализ максимальных напряжений на выбранных секциях ротора при внезапном коротком замыкании, найденных аналитическим методом и с помощью моделирования. Даны рекомендации по вопросу ограничения динамических перенапряжений.

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ГИДРОГЕНЕРАТОР. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. SIMULINK-МОДЕЛЬ.

Non-stationary processes in circuit of excitement or a stator of asynchronized hydrogenerator as the reasons causing an overvoltage on the distributed windings of excitement are considered. Analytical calculation of the overvoltage in system of imitating modeling of Matlab/Simulink is made. A comparative analysis of the results of the calculation of maximum voltage on the chosen sections of a rotor for the sudden short circuit, received by an analytical method and by means of modeling is carried out. Recommendations about a question of restriction of dynamic overvoltage are given.

ASYNCHRONIZED HYDROGENERATOR. TRANSITIONAL CONDITIONS. OVERVOLTAGE. NON-STATIONARY PROCESSES. MATHEMATICAL SIMULATION. SIMULINK-MODEL.

В последнее десятилетие в связи с необходимостью модернизации и технического обновления устаревшего оборудования в электроэнергетике возник вопрос о детальном исследовании и внедрении асинхронизированных генераторов. Асинхронизированные гидрогенераторы (АСГД) обладают рядом преимуществ. Одна из особенностей их конструкции — фазная распределенная обмотка возбуждения. Первый опыт использования таких машин в России был в начале 60-х годов XX века на Иовской ГЭС. Несмотря на то, что работа таких гидрогенераторов в целом оценивается положительно, наблюдались пробои изоляции обмотки возбуждения, связанные с переходными режимами. До настоящего времени вопрос перенапряжений остается актуальным. До конца не выяснены причины возникновения перенапряжений, и публикаций, посвященных методикам, которые позволяют рассчитать перенапряжения, мало.

Причины, вызывающие перенапряжения на распределенной обмотке возбуждения асинхронизированных гидрогенераторов, кроются в нестационарных процессах в цепях возбуждения или статора. Обзор возможных причин возникновения перенапряжений на обмотке возбуждения сделан в докладе [1].

Перенапряжения, обусловленные питанием обмотки возбуждения от полупроводниковых преобразователей с элементами односторонней

проводимости. В современных системах возбуждения при асинхронном вращении ротора АСГД напряжения формируются при помощи широтно-импульсной модуляции с несущей частотой в несколько сотен или тысяч Гц. Высокие градиенты потенциалов способствуют резко неравномерному их распределению по длине обмотки, а при неблагоприятных параметрах — развитию резонансных явлений. Кроме того, постоянное прохождение импульса с крутым фронтом вызывает в токовых цепях волновые процессы, которые могут привести к перенапряжениям на элементах электрооборудования, интенсивному старению и снижению сроков службы изоляции с последующими пробоями даже, казалось бы, при допустимых уровнях напряжений [2, 3]. Перенапряжения, вызванные импульсами в системе возбуждения, применительно к асинхронным двигателям рассмотрены в публикациях [4, 5]. Наибольшие успехи по освоению асинхронизированных гидрогенераторов достигнуты в Японии фирмами Hitachi и Toshiba [6, 7], которые создали АСГД мощностью до 500 мВт с возможным изменением частоты ω в пределах ±10 %. Для борьбы с перенапряжениями здесь применяют тройные фильтры, а также устанавливают в цепях возбуждения специальные ограничители. Подобные меры исключают необходимость введения каких-либо изменений в конструкцию собственно генератора.

При переходных режимах в энергосистеме (внезапные короткие замыкания, обрыв фазы, грубая синхронизация и т. д.) в токе статора возникают апериодические составляющие, индуктирующие в фазах ротора электродвижущие силы (ЭДС) e_r с частотой вращения, которые в зависимости от числа витков индуктора могут превышать номинальное напряжение якоря. Хотя напряжение на кольцах ротора определяется возбудителем, распределение потенциалов по длине обмотки неравномерно, что проявляется в виде перенапряжений на отдельных группах секций. Этот фактор, по мнению ряда исследователей, может быть наиболее вероятной причиной пробоя изоляции катушек ротора. Он должен приниматься во внимание при проектировании генератора.

Впервые на необходимость изучения динамических перенапряжений обращено внимание еще в 60-х годах прошлого столетия [8, 9]. Был предложен достаточно простой способ их расчета, ориентированный на построение векторных диаграмм секционных ЭДС обмотки возбуждения создаваемых апериодическими токами статора. Основные недостатки такого подхода:

1) необходимость предварительного определения ЭДС, индуктируемых апериодическим током статора в обмотке возбуждения, и допущение о постоянстве этих токов во времени;

2) отсутствие четкого представления об индуктивных параметрах машины, определяющих падение напряжения на секциях;

3) предположение о синусоидальном характере изменения во времени рассматриваемых переменных, пренебрежение насыщением и активными сопротивлениями цепи возбуждения.

Более точные данные удается получить, используя известные, хорошо отработанные математические модели синхронных машин и дополняя их специальными подмоделями для расчета искомых напряжений в переходных процессах. Основанная на этих положениях методика и компьютерная реализация программы анализа результатов разработана на кафедре электрических машин СПбГПУ. Краткое описание модели асинхронизированного генератора, построенной в системе имитационного моделирования Matlab/Simulink, в которой учтены перечисленные выше недостатки предыдущего метода, дано в докладе [10] и более подробно в [11].

Наиболее тяжелые условия (с точки зрения перенапряжений рассматриваемого вида) связаны с режимами, когда максимально проявляются апериодические токи статорной обмотки. К ним, в частности, относятся: трехфазные короткие замыкания, максимально приближенные к выводам машины; повторные включения в сеть; грубая синхронизация и т. д. Именно для этих режимов применительно к параметрам макета асинхронизированного генератор-двигателя типа АСГО316, которые были любезно предоставлены сотрудниками ОАО «Электросила», проведены расчеты с использованием двух описанных выше методов. Все решения получены в относительных единицах при обычных для синхронных машин базисных количествах.

Математическая модель реализована в пакете с учетом основных сопутствующих явлений, в том числе насыщения, изменения частоты вращения и напряжения статорной обмотки, регулирования возбуждения. В качестве примеров

на рис. 1–4 последовательно в функции синхронного времени ($\tau = 2\pi f_1 t$) воспроизведены следующие режимы:

работа машины при номинальном напряжении сети в интервале времени $0 < \tau < 6{,}28$ рад (0,02 с);

трехфазное короткое замыкание ($6{,}28 < \tau < 15{,}7$ рад);

повторное включение на сеть с номинальным напряжением.

На этих рисунках переменные по осям координат отложены в относительных единицах.

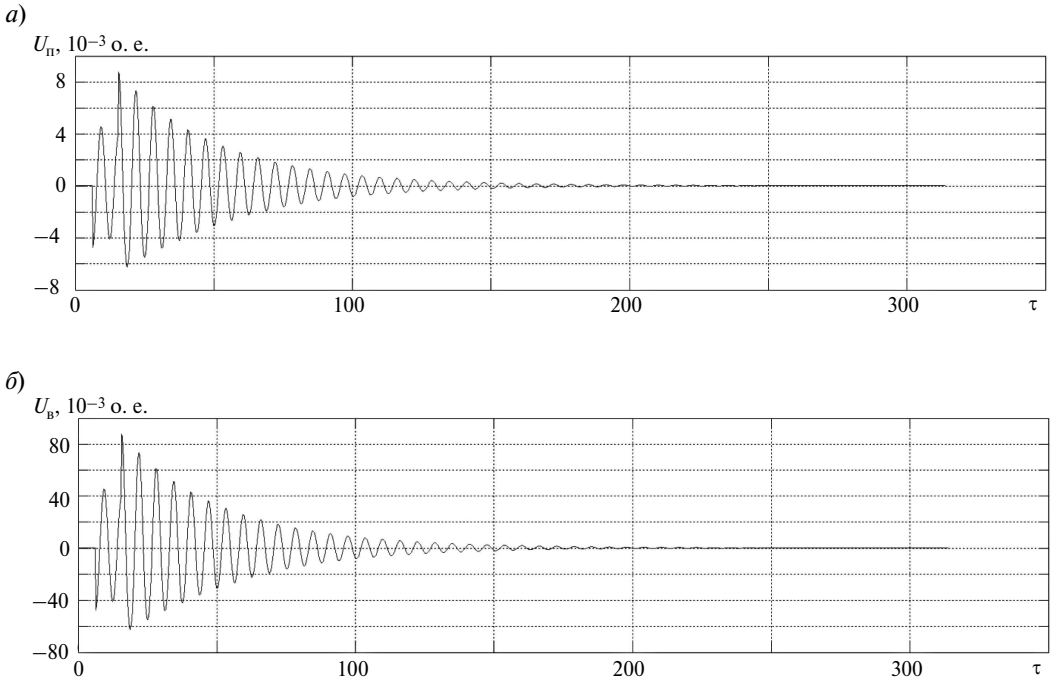


Рис. 1. Максимальные напряжения на выбранных элементах петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмотки возбуждения при трехфазном коротком замыкании с последующим повторным включением в сеть

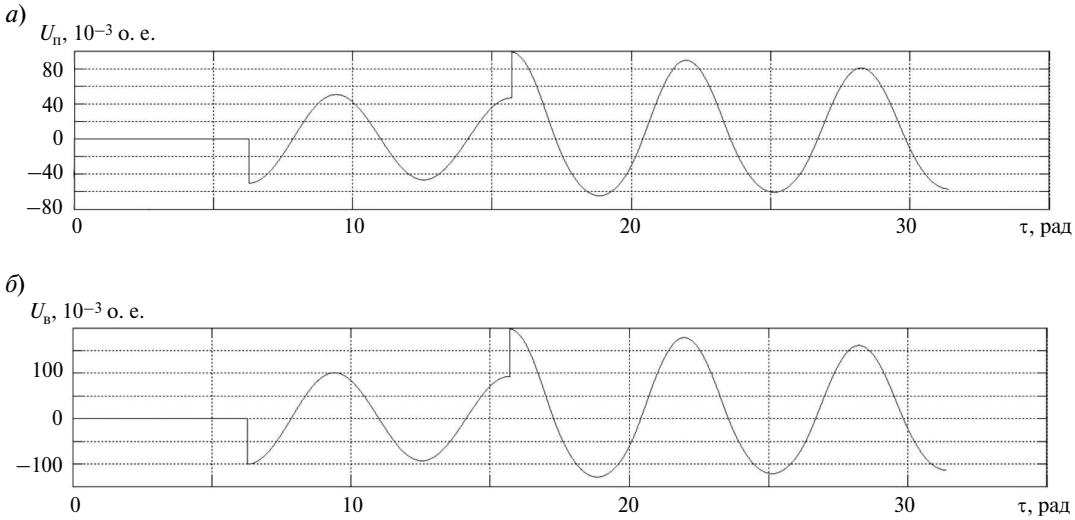


Рис. 2. Начальная часть процесса, показанного на рис. 1, при наличии на роторе петлевой (*а*) или волновой (*б*) обмоток

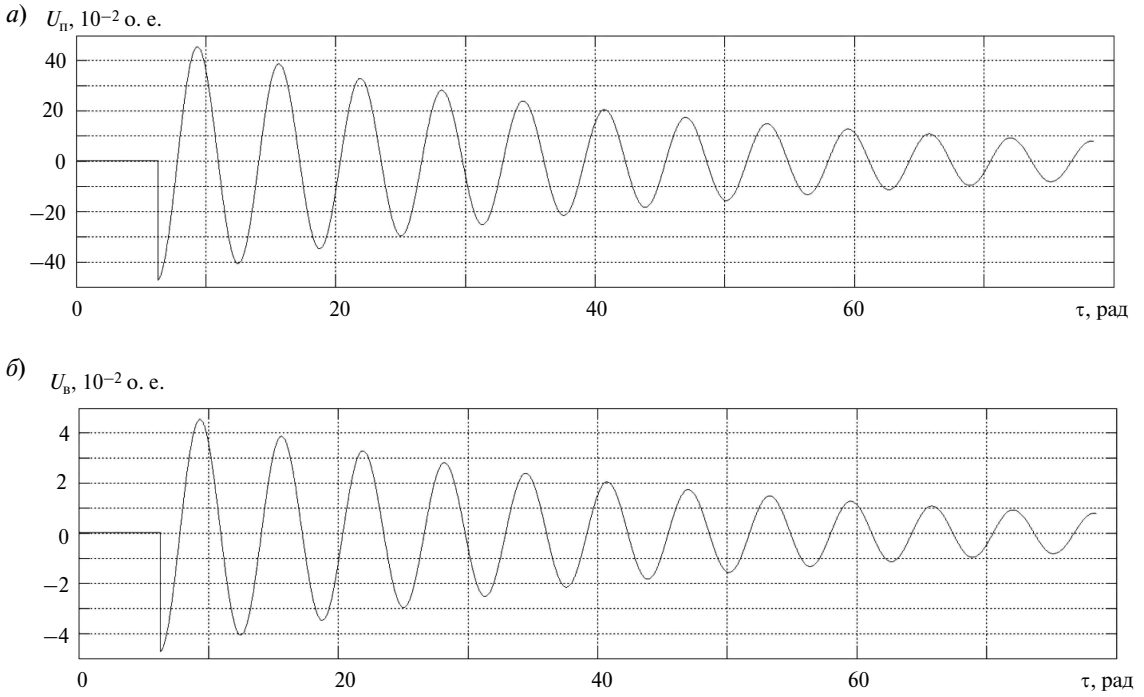


Рис. 3. Изменение во времени величин напряжений на элементах петлевой (*а*) или волновой (*б*) обмотки возбуждения при трехфазном коротком замыкании

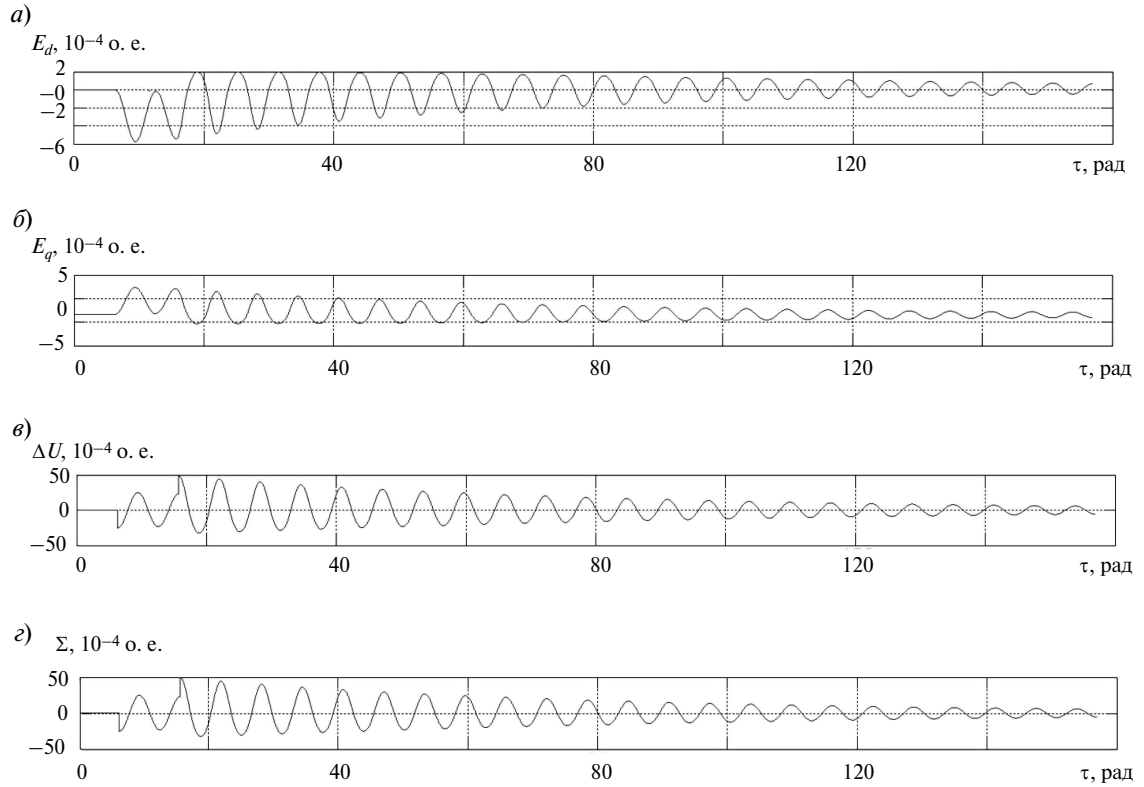


Рис. 4. ЭДС секции, наведенная продольным (*а*) и поперечным (*б*) полем, падение напряжения $\Delta U = i_f r_i / 2pq$ (*в*) и их сумма Σ (*г*)

На рис. 1 показано, каких значений могут достигать амплитуды напряжений на выбранных элементах петлевой или волновой обмотки возбуждения макета. На рис. 2 выделена начальная часть процесса, показанного на рис. 1.

Рис. 3 иллюстрирует для двух рассмотренных типов обмоток процесс затухания максимальных напряжений при трехфазном коротком замыкании. Если принять во внимание, что базисное значение напряжения возбуждения рассматриваемой машины равно $U_{f\sigma} =$ = 2480,4 В, амплитуда исследуемой переменной при повторном включении может достигать в обмотке волнового типа 213,3 В, т. е. превышает напряжение возбуждения в номинальном синхронном режиме (U^*) более чем в 10 раз. Интересно, что для петлевой обмотки аналогичная величина составляет всего 1,06 от номинального значения.

С целью оценки точности расчетов для каждого момента времени были просуммированы ЭДС всех секций, индуктированные в рассматриваемом переходном режиме, и падение напряжения на активном сопротивлении $\left(i_f r_f\right)$ (см. рис. 4). Результат этой процедуры (рис. 5) полностью совпадает с напряжением возбудителя, что подтверждает достоверность результатов моделирования.

В таблице представлены сравнительные данные для ЭДС конкретной секции $\left(U_{ci}\right)$, а также для максимальных величин напряжений на группе выбранных секций $\left(U_c\right)$ обмотки возбуждения макета АСГД в режиме внезапного трехфазного короткого замыкания, полученные моделированием или аналитическим методом и отнесенные к напряжению $U_{f\text{н}}$ при номинальной нагрузке и синхронной скорости вала.

Завышенные результаты аналитических расчетов объясняются, главным образом, неучетом затухания во времени токов статорной цепи. Наглядной иллюстрацией данных таблицы служит рис. 6.

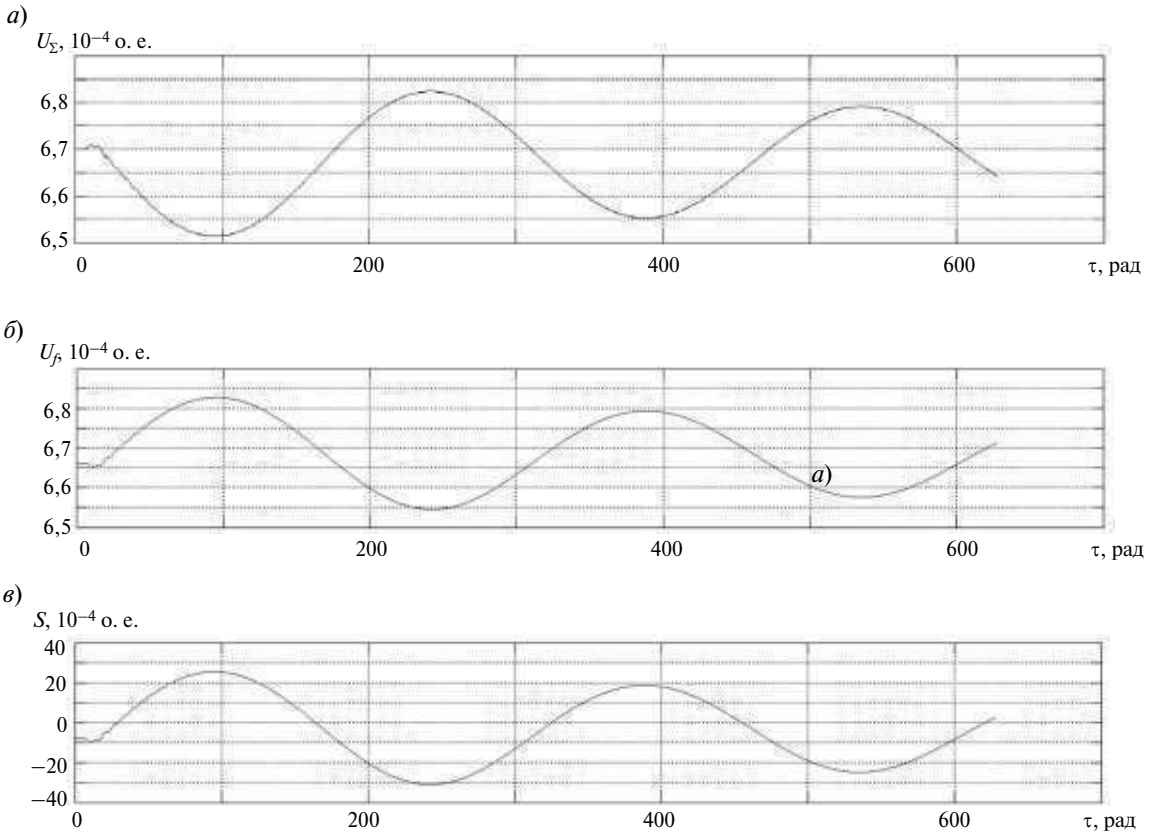


Рис. 5. Полученное по составляющим напряжение на всех секциях фазы обмотки возбуждения U_Σ (*а*), напряжение возбудителя U_f (*б*), скольжение *s* (*в*)

Максимальные напряжения на выбранных секциях ротора, рассчитанные для внезапного короткого замыкания аналитически и с помощью моделирования

τ, рад	U_{ci}, о. е.		U_i, В		$U_i/U_{f\,н}$		$U_{i\,аналит}/U_{f\,н}$	
	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка
9	0,045	0,0045	111,62	11,16	5,58	0,56	7,61	0,76
16	0,038	0,0038	94,26	9,43	4,71	0,47	7,61	0,76
22	0,033	0,0033	81,85	8,19	4,09	0,41	7,61	0,76
28,5	0,028	0,0028	69,45	6,95	3,47	0,35	7,61	0,76
34,5	0,023	0,0023	57,05	5,70	2,85	0,29	7,61	0,76
41	0,02	0,002	49,61	4,96	2,48	0,25	7,61	0,76
47	0,017	0,0017	42,17	4,22	2,11	0,21	7,61	0,76
53	0,015	0,0015	37,21	3,72	1,86	0,19	7,61	0,76
59,5	0,012	0,0012	29,76	2,98	1,49	0,15	7,61	0,76
66	0,0105	0,00105	26,04	2,60	1,30	0,13	7,61	0,76
72,3	0,0095	0,00095	23,56	2,36	1,18	0,12	7,61	0,76

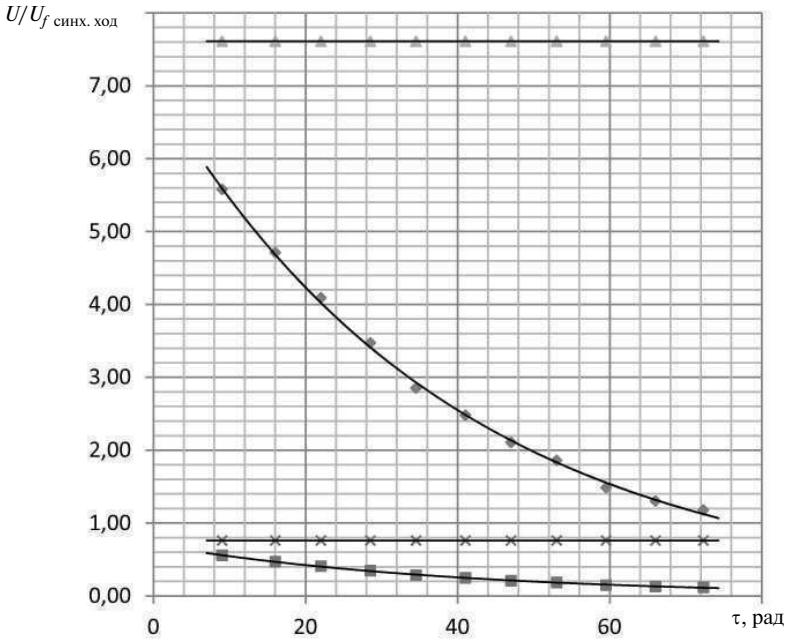


Рис. 6. Динамические перенапряжения на элементах волновой или петлевой обмотки возбуждения

(◆ — волновая обмотка; ■ — петлевая обмотка; ▲ — аналит. метод (волн. обм.); × — аналит. метод (петл. обм.)

Хотя рассчитанные выше перенапряжения для макета не являются критическими, в генераторах большой мощности подобные результаты вряд ли можно получить в связи с тем, что в них напряжения на кольцах ротора в стационарных условиях выбираются более высокими. Кроме того, при скольжениях, отличных от нуля, динамические составляющие суммируются с существенно возросшим напряжением возбудителя. Можно предложить проанализировать три следующих способа снижения перенапряжений рассматриваемого вида:

изменение параметров генератора;

уменьшение числа витков обмотки возбуждения;

выбор рациональной схемы обмотки.

Целенаправленным изменением параметров машины принципиально можно уменьшить ЭДС, индуктируемую в контурах ротора при переходных режимах. В частности, в процессе внезапного трехфазного короткого замыкания на зажимах асинхронизированных генераторов за счет незатухающих апериодических токов статора в обмотке возбуждения генерируется ЭДС, равная $E_r = U_s\omega\left(1-\frac{x_s}{x'_d}\right)$ о. е., где U_s — напряжение, в относительных единицах, для режима, предшествующего короткому замыканию; x'_d, x_s — переходное сопротивление и сопротивление рассеяния статорной обмотки; ω — частота вращения вала.

К сожалению, вряд ли возможно уменьшить E_r за счет сколь-либо заметного увеличения отношения x_s/x'_d, не ухудшая эксплуатационных свойств генератора.

Уменьшение числа витков обмотки возбуждения соответствует по условиям обеспечения установившихся режимов аналогичному изменению напряжения и росту тока возбуждения при их измерении в именованных единицах, что в свою очередь ведет к увеличению суммы потерь: электрических в обмотке (p_e) и щеточном контакте $\left(p_{щ}\right)$, а также механических. Становится более громоздким узел токопровода.

Суммарные электрические потери определяются формулами

$$p_f = p_e + p_{щ}; \quad p_e = i_f^2 r_f; \quad p_{щ} = \Delta U_{щ} i_f.$$

Сопротивление обмотки равно $r_f = \rho l_v j F_f / i_f^2$, где ρ — удельное сопротивление проводников, l_v — средняя длина витка, j — плотность тока, F_f, i_f — магнитодвижущая сила (МДС) и ток возбуждения.

При изменении напряжения U_f и заданных значениях МДС индуктора и плотности тока в номинальном режиме на кольцах ротора электрические потери оказываются постоянными, а именно: $p_e = \rho l_v F_f$. Однако в этом варианте пришлось бы менять геометрию пазового слоя ротора, так как с ростом напряжения за счет дополнительной изоляции снижается коэффициент заполнения паза медью $\left(k_з\right)$. При желании сохранить площадь паза $\left(S_п\right)$ имеем: $p_e = \rho l_v F_f^2 / k_з S_п$. Здесь при увеличении U_f и соответствующем уменьшении i_f за счет уменьшения $k_з$ потери в реальных условиях незначительно растут.

Если принять, что $\Delta U_{щ} = \rho_{щ} j_{щ} l_{щ}$ = const, величина $\rho_{щ}$ оказывается пропорциональной току возбуждения, а при $k_з$ = const — обратно пропорциональной U_f. В таком случае оптимальным с точки зрения суммарных потерь будет условие повышенных напряжений возбуждения и, к сожалению, перенапряжений в переходных режимах.

Выбор рациональной схемы обмотки — наиболее радикальный способ ограничения динамических перенапряжений, особенно для тихоходных машин большой мощности. Иллюстрацией к сказанному могут служить данные таблицы, согласно которым простая замена волновой обмотки возбуждения на петлевую для исследуемого макета гидрогенератора позволяет снизить практически в десять раз ожидаемые максимальные напряжения между выбранными секциями при переходных режимах. Если по определенным причинам желательно использовать именно волновую обмотку, то для снижения индуктированных напряжений в [8, 9] предлагается схему дополнить специальными перемычками.

Разработана методика определения перенапряжений при переходных режимах по уравнению динамики с учетом изменения скорости, насыщения, номинальных параметров машины. Рабочая модель реализована с помощью программного комплекса Matlab/Simulink. Проана-

лизированы способы снижения перенапряжений при переходных режимах, в том числе за счет изменения параметров машины, снижения номинального напряжения обмотки возбуждения и изменения схемы обмотки. Наиболее радикальным является последний способ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кобяков, И.К.** Перенапряжения на роторных обмотках электрических машин двойного питания [Текст] / И.К. Кобяков, Б.В. Сидельников // XL неделя науки СПбГПУ: матер. междунар. научно-практ. конф. Ч. II.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 79–80.

2. **Беспалов, В.Я.** Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователей [Текст] / В.Я. Беспалов, К.Н. Зверев // Электротехника.— 1999. №9.— С. 56–59.

3. **Белассел, М.Т.** Емкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя [Текст] / М.Т. Белассел, В.Я. Беспалов, Бухемис Шетат // Электротехника.— 2005. № 1.— С. 44–47.

4. **Ватаев, А.С.** Расчет импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронных электродвигателей при питании от инвертора с широтно-импульсным модулятором [Текст] / А.С. Ватаев, В.В. Попов, И.И. Талья // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. №2(50).— С. 203–207.

5. **Ватаев, А.С.** Высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01: защищена 11.12.09 / Ватаев Андрей Сергеевич.— 2009.— 189 с.

6. **Мамиконянц, Л.Г.** Асинхронизированные синхронные генераторы: Состояние, проблемы, перспективы [Текст] / Л.Г. Мамиконянц, Ю.Г. Шакарян // Электричество.— 1994. №3. С. 1–9.

7. **Цгоев, Р.С.** Параллельная работа синхронной и асинхронизированной машины переменного тока [Текст] / Р.С. Цгоев // Электро. Исследования и разработки.— 2004. №6.— С. 8–13.

8. **Волкова, Е.А.** Способ снижения индуктированных напряжений между частями многослойной обмотки фазного ротора [Текст] / Е.А. Волкова, Л.А. Суханов // Электротехника.— 1974. №2.— С. 17–20.

9. **Волкова, Е.А.** Исследование индуктированных напряжений в обмотке ротора асинхронизированных машин [Текст] / Е.А. Волкова, Л.А. Суханов, О.Н. Филичев // Электричество.— 1976. № 10.— С. 29–34.

10. **Кобяков, И.К.** Разработка методики расчета динамических перенапряжений на обмотке возбуждения асинхронизированного синхронного генератора [Текст]: Дис. ... магистр. / И.К. Кобяков.— 2012.

11. **Кобяков, И.К.** Методика расчета динамических перенапряжений на обмотке возбуждения асинхронизированного синхронного генератора [Текст] / И.К. Кобяков.— 3-я конф. молодых специалистов инженерно-техн. служб ОАО «Силовые машины».— 2012.— С. 17.

REFERENCES

1. **Kobiakov I.K.** Perenapriazheniia na rotornykh obmotkakh elektricheskikh mashin dvoinogo pitaniia [Tekst] / Kobiakov I.K., Sidel'nikov B.V. // XL nedelia nauki SPbGPU: materialy mezhdunar. nauchno-prakticheskoi konf. Ch. II— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011.— S. 79–80. (rus.)

2. **Bespalov V.Ia., Zverev K.N.** Impul'snye perenapriazheniia v obmotkakh asinkhronnykh dvigatelei pri pitanii ot ShIM-preobrazovatelei [Tekst] // Elektrotekhnika.— 1999. №9.— S. 56–59. (rus.)

3. **Belassel M.-T., Bespalov V.Ia., Shetat Bukhemis.** Emkostnye parametry i perenapriazheniia v obmotke asinkhronnogo dvigatelia, pitaemogo ot ShIM-preobrazovatelia [Tekst] // Elektrotekhnika.— 2005. №1.— S.44–47. (rus.)

4. **Vataev A.S., Popov V.V., Tal'ia I.I.** Raschet impul'snykh perenapriazhenii v obmotke statora asinkhronnykh elektrodvigatelei pri pitanii ot invertora s shirotno-impul'snym moduliatorom [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2007. №2(50).— S. 203–207. (rus.)

5. **Vataev A.S.** Vysokochastotnye elektromagnitnye protsessy i perenapriazheniia v chastotno-reguliruemykh asinkhronnykh elektrodvigateliakh s korotkozamknutym rotorom [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.01: zashchishchena 11.12.09 / Vataev Andrei Sergeevich.— 2009.— 189 s. (rus.)

6. **Mamikoniants L.G., Shakarian Yu.G.** Asinkhronizirovannye sinkhronnye generatory: Sostoianie, problemy, perspektivy [Tekst] // Elektrichestvo.— 1994.— №3. S. 1–9. (rus.)

7. **Tsgoev R.S.** Parallel'naia rabota sinkhronnoi i asinkhronizirovannoi mashiny peremennogo toka [Tekst] // Elektro.Issledovaniia i razrabotki.— 2004. №6.— S. 8–13. (rus.)

8. **Volkova E.A., Sukhanov L.A.** Sposob snizheniia induktirovannykh napriazhenii mezhdu chastiami mnogosloinoi obmotki faznogo rotora [Tekst] // Elektrotekhnika.— 1974. №2.— S. 17–20. (rus.)

9. **Volkova E.A., Sukhanov L.A., Filichev O.N.** Issledovanie induktirovannykh napriazhenii v obmotke rotora asinkhronizirovannykh mashin [Tekst] // Elektrichestvo.— 1976. № 10.— S. 29–34. (rus.)

10. **Kobiakov I.K.** Metodika rascheta dinamicheskikh perenapriazhenii na obmotke vozbuzhdeniia asinkhronizirovannogo sinkhronnogo generatora [Tekst] // 3-ia konferentsiia molodykh spetsialistov inzhenerno-tekhnicheskikh sluzhb OAO «Silovye mashiny».— 2012.— S. 17. (rus.)

11. **Kobiakov I.K.** Razrabotka metodiki rascheta dinamicheskikh perenapriazhenii na obmotke vozbuzhdeniia asinkhronizirovannogo sinkhronnogo generatora [Tekst].— Dis. ... magistr.— 2012.— 100 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СИДЕЛЬНИКОВ Борис Викторович — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Sidelnik@mebil.stu.neva.ru

КОБЯКОВ Илья Кириллович — аспирант кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ilya.kobyakov@gmail.com

AUTHORS

SIDELNIKOV Boris V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Sidelnik@mebil.stu.neva.ru

KOBYAKOV Ilya K. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ilya.kobyakov@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.372.001

М.А. Шакиров, В.В. Андрущук

АНТИПОТОКИ И СВЕРХПОТОКИ В ДВУХСТЕРЖНЕВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ В РЕЖИМАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

M.A. Shakirov,.V.V. Andrushchuk

MAGNETIC SUPER FLUXES AND ANTI FLUXES IN TRANSFORMERS WITH TWO RODS UNDER SHORT-CIRCUIT

Представлены ранее неизвестные особенности магнитного поля двухстержневого трансформатора в режимах короткого замыкания, подтвержденные экспериментами, выполненными в лаборатории кафедры теоретических основ электротехники СПбГПУ. Полученные результаты несовместимы с известными Т-образными схемами замещения и ставят вопрос о создании новых схемных моделей двухстержневых трансформаторов.

ТРАНСФОРМАТОР. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯРМО. ОБМОТКА. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

Previously unknown transformer magnetic field abnormalities in short circuit regimes are presented. The phenomena have been recorded and proved by experiments in the laboratory in the subdepartment of «Theoretical foundations of electrical engineering». The results obtained are not reconcilable with the known T-circuit transformer model and put forward the challenging problem about creation of the new model of transformers.

TRANSFORMER. MAGNETIC CURRENT. YOKE. WINDING. SHORT CIRCUIT.

Выход из строя силовых трансформаторов линий электропередач крайне нежелателен. Поэтому и в прошлом и в настоящем изучение и описание их поведения в аварийных режимах, в том числе в режимах короткого замыкания (КЗ), постоянно находятся в центре внимания инженеров-электриков. В последнее время на повестке дня — полное обновление теории трансформаторов, включая принцип их действия, так как существующая теория с ее Т-образной и П-образной схемами замещения не отвечает реальным физическим процессам в трансформаторах даже в номинальном режиме их работы [1, 2]. В частности, в традиционной теории широко используется понятие «поток в стали», который, «при коротком замыкании падает почти до нуля», поскольку, как написано в учебнике [3, стр.75], «он как бы «вытесняется» из сердечника, при этом остаются только потоки рассеяния». С позиций исследований, проведенных в [1, 2], это высказывание является вымыслом, поскольку в действительности оказывается, что при КЗ:

в стали трансформатора сосуществуют несколько различных потоков;

в одном из участков в стали может возникнуть сверхпоток, т. е. поток перевозбуждения (ГОСТ 16110–82, раздел 8.18), превышающий поток холостого хода (ХХ) в этом участке при одинаковом напряжении в обоих режимах (т. е. в установившихся режимах ХХ и КЗ);

одновременно в другом участке стали может возникнуть антипоток, т. е. поток, имеющий направление, противоположное установившемуся потоку ХХ на этом участке.

К настоящему времени эти аномальные (с точки зрения традиционной теории) явления получили для однофазного двухобмоточного трансформатора **броневого типа** системное подтверждение, т. е. подтверждение в виде совокупности различных подходов, каждый из которых на равных может рассматриваться как определяющий рассматриваемые явления. Они подтверждены, во-первых, теоретическими исследованиями, приведшими к разработке новой

модели в виде 2Т-образной схемы замещения для броневого осесимметричного трансформатора (аналогичного по конструкции трансформаторам с цилиндрическим боковым ярмом известной фирмы «Brown Bovery Company»), позволившей вывести формулы для оценки его сверх- и антипотоков в установившихся режимах КЗ [2]. Во-вторых, прямым построением картин магнитных потоков в азимутальной плоскости этих трансформаторов в режиме КЗ с применением современных программ анализа осесимметричных полей методами конечных элементов (МКЭ) [4]. И, наконец, в-третьих, физическими экспериментами по выявлению этих потоков в моделях броневых трансформаторов с плоской магнитной системой промышленного изготовления [5].

В отличие от осесимметричных броневых, магнитопровод **двухстержневого** трансформатора несимметричен относительно обмоток, поскольку одна часть каждой из обмоток находится в окне, а другая ее часть — вне окна. Это приводит к более сложной картине магнитного поля. Однако, как показано в [6] на примерах картин магнитных полей *плоскопараллельных* двустержневых трансформаторов, в них также возникают сверх- и антипотоки в режимах КЗ Цель данной работы — подтверждение возникновения этих потоков непосредственно в экспериментах, для чего используются измерительные витки, размещенные в различных частях реальных двухстержневых трансформаторов с учетом предсказаний [6]. Как и в [5], в опытах использовались повышенные частоты (500–1000 Гц), чтобы можно было приблизиться к условиям, характерным для мощных трансформаторов, активные сопротивления обмоток которых достаточно малы по сравнению с их индуктивным сопротивлением КЗ. Эксперименты проводились для трансформаторов с высотой обмоток $h_{\text{обм}}$ как равной высоте окна трансформатора $h_{\text{окн}}$ (т. е. при $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$), так и меньшей высоты окна (т. е. при $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$).

Примечание 1. Приведенные ниже результаты важны также для сопоставления с экспериментами, выполненными в работе [7], автор которой прокомментировал их на основе весьма упрощенных картин магнитных полей. Упрощение состояло в пренебрежении влиянием на картины полей токов половинок обмоток двухстержневого трансформатора, находящихся за пределами его окна. Вопрос о приемлемости такого подхода поднят в [6].

Часть 1. Трансформатор с высотой обмоток $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$

Анализ картин распределения магнитных потоков в двухстержневых трансформаторах, представленных в [6], указывает на то, что (как и в броневом трансформаторе), если в одной его части возникает сверхпоток, то в другой его части одновременно возникает антипоток. Наиболее явно это свойство выражено в трансформаторе с высотой обмоток $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$. Далее для удобства, ориентируясь на изображение четверти двухстержневого трансформатора (рис. 1, *а*), будем пользоваться понятием левой и правой половин его обмоток. Стальное стыковое ярмо для краткости будем называть просто стыком.

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внешней обмотки. Более сложный характер распределения магнитных потоков в двухстержневом трансформаторе по сравнению с броневым вытекает из сравнения их магнитных полей при КЗ внешней обмотки (рис. 1). Плоскопараллельная картина поля (рис. 1, *а*) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 1, *б*) — из работы [4]. Поля в двухстержневых трансформаторах обладают как продольной, так и поперечной антисимметрией. Поэтому на рис. 1, *а* картина поля представлена в пределах сектора второго квадранта прямоугольной системы координат, ограниченного положительной осью *y*, отрицательной осью *x* и баком, играющим роль идеального электромагнитного экрана. Поле на рис. 1, *б* построено для произвольной азимутальной плоскости броневого трансформатора с концентрическим боковым ярмом.

Различия полей (см. рис. 1) очевидны. В частности, в отличие от броневого, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внешней обмотки наблюдается *общий* поток в стали, охватывающий все четыре половинки обмоток окна. Однако больший интерес представляет выявление *сходства* картин полей с целью привлечения для описания работы двухстержневого трансформатора тех же схем замещения (магнитоэлектрических [8], 2Т-образных [2]), которые были ранее получены для броневого

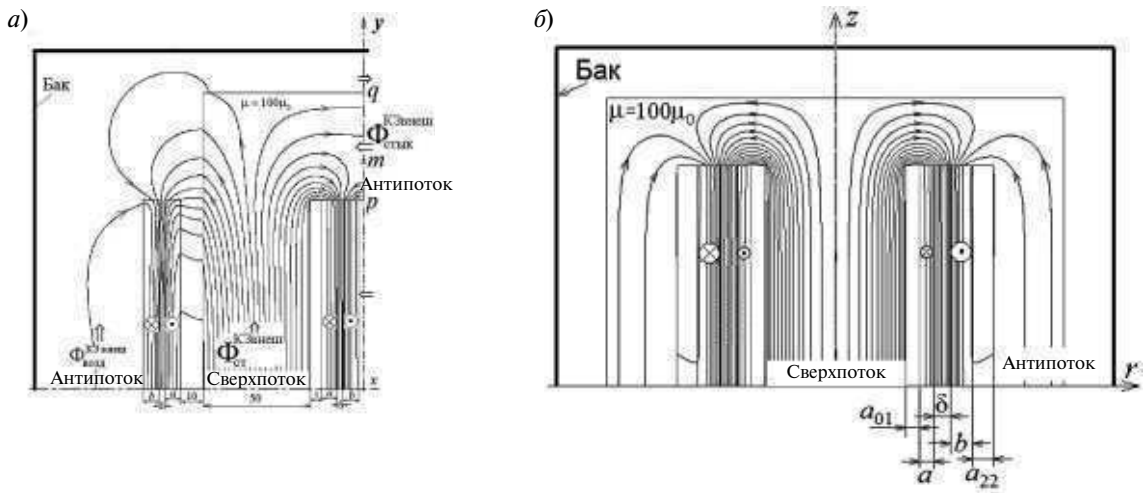


Рис. 1. Сравнение магнитных полей при КЗ внешней обмотки двухстержневого (*а*) и броневого (*б*) трансформаторов с высотами обмоток равными высоте окна

трансформатора. Сходными являются следующие особенности полей броневого и двухстержневого трансформаторов при КЗ их внешних обмоток:

образование сверхпотоков в стержнях;

подобие магнитных полей в окнах. Если принять, что поле в левых половинках обмоток двухстержневого трансформатора практически такое же, как и в правых половинках (по крайней мере, в их серединах на оси x), то можно считать, что поля в обмотках обоих типов трансформаторов также подобны;

антипотоку в середине бокового ярма броневого трансформатора (см. рис. 1, *б*) соответствует антипоток $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ в средней части стыка двустержневого трансформатора на линии p,q (рис. 1, *а*), равный

$$\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = \Phi_{mp} - \Phi_{mq}, \qquad (1)$$

где Φ_{mp} — собственно антипоток, поскольку ориентирован встречно направлению потока ХХ. Здесь и далее верхний индекс (в данном случае: КЗ внеш) показывает, какая из обмоток подвергнута короткому замыканию. Через m обозначена точка, разделяющая общий поток Φ_{mq} и собственно антипоток Φ_{mp}. Остальные потоки, пересекающие ось y, при $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$ пренебрежимо малы. Таким образом, *сечение средней части стыка* двустержневого трансформатора является *аналогом сечения в средней* (*по высоте*) *части бокового ярма* броневого трансформатора.

Сказанное подтверждается испытаниями, проведенными на двухстержневом трансформаторе ОСМ1–2,5 УЗ, высота обмоток которого совпадает с высотой окна (рис. 2, *а*). Внутренней является обмотка на 380 В, а внешней — на 220 В. Устройство позволяет намотать измерительные витки на среднюю часть стыкового ярма, как показано на рис. 2, *а*, не демонтируя трансформатор.

Используется измерительная схема с двухлучевым осциллографом, описанная в [5]. Вначале на осциллограф подаются опорное напряжение от сети и напряжение от измерительных витков в режиме ХХ, т. е. при питании 380-вольтовой обмотки при отключенной внешней 220-вольтовой обмотке. Синусоиды обоих сигналов совмещаются. После закорачивания 220-вольтовой обмотки получаем осциллограмму (рис. 2, *б*), которая показывает, что сигнал с измерительных витков, а вместе с ним и магнитный поток в стыке, поменял фазу практически на 180 градусов. Таким образом осциллограмма (рис. 2, *б*) подтверждает образование антипотока в стыке с амплитудой $\Phi_{m\,\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$. Отношение амплитуд синусоид (рис. 2,*б*) определяет коэффициент магнитного состояния стыка при КЗ:

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -\frac{\Phi_{m\,\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} = -0,262, \qquad (2)$$

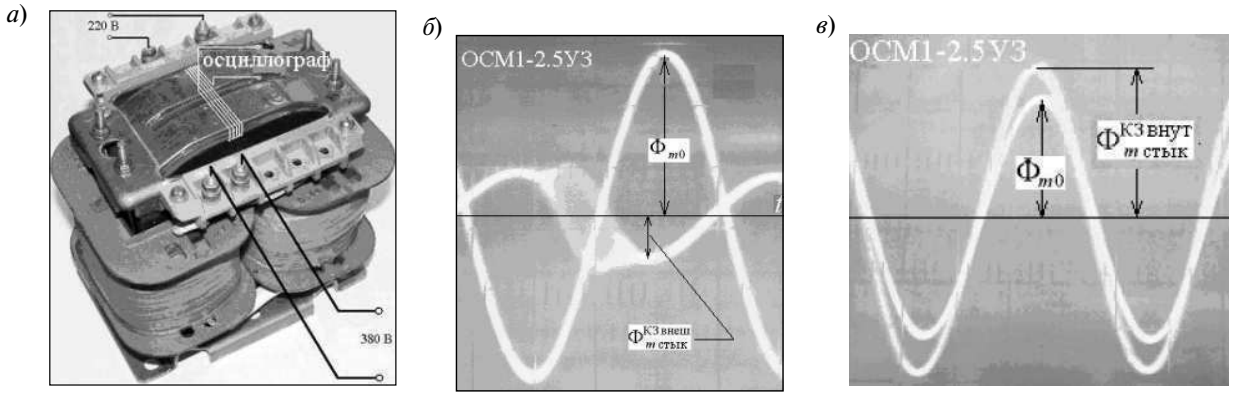


Рис. 2. Трансформатор ОСМ1–2,5 УЗ с измерительными витками, охватывающими его стык, (*а*) и осциллограммы потоков в его стыке при КЗ внешней обмотки (*б*) и внутренней обмотки (*в*)

что весьма близко к теоретическому его значению, вычисляемому по формуле

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -\frac{b}{2a+6\delta+2b}. \qquad (3)$$

Смысл обозначений (a, δ, b) пояснен на рис. 1. Полагая, что в трансформаторе ОСМ1–2,5 УЗ

$$a = b; \quad \delta = 0, \qquad (4)$$

получаем

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -0,25. \qquad (5)$$

Отличие рассчитанного коэффициента (5) от экспериментального (2) составляет менее 5 %.

Согласно рис. 1, *а* сверхпоток $\Phi_{m\,\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}$ должен наблюдаться в стержне. Формула для коэффициента магнитного состояния стержня при КЗ имеет вид

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = \frac{\Phi_{m\,\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} = 1 + \frac{a}{2a+6\delta+2b}, \qquad (6)$$

что с учетом (4) дает

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = 1,25. \qquad (7)$$

Примечание 2. Для подтверждения этого результата необходим эксперимент с использованием измерительных витков на стержне. Для их установки требуется разборка трансформатора, что нетрудно реализовать в лабораторных условиях электротехнических отделений любого вуза.

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки. Картины распределения магнитных потоков при КЗ внутренней обмотки двухстержневого трансформатора настолько сложны, что вряд ли доступны даже для качественного предсказания. По-видимому, впервые они получены в [6] (рис. 3, *а*). Картина потоков при КЗ для броневого трансформатора (рис. 3, *б*) взята из работы [4].

Из сравнения полей на рис. 3 следует, что, как и в броневом, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внутренней обмотки наблюдается следующее:

в стержнях возникают антипотоки. Весьма неожиданно то, что этот антипоток в двухстержневом трансформаторе замыкается через левые половинки обмоток, находящиеся вне окна трансформатора;

общий поток в стали отсутствует;

магнитные силовые линии поля в окне параллельны осям обмоток; в области левых половинок обмоток это условие выполняется приближенно в их средних по высоте частях;

имеет место сверхпоток, но в двухстержневом трансформаторе он возникает в средней части стыка в результате объединения в точке m потоков от левых и правых половинок обмоток (явление, не поддающееся умозрительному предсказанию).

Таким образом, подтверждается отмеченное выше наблюдение: сечение средней части стыка двухстержневого трансформатора играет роль сечения в средней (по высоте) части бокового ярма броневого трансформатора. Возникновение сверхпотока в среднем сечении стыка подтверждается экспериментально осциллограммой

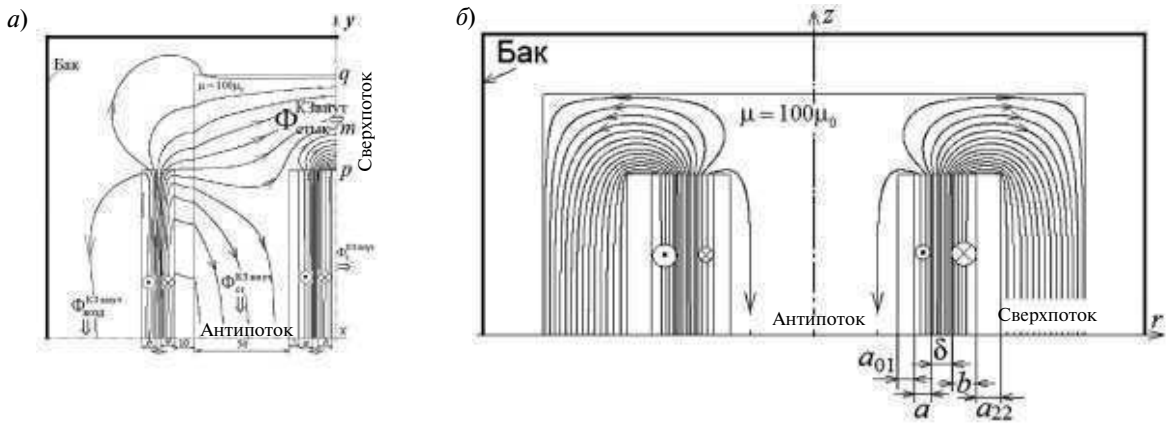


Рис. 3. Сравнение магнитных полей при КЗ внутренней обмотки двухстержневого (*а*) и броневого (*б*) трансформаторов с высотами обмоток равных высоте окна

рис. 2,*в*, из которой следует, что коэффициент магнитного состояния стыка при КЗ

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = \frac{\Phi_{m\,\text{стык}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = 1{,}257\,, \qquad (8)$$

что весьма близко к теоретическому его значению, вычисляемому по формуле

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = 1 + \frac{b}{2a + 6\delta + 2b}\,. \qquad (9)$$

Подстановка сюда данных из (4) дает

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = 1{,}25\,, \qquad (10)$$

что практически не отличается от экспериментального значения (8).

Согласно рис. 2, *а* в стержне при КЗ должен наблюдаться антипоток. Коэффициент магнитного состояния стержня определяется по формуле

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = -\frac{\Phi_{m\,\text{ст}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = -\frac{a}{2a + 6\delta + 2b}\,, \qquad (11)$$

то есть с учетом (4) дает

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = -0{,}25\,. \qquad (12)$$

Экспериментальное подтверждение (11) и (12) связано с реализацией Примечания 2.

Примечание 3. Соотношения (3), (6), (9) и (11) повторяют формулы для броневого трансформатора [2]. При этом принималась во внимание возможность отождествления сечения стыка двухстержневого трансформатора с сечением бокового ярма броневого трансформатора. Между тем выражения (6) и (11) для оценки потоков в стержнях при КЗ в двустороннем трансформаторе применялись и ранее в [7] с использованием упрощенных картин поля (см. Примечание 1). Однако антипоток и сверхпоток в стыке при КЗ в [7] обнаружены не были. Отчасти, как будет показано ниже, это можно объяснить исключением из рассмотрения в [7] моделей трансформаторов с высотой обмоток $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$.

Часть 2. Трансформатор с высотой обмоток $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$

В отличие от маломощных, в силовых трансформаторах в силу целого ряда технологических причин высота обмоток $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$. Модель такого трансформатора, собранная на основе описанного в учебном пособии [9] устройства с О-образным раздвижным железным сердечником, представлена на рис. 4. Сердечник имеет прямоугольное поперечное сечение, его площадь $s_{\text{Fe}} = 5 \times 5{,}7 = 28,5$ см^2. Все размеры на рис. 4 приведены в мм. Показано последовательное соединение катушек внутренней обмотки. Ее общее число витков $w_1 = 330$. Аналогичным образом соединены катушки внешней обмотки; число ее витков $w_2 = w_1 = 330$. Коэффициент трансформации $n = w_1 / w_2 = 1$.

Соотношение между высотами обмотки и окна

$$\frac{h_{\text{окн}}}{h_{\text{обм}}} = 0{,}888\,. \qquad (13)$$

Поперечные размеры (рис. 4) были использованы в [6] для расчета *плоскопараллельных* магнитных полей при КЗ бесконечно протяженного

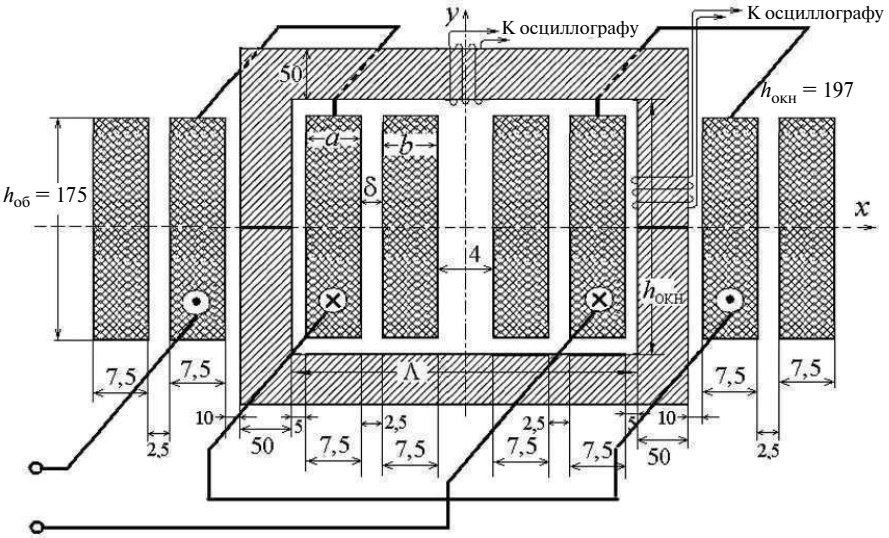


Рис. 4. Двустержневой трансформатор с высотой обмоток $h_{обм} < h_{окн}$

в направлении оси *z* трансформатора. Полученные при этом картины магнитных потоков легли в основу их опытных измерений с помощью специальных витков, намотанных на стык и на сердечник, как показано на рис. 4. Измерения проводились на частотах $500-1000$ Гц.

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внешней обмотки

Типовые картины распределения магнитных потоков при КЗ внешней обмотки приведены на рис. 5. Плоскопараллельная картина поля (рис. 5, *а*) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 5, *б*) — из работы [4].

Как видно, в отношении возникновения *сверхпотоков в стержнях* в обоих случаях наблюдаются те же картины, что и на рис. 1, *а* и *б*. Это также подтверждается осциллограммой (рис. 6, *а*) для трансформатора (рис. 4), из которой находим коэффициент магнитного состояния

$$k_{ст}^{КЗ\ внеш} = \frac{\Phi_{m\,ст}^{КЗ\ внеш}}{\Phi_0} = 1{,}5\,. \qquad (14)$$

Согласно (6) эта величина, даже если принять зазор $\delta = 0$, получается равной

$$k_{ст}^{КЗ\ внеш} = 1 + \frac{7{,}5}{2\cdot 7{,}5 + 6\cdot 0 + 2\cdot 7{,}5} = 1{,}25\,, \qquad (15)$$

что близко к значению $k_{ст}^{КЗ\ внеш} = 1{,}223$, получаемому непосредственно из картины поля (рис. 5, *а*). Однако значение (15) существенно меньше экспериментального результата (14).

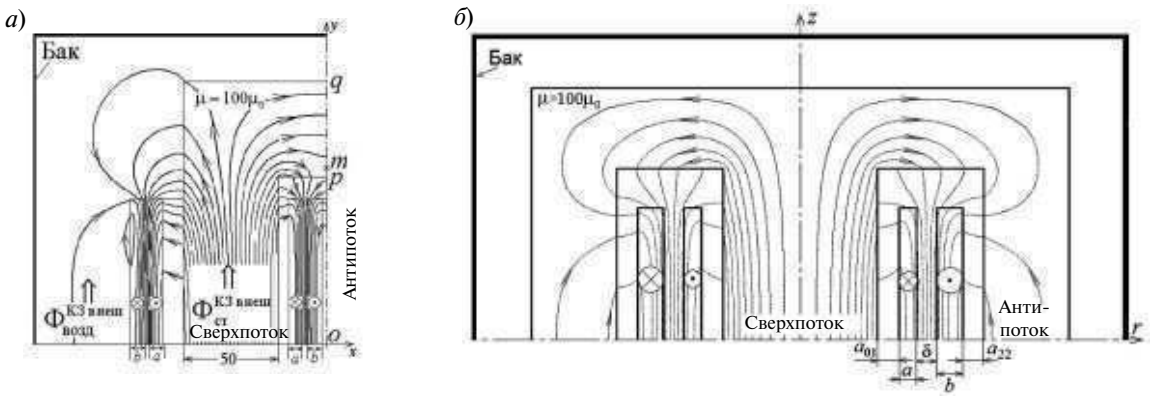


Рис. 5. Сравнение магнитных полей при КЗ внешней обмотки двухстержневого (*а*) и броневого (*б*) трансформаторов с высотами обмоток $h_{обм} < h_{окн}$

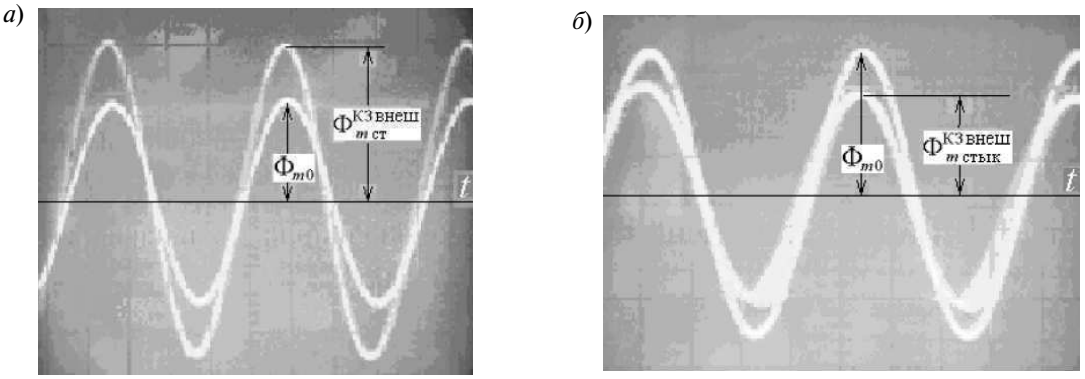


Рис. 6. Осциллограммы потоков в стержне (*а*) и в стыке (*б*) двустержневого трансформатора с высотами обмоток $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$ при КЗ его внешней обмотки

Объяснить это расхождения в рамках данной работы не удается.

Вне стержня картины полей на рис. 1 и рис. 5 существенно различаются. Особенность поля в броневом трансформаторе (рис. 5, *б*) состоит в том, что часть потока стержня *проникает* за края бокового ярма (чего не было при $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$ (см. рис. 1, *б*)). Тем не менее в средней части стали бокового ярма по-прежнему имеет место антипоток, и он может быть измерен с помощью витков, намотанных на эту часть бокового ярма [5].

Картина поля в двухстержневом трансформаторе (рис. 5, *а*) значительно сложнее. Ее сравнение с полем на рис. 1, *а* показывает, что точка m, разделяющая общий поток Φ_{mq} и собственно антипоток Φ_{mp} в стали стыка, смещена к граничной точке p между окном и стыком. И, следовательно, при $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$ может оказаться, что магнитный поток в стыке

$$\Phi^{\text{КЗ внеш}}_{\text{стык}} = \Phi_{mp} - \Phi_{mq} > 0\,, \qquad (16)$$

т. е. вместо антипотока в стыке при КЗ внешней обмотки будет протекать попросту уменьшенный поток ХХ Это полностью объясняет, почему (в отличие от осциллограммы на рис. 1, *б*) на осциллограмме рис. 6, *б* антипоток не наблюдается, и коэффициент (2) следует записать в виде

$$k^{\text{КЗ внеш}}_{\text{стык}} = \frac{\Phi^{\text{КЗ внеш}}_{m\,\text{стык}}}{\Phi_0} = 0{,}69\,, \qquad (17)$$

т. е. положительным числом. Также положительным этот коэффициент получается и из анализа картины поля на рис. 5, *б* ($k^{\text{КЗ внеш}}_{\text{стык}} = 0{,}187$). Чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе точка ветвления потоков *m* к точке *p* на границе окна и стыкового ярма. А это означает, что в эксперименте с измерительными витками, охватывающими середину стыкового ярма, антипоток не выявится, потому что там при $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$ он либо очень слабый, либо практически отсутствует. Это объясняет, почему в экспериментах на моделях силовых двухстержневых трансформаторов, описанных в [7], ни разу не были выявлены антипотоки в стыковом ярме.

Примечание 4. Как отмечалось в [6], картины всех магнитных полей для двухстержневых трансформаторов (включая картины на рис. 1, *а*; 3, *а* и 5, *а*) согласуются с очевидным положением, что отбрасываемая при их построении часть трансформатора, расположенная справа от оси *y*, может быть заменена условным идеальным боковым ярмом с $\mu = \infty$. Но в этом случае все магнитные потоки, пронизывающие ось *y*, пройдут через среднее поперечное (на оси *x*) сечение этого идеального ярма, образуя *обобщенный стыковой антипоток*

$$\Phi^{\text{КЗ внеш}}_{\text{общ. стык}} = \Phi_{mq} - \Phi_{mp} - \Phi_{op} \qquad (18)$$

подобно тому, как образуется антипоток в середине бокового ярма в броневом трансформаторе. Все потоки в (18) берутся положительными, а знаки перед ними — с учетом направления пересечения ими оси *y*. Согласно картине поля на рис. 5, *а* имеем

$$k^{\text{КЗ внеш}}_{\text{общ. стык}} = -\frac{\Phi^{\text{КЗ внеш}}_{\text{общ. стык}}}{\Phi_0} = k^{\text{КЗ внеш}}_{\text{стык}} - \frac{\Phi_{op}}{\Phi_0} =$$

$$= 0{,}187 - 0{,}2913 = -0{,}1043\,. \qquad (19)$$

Обобщенный стык совпадает с плоскостью *y*, *z*, на которой соприкасаются (стыкуются) левая и правая (отброшенная на рис. 5, *а*) части трансформатора.

Чтобы «поймать» обобщенный стыковой антипоток в эксперименте, следует охватить измерительными витками одновременно со стыком прилегающую к нему половину воздушного промежутка *ор* между внешними обмотками в окне трансформатора.

Сверх- и антипотоки в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки. На рис. 7 приведены типовые картины распределения магнитных потоков при КЗ внутренней обмотки. Плоскопараллельная картина поля (см. рис. 7, *а*) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 7, *б*) — из работы [4].

В отношении *антипотоков в стержнях* в обоих случаях наблюдаются те же картины, что и на рис. 3, *а* и *б*. Это также подтверждается осциллограммой (рис. 8, *а*) для трансформатора (рис. 4), из которой находим коэффициент магнитного состояния

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = \frac{\Phi_{m\,\text{ст}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = -0{,}5\,. \qquad (20)$$

Согласно (11) эта величина, даже если принять зазор $\delta = 0$, оказывается равной

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = -\frac{7{,}5}{2\cdot 7{,}5 + 6\cdot 0 + 2\cdot 7{,}5} = -0{,}25\,, \quad (21)$$

что близко к значению $k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = -0{,}219$, получаемому непосредственно из картины поля (см. рис. 7, *а*). Значение (21) вдвое меньше экспериментального результата (20), что в рамках данной работы объяснить не удается.

Примечание 5. Не исключено, что значительные расхождения между (20) и (21), а также между (14) и (15) обусловлены тем, что экспериментальные величины (14) и (20) получены при испытаниях реальных *трехмерных* устройств, тогда как (15) и (21) посчитаны по формулам (6) и (11) для *двухмерных* устройств. Кроме того, строго говоря, (6) и (11) были выведены не для двухстержневых, а для броневых трансформаторов с высотой обмоток $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$.

В отличие от картины поля на рис. 3, *а* значительная часть потока внешней обмотки на картине поля рис. 7, *а* протекает мимо стали. Поэтому вместо сверхпотока в стыке на рис. 7,*а* протекает просто уменьшенный поток ХХ, что и подтверждается осциллограммой (рис. 8, *б*), согласно которой

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = \frac{\Phi_{m\,\text{стык}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = 0{,}18\,. \qquad (22)$$

Непосредственно из картины поля на рис. 7, *а* имеем $k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = 0{,}786$. Сказанное объясняет, почему в экспериментах на моделях силовых двухстержневых трансформаторов, описанных в [7], также не выявлен ни один случай образования при КЗ свехпотока в стыковом ярме.

Примечание 6. Как следует из картины поля на рис. 7, *б*, сверхпоток в средней части бокового ярма броневого трансформатора образуется в результате объединения трубок поля, спускающихся сверху и проникающих в боковое ярмо сбоку от внешней обмотки. Принимая во внимание Примечание 4, приходим к выводу, что аналогом этому сверхпотоку является обобщенный стыковой сверхпоток при КЗ двухстержневого трансформатора, равный

$$\Phi_{\text{общ. стык}}^{\text{КЗ внут}} = \Phi_{mq} + \Phi_{mp} + \Phi_{op}\,. \qquad (23)$$

Здесь все слагаемые взяты со знаком плюс, как одинаково ориентированные в направлении оси *x*. В результате по картине поля на рис. 7, *а* получаем

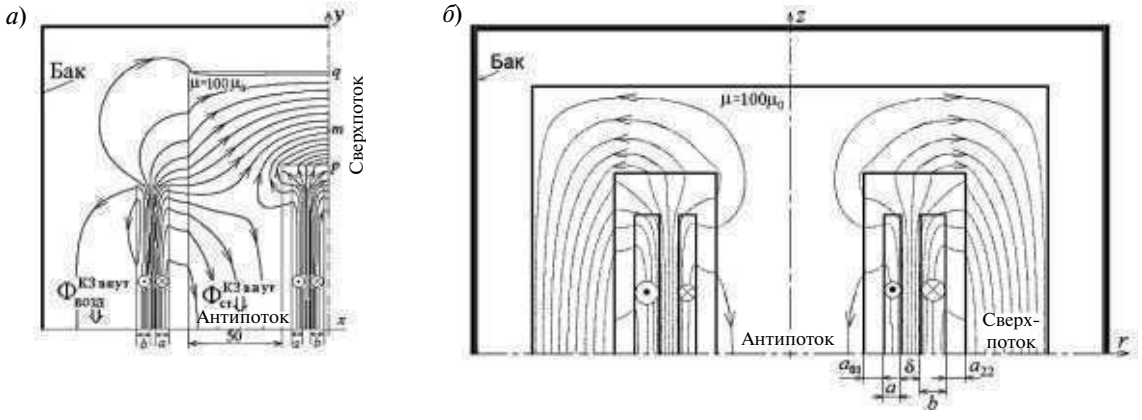


Рис. 7. Сравнение магнитных полей при КЗ внутренней обмотки двухстержневого (*а*) и броневого (*б*) трансформаторов с высотами обмоток $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$

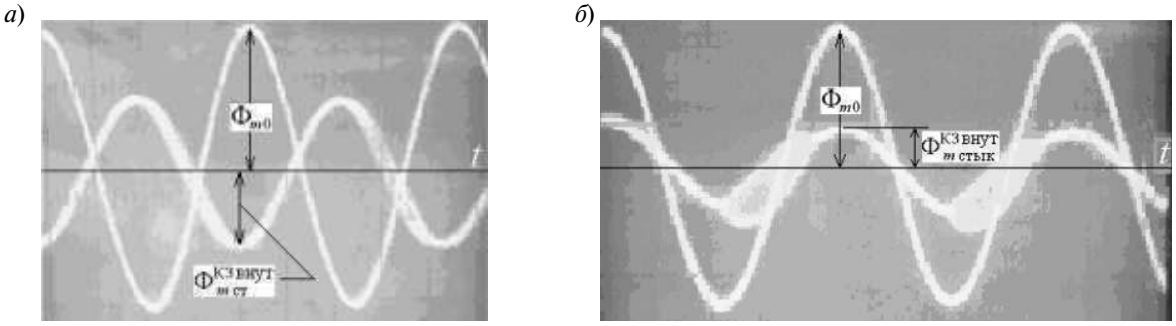


Рис. 8. Осциллограммы потоков в стержне (*а*) и в стыке (*б*) двустержневого трансформатора с высотами обмоток $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$ при КЗ его внутренней обмотки

$$k^{\text{КЗ внут}}_{\text{общ. стык}} = \frac{\Phi^{\text{КЗ внут}}_{\text{общ. стык}}}{\Phi_0} = k^{\text{КЗ внут}}_{\text{стык}} + \frac{\Phi_{op}}{\Phi_0} =$$

$$= 0{,}786 + 0{,}3198 = 1{,}1058. \qquad (24)$$

Способ экспериментальной проверки возникновения обобщенного стыкового сверхпотока при КЗ двухстержневого трансформатора с помощью измерительных витков описан в конце Примечания 4.

Экспериментально подтверждено, что в двухстержневом трансформаторе с высотой обмоток, равных высоте окна, при коротких замыканиях одновременно возникают сверх- и антипотоки. Эти потоки протекают в средних сечениях стальных стержней и стыковых ярем.

Это утверждение сохраняет силу и в случае, когда высоты обмоток меньше высоты окна, если вместо потока через стальное стыковое ярмо рассматривать суммарный поток через стыковую плоскость, разделяющую двухстержневой трансформатор на две симметричные части, каждая из которых содержит по стержню.

Приведенные экспериментальные результаты важны для постановки новых опытов с целью разработки приемлемой схемы замещения силовых двухстержневых трансформаторов и ее использования для исследования аномальных процессов при внезапных коротких замыканиях в энергосетях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, Г.Н.** Трансформаторы и реакторы: новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 204 с.

2. **Шакиров, М.А**. 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2010. № 5.— С. 19–36.

3. Теоретические основы электротехники. Том. 1. [Текст] / Под ред. проф. П.А. Ионкина..— М.: Высшая школа, 1976.— 544 с.

4. **Шакиров, М.А**. Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов, Дуань Лиюн // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №1(95).— С. 107–120.

5. **Шакиров, М.А**. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиюн // Электричество.— 2010. № 3.— С. 55–63.

6. **Шакиров, М.А**. Картины аномальных магнитных потоков при коротких замыканиях в двустержневых трансформаторах [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 4(183).— С. 61–77.

7. **Григоров, И.Б.** Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом потока рассеяния [Текст] / И.Б. Григоров // Электротехника.— 1975. № 4.

8. **Шакиров, М.А.** Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2005. №11. С. 15–17.

9. **Калантаров, П.Л.** Руководство к лаборатории переменных токов. Ч. 1 [Текст] / П.Л. Калантаров.— М.: Госэнергоиздат, 1949.— 188 с.

REFERENCES

1. **Aleksandrov G.N., Shakirov M.A.** Transformatory i reaktory: novye idei i printsipy [Tekst].— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006.— 204 s. (rus.)

2. **Shakirov M.A.** 2T-obraznye skhemy zameshcheniia transformatorov [Tekst]. Elektrichestvo.— 2010. № 5.— S. 19–36. (rus.)

3. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Tom. 1 [Tekst] / Pod red. prof. P.A. Ionkina. M.: Vysshaia shkola, 1976.— 544 s. (rus.)

4. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V., Duan' Liiun.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov v bronevykh transformatorakh pri korotkikh zamykaniiakh [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №1(95).— S. 107–120. (rus.)

5. **Shakirov M.A., Andrushchuk V.V., Duan' Liiun.** Anomal'nye magnitnye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom zamykanii [Tekst]// Elektrichestvo.— 2010. № 3.— S. 55–63. (rus.)

6. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov pri korotkikh zamykaniiakh v dvusterzhnevykh transformatorakh [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. № 4(183).— S. 61–77. (rus.)

7. **Grigorov I.B.** Potoki v magnitoprovodakh moshchnykh silovykh transformatorov i avtotransformatorov s uchetom potoka rasseianiia [Tekst] // Elektrotekhnika.— 1975. № 4. (rus.)

8. **Shakirov M.A.** Analiz neravnomernosti raspredeleniia magnitnykh nagruzok v transformatorakh na osnove magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniia [Tekst] // Elektrichestvo.— 2005. №11.— S. 15–27. (rus.)

9. **Kalantarov, P.L.** Rukovodstvo k laboratorii pere-mennykh tokov. Ch.1 [Tekst].— M.: Gosenergoizdat, 1949.— 188 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШАКИРОВ Мансур Акмелович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; действительный член Академии электротехнических наук; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: manshak@mail.ru

АНДРУЩУК Виктор Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия;

AUTHORS

SHAKIROV Mansur A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: manshak@mail.ru

ANDRUSHCHUK Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia;

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.7

А.А. Попович, Н.Г. Разумов, Т.А. Попович,
О.В. Никифорова, П.А. Новиков

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СПЛАВОВ В СИСТЕМЕ Fe-36Ni

A.A. Popovich, N.G. Razumov, T.A. Popovich,
O.V. Nikiforova, P.A. Novikov

DEVELOPMENT OF Fe-36Ni POWDER PROCESSED BY MECHANICAL ALLOYING

Твердофазные процессы, инициируемые механическим воздействием, перспективны для использования в технике, особенно в области создания новых материалов, которые более экологически безопасны и экономически выгодны по сравнению с существующими. В работе изучены процесс фазообразования и кинетика растворения никеля в железе в ходе механохимического синтеза в системе Fe-36Ni. Установлено, что за счет интенсивной пластической деформации материала при механохимическом синтезе происходит растворение и равномерное распределение никеля в объеме α-Fe, вызывающее перестроение решетки из ОЦК в ГЦК.

ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВЫЙ СПЛАВ. ИНВАР. МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. АУСТЕНИТ.

In recent years solid-state processes that are initiated by mechanical action, have been the subject of intensive research. Apparently, this is due with the prospects of using such reactions in the art, especially in the field of new materials that are more environmentally friendly and cost-effective compared with existing ones. The present work shows the research results of process phase formation and the kinetics of dissolution of nickel in iron during mechanochemical synthesis in the system Fe-36Ni. Is established that by intensive plastic material deformation occurs at mechanochemical synthesis dissolution and uniform distribution of nickel in the volume α-Fe, causes evolution of the bcc lattice to hcc.

IRON NICKEL ALLOY. INVAR. MECHANICALL ALLOYING. AUSTENITE.

В конце XIX века французский исследователь Ч. Гийом [1] обнаружил в системе «железо — никель» сплавы, у которых тепловое расширением на целый порядок ниже расширения составляющих компонентов. Такой сплав был открыт Гийомом в 1886 году и назван инваром из-за очень низкого температурного коэффициента теплового линейного расширения α. Аномалия свойств, связанная с инварным эффектом, используется при разработке сплавов с заданным значением α. Сплавы инварного класса имеют аномалии большинства физических свойств [2]. Эти особенности инварных сплавов позволяют создавать материалы с уникальными характеристиками. Необычный характер изменения свойств в сплавах на основе системы «железо — никель» широко используется в различных отраслях промышленности. В метрологии, криогенной, радиоэлектронной технике и геодезии часто не могут обойтись без сплавов со значениями α менее $2 \cdot 10^{-6}$ К.

Распространенные методы получения инвара (двойной электрошлаковый переплав, вакуумно-индукционная плавка) предполагают использование сложного оборудования. Кроме того, ввиду высоких температур, необходимых

для плавления инвара, практически неизбежно получение крупнозернистых материалов, обладающих низкими механическими свойствами. Поскольку зерно в аустенитных сталях не может быть измельчено термической обработкой, требуется многократная обработка давлением, что приводит к увеличению длительности технологического цикла, повышению расхода энергии и удорожанию материала.

Принципиально новый способ получения инвара — технология механохимического синтеза. В последнее время твердофазные процессы, инициируемые механическим воздействием, стали предметом интенсивных исследований. По-видимому, это связано с перспективами использования таких реакций в технике, особенно в области создания новых материалов, которые более экологически безопасны и экономически выгодны по сравнению с существующими [3–5].

Широкие возможности механохимии как химии нетепловых низкотемпературных реакций иллюстрирует тот факт, что в твердой фазе без растворения или плавления реагентов были синтезированы тугоплавкие вещества и интерметаллиды, неорганические и органические соединения, молекулярные комплексы, модифицированы полимеры и фармацевтические препараты, созданы композиционные материалы. Механохимические синтезы осуществляются при сравнительно низкой температуре, когда формирование совершенной кристаллической структуры затруднено. Это открывает путь к синтезу веществ и материалов в нанокристаллическом и аморфном состояниях. Нанокристаллические материалы привлекают внимание исследователей количественным, а иногда и качественным отличием их свойств от свойств обычно используемых крупнокристаллических материалов [6, 7]. В этом случае синтез сплава происходит в процессе механоактивации исходных компонентов в защитной атмосфере.

Цель данной работы — изучение фазообразования и кинетики процесса растворения никеля в железе в ходе механохимического синтеза в системе Fe-36Ni.

Механохимический синтез исследуемых порошков проводили в герметичном механореакторе высокоэнергонапряженной вибромельницы в среде аргона по методике, описанной в работах [8, 9]. В качестве исходных компонентов использовали порошки железа (ПЖ-2М) и электролитического никеля с размером частиц порошка не более 100 мкм. Отношение массы загружаемого порошка к массе шаров составляет от 1:20. Время размола — от 15 мин до 3 часов.

Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (Германия) в CuKα-излучении по стандартной методике (U = 40 кВ, I = 40 мА). Тонкую структуру сплавов

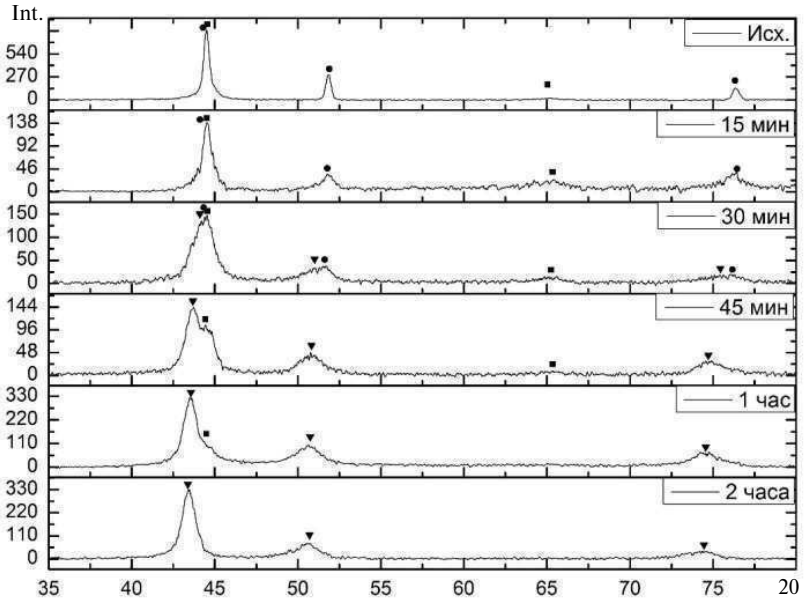


Рис. 1. Изменение фазового состава порошка в ходе процесса механолегирования (■ — α-Fe; ● — Ni; ▼ — ψ-Fe)

изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения Technai S-Twin G230. Структуру и распределение элементов по частице изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 Tescan с приставкой Oxford INCA Wave 500.

На рис. 1 показано изменение фазового состава исходного порошка в ходе процесса механолегирования. На первой рентгенограмме приведен фазовый состав исходного порошка композиции Fe-36Ni; на ней видны четкие пики α-Fe и Ni. С началом процесса механохимического синтеза никель начинает растворяться в решетке α-железа (табл. 1) и, соответственно, интенсивность его пиков на рентгенограмме уменьшается. С увеличением времени механоактивации до 30 минут количество нерастворившегося никеля продолжает снижаться и начинается перестроение решетки из ОЦК в ГЦК (рис. 3, табл. 1). Стоит отметить, что перестроение решетки происходит без нагрева, а образовывающаяся γ-фаза имеет нанометрические размеры. При дальнейшем увеличении времени механоактивации никель полностью растворяется в железе, доля γ-фазы увеличивается, а доля α-фазы соответственно уменьшается (рис. 1, 2). После 2 часов механохимичесого синтеза доля γ-фазы составляет практически 100 %.

На рис. 3 показано распределение элементов в исходной композиции Fe-36Ni, представляющей собой механическую смесь порошков Ni и Fe. На рис. 4, 5 показана кинетика растворения никеля в решетке α-Fe. Растворение никеля происходит за счет интенсивной пластической деформации материала при механохимическом синтезе. Особенность механохимического синтеза — очень высокие значения коэффициентов диффузии атомов (ионов) компонентов в твердой

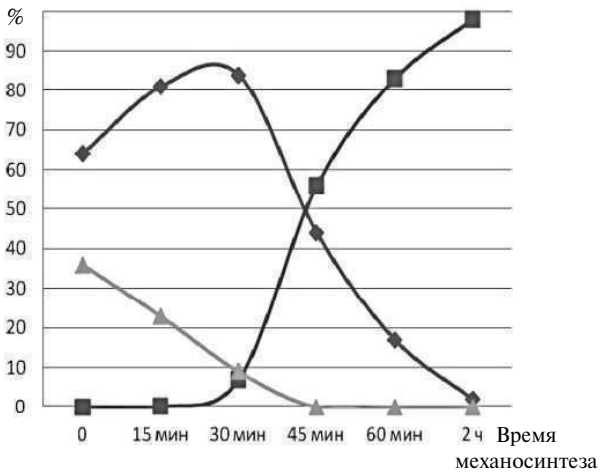


Рис. 2. Изменение процентного содержания фаз (— α-Fe; — Ni; — ψ-Fe)

фазе [10]. В отличие от обычной диффузии, определяемой градиентами концентраций компонентов, этот вид диффузии получил специальное название «деформационного атомного перемешивания», или «баллистической диффузии». Необратимые изменения формы и размеров твердого тела при пластической деформации неизбежно сопровождаются перемещениями в его объеме атомов друг относительно друга. При этом часто преобладают эстафетные механизмы миграции структурных дефектов. Рис. 4, 5 демонстрируют, что с началом процесса механохимического синтеза происходит «слипание» частиц порошка никеля и α-Fe, после чего начинается процесс перемешивания и растворения никеля (это было подтверждено и рентгенофазовым анализом). На снимках (рис. 4) видно, что в частице порошка существуют зоны, свободные от никеля, с увеличением времени механохимического синтеза происходит выравнивание

Изменение процентного содержания компонентов и параметра решетки фаз в ходе процесса механолегирования

Длительность воздействия	α-Fe		γ-Fe		Ni	
	%	нм	%	нм	%	нм
0	64,0	1000,0	0,0	0,0	36,0	1000,0
15 мин	81,0	25,0	0,1	0,3	23,0	20,0
30 мин	84,0	14,0	7,0	0,5	9,0	8,0
45 мин	44,0	12,0	56,0	2,5	0	0
60 мин	17,0	10,0	83,0	5,0	0	0
2 ч	2,0	7,0	98,0	6,0	0	0

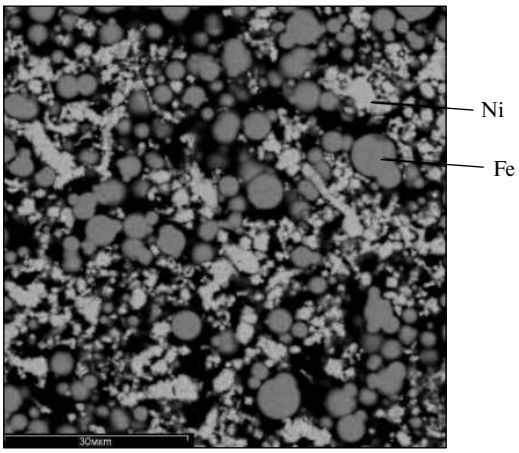


Рис. 3. Изображение исходной композиции порошков в системе Fe-36Ni

распределения никеля по объему частиц порошка (рис. 5).

Исследования тонкой кристаллической структуры на высокоразрешающем просвечивающем электронном микроскопе позволили получить более подробные данные о строении и размерах нанокристаллов в исследуемом сплаве. На рис. 3 показана типичная нанокристаллическая структура механолегированного сплава системы Fe-36Ni. Из снимков видно, что размеры нанокристаллов находятся в диапазоне от 6 до 20 нм. Согласно результатам рентгенофазового анализа данного сплава, проведенного с помощью Bruker D8 ADVANCE, размеры нанокристаллов находятся в диапазоне от 6 до 26 нм (см. табл. 1). Анализ изображения показал, что нанокристаллы имеют ГЦК-решетку с параметром решетки $a = 0{,}36$ нм. При изучении границ нанокристаллов при большем увеличении удалось увидеть, что на них скопилось много дислокаций, но атомные плоскости частично когерентны.

В работе были изучены процесс фазообразования и кинетика растворения никеля в железе в ходе механохимического синтеза в системе Fe-

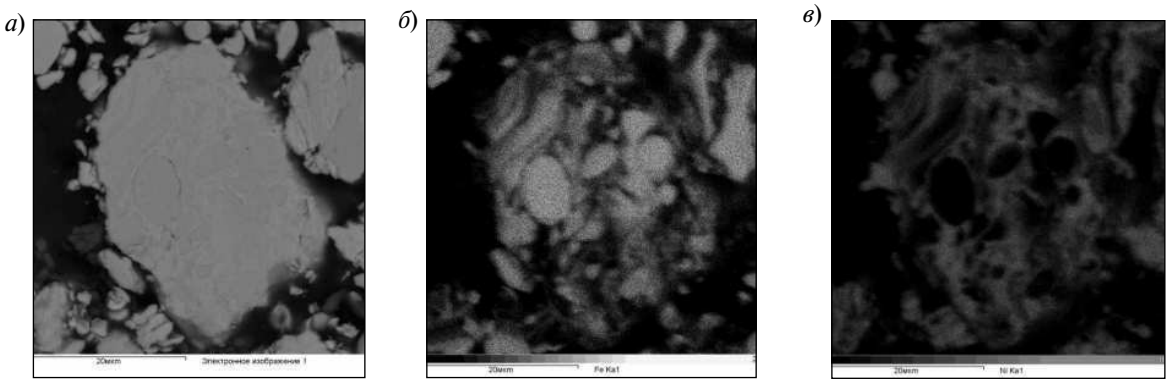


Рис. 4. Изображение частицы порошка после 15 минут механохимического синтеза: *а*) частица; *б*) распределение Fe по частице порошка; *в*) распределение Ni по частице порошка

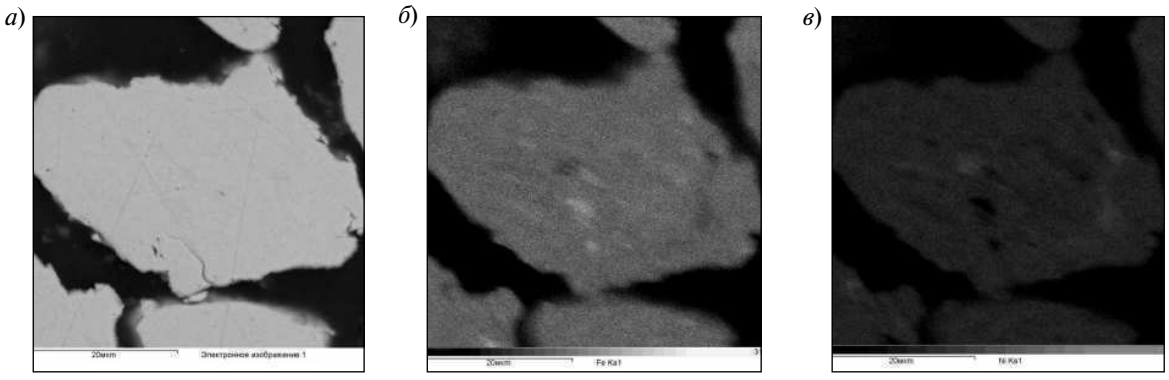


Рис. 5. Изображение частицы порошка после 45 минут механохимического синтеза: *а*) частица; *б*) распределение Fe по частице порошка; *в*) распределение Ni по частице порошка

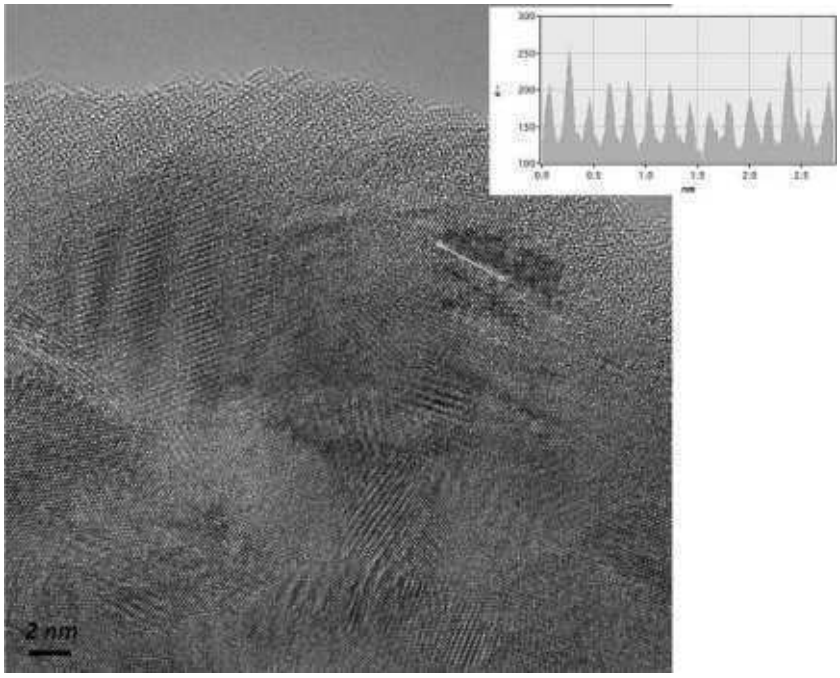


Рис. 6. Нанокристаллическая структура сплава Fe-36Ni после 2 часов механохимического синтеза

36Ni. Установлено, что за счет интенсивной пластической деформации материала при механохимическом синтезе происходит растворение и равномерное распределение никеля в объеме α-Fe, вызывающее перестроение решетки из ОЦК в ГЦК. Стоит отметить, что перестроение решетки происходит без нагрева, а образовывающаяся γ-фаза имеет нанометрические размеры, что подтверждается результатами исследований на просвечивающем электронном микроскопе.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактам № 14.B37.21.0443 на выполнение научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Седов, В.Л.** Антиферромагнетизм гамма-железа. Проблема инвара [Текст] / В.Л. Седов.— М.: Наука, 1987.— 288 с.

2. **Мулюков, Р.Р.** Влияние наноструктурирования на фазовый состав и намагниченность насыщения инварного сплава Fe-36 %Ni [Текст] / Р.Р. Мулюков, И.Х. Биткулов, К.А. Букреева // Письма о материалах.— 2011. Т. 1, вып. 1. — С. 70–72.

3. **Авакумов, Е.Г.** Механические методы активации химических процессов [Текст] / Е.Г. Авакумов.— Новосибирск: Наука, 1986.

4. **Болдырев, В.В.** Механохимия и механическая активация твердых веществ [Текст] / В.В. Болдырев // Успехи химии.— 2006. Т. 75, № 3.— С. 203–216.

5. **Бутягин, П.Ю.** Проблемы и перспективы механохимии [Текст] / П.Ю. Бутягин // Успехи химии.— 1994. Т. 63.— С. 1031–1043.

6. **Валиев, Р.З.** Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства [Текст] // Р.З. Валиев, И.В. Александров.— М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.— 398 с.

7. **Suryanarayana C.** Mechanical alloying and milling [Text] / C. Suryanarayana // Progress in Materials Science.— 2001. № 46.— P. 1–184.

8. **Гюлиханданов, Е.Л.** Механохимический синтез высоколегированных порошковых сплавов системы Fe-Cr-Ni-Mn–N [Текст] / Е.Л. Гюлиханданов, А.А. Попович, Н.Г. Разумов, А.О. Силин // Перспективные материалы.— 2011. № 13.— С. 742–745.

9. **Popovich, A.A.** Development of Fe-Cr-Ni-Mn-N High-Alloyed Powder Processed by Mechanical Alloying

[Electronic resource] [Text] / A.A. Popovich, N.G. Razumov, A.O. Silin, E.L. Gulihandanov // Open Journal of Metal.— 2013. №3.— P. 25–29.— doi:10.4236/ojmetal.2013.32A2004 (Published Online - August 2013).

10. **Бутягин, П.Ю.** Кинетика и энергетический баланс в механохимических превращениях [Текст] / П.Ю. Бутягин, А.Н. Стрелецкий // Физика твердого тела.— 2005. Т. 47, № 5.— С. 830–836.

REFFERENCEC

1. **Sedov V.L.** Antiferromagnetizm gamma-zheleza. Problema invara [Tekst].— M.: Nauka, 1987.— 288 s. (rus.)

2. **Muliukov R.R., Bitkulov I.Kh., Bukreeva K.A.** Vlianie nanostrukturirovaniia na fazovyi sostav i namagnichennost' nasyshcheniia invarnogo splava Fe-36 %Ni [Tekst] // Pis'ma o materialakh.— 2011. T. 1.— S. 70–72. (rus.)

3. **Avvakumov E.G.** Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov [Tekst].— Novosibirsk: Nauka. 1986. (rus.)

4. **Boldyrev V.V.** Mekhanokhimiia i mekhanicheskaia aktivatsiia tverdykh veshchestv [Tekst] // Uspekhi khimii.— 2006. T. 75, № 3.— S. 203–216. (rus.)

5. **Butiagin P.Iu.** Problemy i perspektivy mekhanokhimii [Tekst] // Uspekhi khimii. 1994.— T. 63.— S. 1031–1043. (rus.)

6. **Valiev R.Z. Aleksandrov I.V.** Ob»emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy. Poluchenie, struktura i svoistva [Tekst].— M.: IKTs «Akademkniga», 2007.— 398 s. (rus.)

7. **Suryanarayana C.** Mechanical alloying and milling [Tekst] // Progress in Materials Science.— 2001. № 46.— P. 1–184. (rus.)

8. **Giulikhandanov E.L., Popovich A.A., Razumov N.G., Silin A.O.** Mekhanokhimicheskii sintez vysokolegirovannykh poroshkovykh splavov sistemy Fe-Cr-Ni-Mn–N [Tekst] // Perspektivnye materialy.— 2011. № 13.— S. 742–745. (rus.)

9. **Popovich A.A., Razumov N.G., Silin A.O, Gulihandanov E.L.** Development of Fe-Cr-Ni-Mn-N High-Alloyed Powder Processed by Mechanical Alloying [Electronic resource] // Open Journal of Metal.— 2013. №3.— P. 25–29. doi:10.4236/ojmetal.2013.32A2004 (Published Online - August 2013). (rus.)

10. **Butiagin P.Iu., Streletskii A.N.** Kinetika i energeticheskii balans v mekhanokhimicheskikh prevrashcheniiakh [Tekst] // Fizika tverdogo tela.— 2005. T. 47, № 5.— S. 830–836. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич — доктор технических наук профессор исполнительный директор объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ispdir.onti@spbstu.ru

РАЗУМОВ Николай Геннадьевич — аспирант кафедры технологии и исследования материалов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: n.razumov@inbox.ru

AUTHORS

POPOVICH Anatoly A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ispdir.onti@spbstu.ru

RAZUMOV Nikolay G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: n.razumov@inbox.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 66.546.3

Н.Г. Колбасников, И.А. Шишов,
А.М. Корчагин, А.А. Беляев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РАСКАТА НА ХАРАКТЕР НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТОГО ЛИСТА

N.G. Kolbasnikov, I.A. Shishov,
A.A. Korchagin, A.A. Belyaev

INVESTIGATION OF THE PLATE TEMPERATURE FIELD IRREGULARITY INFLUENCE ON THE METAL STRESS-STRAIN STATE IN THE DEFORMATION ZONE DURING PLATES ROLLING

С помощью методов математического моделирования исследовано влияние температурного градиента по сечению раската и характера распределения температур по высоте раската на напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при прокатке толстого листа. Установлено, что за счет создания определенного температурного градиента можно управлять характером напряженно-деформированного состояния, добиваясь исчезновения растягивающих напряжений в центральной части высокого очага деформации и повышения прорабатываемости центральных слоев металла.

ПРОКАТКА ТОЛСТОГО ЛИСТА. ВЫСОКИЙ ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ. НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The plate cross section temperature gradient and the behavior of plate height temperature distribution influence on the metal stress-strain state in the deformation zone was shown in this work with the help of mathematical modeling methods. It was found, that it is possible to control the behavior of the stress-strain state by creating a certain temperature gradient to avoid the tensile stress in the high deformation zone central part and to reach high strain of central metal layers.

ROLLING OF PLATES. HIGH DEFORMATION ZONE. STRESS-STRAIN STATE. TEMPERATURE FIELD IRREGULARITY. MATHEMATICAL MODELING.

Постановка задачи. Известно [1], что однородность конечной структуры и механических свойств по толщине готового толстолистового проката в значительной мере определяются характером напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в очаге деформации при прокатке. В зависимости от характера распределения деформаций по высоте полосы различают низкие, средние и высокие очаги деформации [2]. Формальным признаком, по которому определяют высоту очага деформации при прокатке, является значение критерия $l/h_{ср}$, где l — длина дуги захвата, $h_{ср}$ — средняя высота очага деформации [2].

При назначении режимов прокатки толстого листа из трубных марок стали технологи вынуждены ограничивать относительные обжатия в черновых проходах из-за возможности превышения допустимых значений энергосиловых параметров. Черновую прокатку зачастую ведут так, что практически всегда выполняется соотношение $l/h_{ср} < 1$, что позволяет назвать очаг деформации высоким [2].

Высокий очаг деформации характеризуется крайне неравномерным распределением напряжений, степеней и скоростей деформации по высоте раската, поскольку деформация не про-

никает на всю глубину сечения, как это показано на рис. 1 [3]. Это обусловливает существование зон активной и пассивной деформации. При этом в зонах активной деформации металл деформируется непосредственно от действия валков, в зонах же пассивной деформации металл вынужден вытягиваться вдоль направления прокатки под действием активных зон в силу выполнения условия неразрывности деформации. Характер НДС во многом определяется взаимодействием активных и пассивных зон. Чем выше очаг деформации, тем больше объем пассивных зон и значительней их роль в формировании НДС.

Известно [4], что в зонах пассивной деформации, которыми являются приконтактные слои полосы на входе в геометрический очаг деформации, центральные слои и боковые грани раската, возникают растягивающие напряжения. При определенных условиях эти напряжения могут превышать предел текучести металла, что может приводить к нарушениям сплошности металла. Кроме того, из-за действия растягивающих напряжений может наблюдаться уменьшение ширины полосы в средней ее части — поперечная утяжка.

Поскольку центральные слои металла являются зонами пассивной деформации, они деформируются (прорабатываются) слабо, что может негативно сказываться на конечной структуре и механических свойствах готового толстого листа [5, 6]. Кроме того, пассивные зоны создают дополнительный подпор течению металла в активной зоне, препятствуя удлинению, что приводит к повышению силы прокатки. Чем выше очаг деформации, тем выше (при прочих равных условиях) среднее давление металла на валки $p_{ср}$ [3].

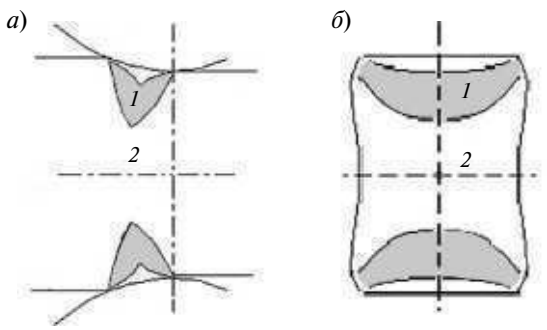


Рис. 1. Зоны активной (*1*) и пассивной (*2*) пластической деформации при высоком очаге деформации: *а* — в продольном сечении; *б* — в поперечном сечении раската

Необходимо отметить, что теория прокатки толстого листа создавалась без учета неравномерности температурного поля металла в очаге деформации. Между тем прокатка непрерывнолитого сляба в черновых пропусках на толстолистовом стане всегда сопровождается значительной неравномерностью распределения температур по толщине раската [7], что, очевидно, может существенно влиять на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации [1]. В работах [1, 8] установлено, что подстуживание поверхностных слоев в условиях высоких очагов деформации обеспечивает снижение или полное устранение растягивающих напряжений в центральных слоях полосы, что позволяет получить более высокие и равномерные механические свойства по сечению готового листа. На этом же принципе основана технология ковки «с подстуживанием», которая широко применяется при производстве крупных валов. Она заключается в том, что после нагрева слиток длительное время выдерживают на воздухе до значительного остывания поверхностных слоев, а затем куют с предельно большими обжатиями, что обеспечивает высокую интенсивность деформации горячих внутренних слоев [9]. Авторы работы [10] отмечают, что определение напряженного состояния без решения температурной задачи может привести к значительным погрешностям и ошибкам при расчете режимов деформации листовой прокатки.

Следует отметить, что существующие сегодня компьютерные программы, используемые для расчетов НДС различных технологических процессов обработки металлов давлением, способны решать одновременно температурную и деформационную задачи. В связи с этим были сформулированы цели нашей работы:

исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер НДС в очаге деформации при черновой прокатке толстого листа;

разработка технологических рекомендаций для снижения растягивающих напряжений в центральных слоях раската и увеличения прорабатываемости этих слоев.

Для достижения поставленных целей решали термо-деформационную задачу о прокатке

толстого листа с использованием пакета конечно-элементного моделирования *Deform*-3*D*, который позволяет учесть влияние неравномерности распределения температуры по объему раската на неравномерность деформации.

Методика моделирования. Расчеты осуществляли при помощи созданной конечно-элементной модели, адаптированной к условиям прокатки на стане 5000 [7]. На рис. 2, *а* представлено поле температур в слябе в первом черновом проходе, рассчитанное в пакете *Deform*-3*D* [7]. Видно наличие захоложенных приповерхностных слоев (корочки), температура которых изменяется от температуры разогретых центральных слоев до температуры поверхности. Упрощенная схема, принятая для анализа влияния на НДС толщины и температуры захоложенных областей, представлена на рис. 2,*б*. В качестве упрощения температуру захоложенных слоев принимали постоянной в пределах их заданной толщины, которую в расчетах варьировали от 30 до 50 мм при исходной толщине литой заготовки 250 или 315 мм. Температуру захоложенных корочек в численном эксперименте принимали в пределах 700–1000 °С, температуру разогретых центральных слоев сляба (разогретое ядро) — 1200 °С.

Моделировали первый проход черновой прокатки сляба из трубной стали категории прочности К60 толщиной 250 мм и длиной 3000 мм с относительными обжатиями от 1,6 до 19 %. Сляб считали пластичным телом, его свойства задавали кривыми пластического течения, полученными экспериментально на комплексе *Gleeble*–3800 [11].

Результаты моделирования. Результатами решения задачи были картины напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации в зависимости от выбранных обжатий, соотношений температур и толщин ядра и корочки. Пример подобных картин приведен на рис. 3.

На рис. 3 хорошо видна неравномерность НДС и наличие областей продольных растягивающих напряжений в центральных и приконтактных слоях прокатываемого сляба. Для оценки изменения характера НДС в центральной части очага деформации в случае наличия температурного градиента использовали отношение $h_{раст}/h_{ср}$, где $h_{раст}$ — высота области растягивающих продольных напряжений в центральных слоях; $h_{ср}$ — средняя высота очага деформации. Графики зависимости $h_{раст}/h_{ср}$ от относительного обжатия ε в проходе, толщины и температуры захоложенных приповерхностных слоев представлены на рис. 4. Видно, что в очаге деформации присутствуют зоны растягивающих напряжений в приконтактных и центральных слоях металла, занимающие до 70 % высоты очага деформации. По высоте области растягивающих напряжений можно судить о соотношении зон активной и пассивной деформации.

На рис. 5 показаны графики зависимости $p_{ср}/K$ (K — сопротивление деформации) от обжатия в проходе при различных толщинах и температурах корочек. На рис. 5 на дополнительной оси абсцисс приведены показатели высоты очага деформации $l/h_{ср}$.

Напряжение $p_{ср}$ рассчитывали с помощью стандартной подпрограммы пакета *Deform*-3, а сопротивление металла деформации — с помощью программы *AusEvol*$^+$ [12], в основе которой лежит база данных по сопротивлению деформации для трубных марок стали, полученная в результате экспериментальных исследований на комплексе *Gleeble*-3800. В расчетах в качестве значений степени и скорости деформации принимали средние значения этих параметров по очагу деформации.

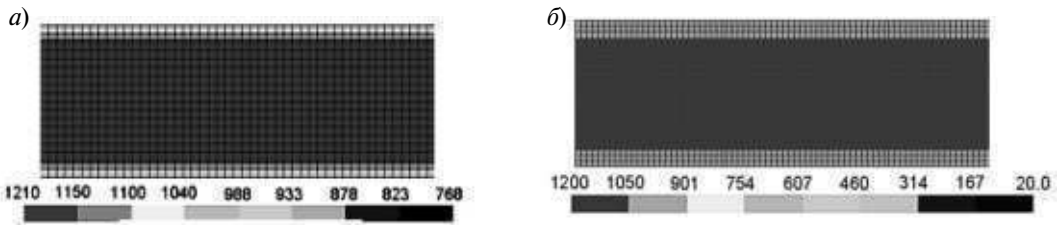


Рис. 2. Распределение температур по толщине сляба, рассчитанное при помощи *Deform* — 3*D*, (*а*) и упрощенная схема, принятая для анализа влияния неравномерности температурного поля на НДС, (*б*)

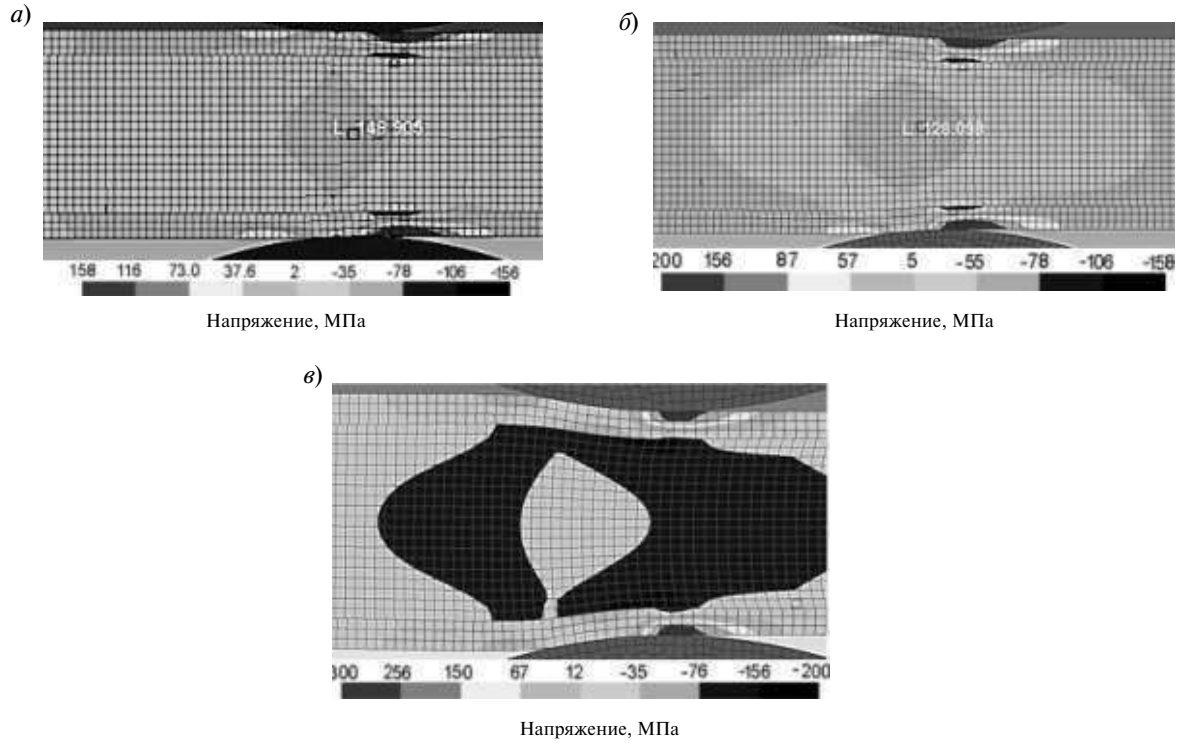


Рис. 3. Поля распределения продольных напряжений в очаге деформации при прокатке сляба с толщиной корочек 30 мм и их температурой 700°С при относительных обжатиях, %: *а* — 1,6; *б* — 3,3; *в* — 13,6

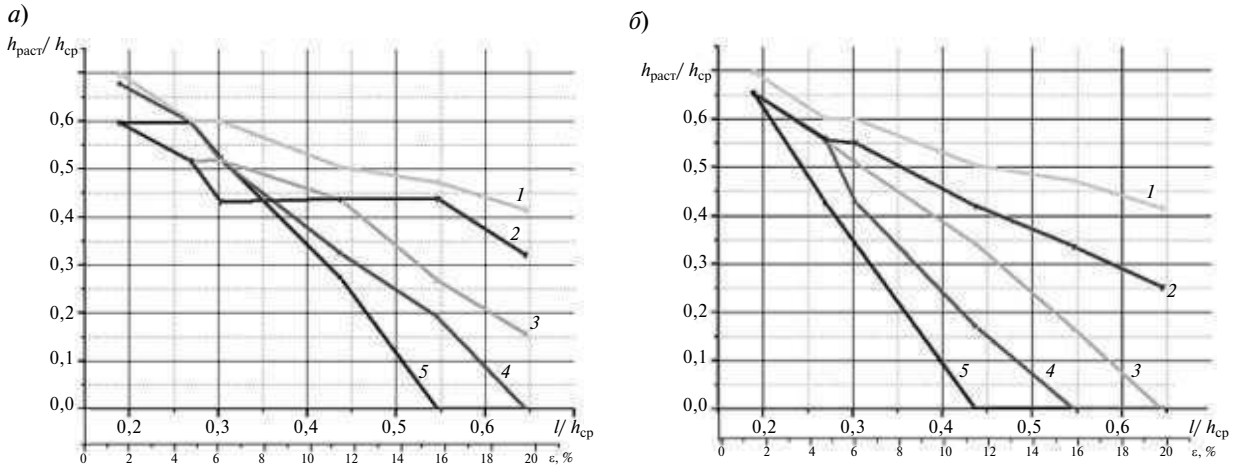


Рис. 4. Зависимость $h_{раст}/h_{ср}$ от относительного обжатия ε при температурах приповерхностного слоя 1200 (*1*), 1000 (*2*), 900 (*3*), 800 (*4*), 700 (*5*) °С и толщинах корочки 30 (*а*) и 50 (*б*) мм

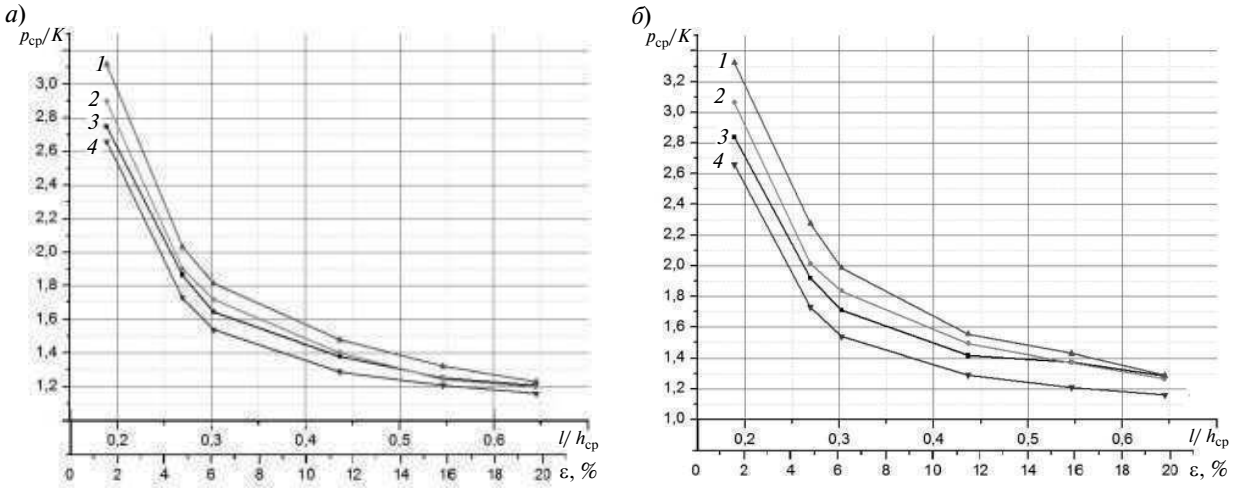


Рис. 5. Зависимости безразмерных напряжений $p_{ср}/K$ от относительного обжатия ε при толщине корочек 50 (*1*), 40 (*2*), 30 (*3*) мм при температурах корочек 1000 (*а*) и 700 (*б*) °С. Линией *4* показана зависимость $p_{ср}/K$ от ε при отсутствии захоложенных корочек

На рис. 6 представлено распределение интенсивностей деформаций по высоте раската в зависимости от толщины и температуры корочек захоложенного металла.

Анализ результатов моделирования. По результатам численного эксперимента, результаты которого представлены на рис. 3, 4 можно заключить, что на НДС металла в очаге деформации существенно влияет не только наличие температурного градиента по сечению, но и характер распределения температур по высоте раската, определяемый толщиной и температурой корочек.

Согласно данным рис. 4 чем выше толщина захоложенного слоя и ниже его температура, тем интенсивнее убывают растягивающие напряжения в центральных слоях металла с увеличением обжатия. Так, при толщине захоложенного поверхностного слоя 50 мм и температуре 700 °С напряжения в центральных слоях раската становятся сжимающими уже при относительном обжатии 11,5 % и значении параметра очага деформации $l/h_{ср} = 0{,}44$. При равномерно нагретом слябе растягивающие напряжения не исчезают даже при относительном обжатии

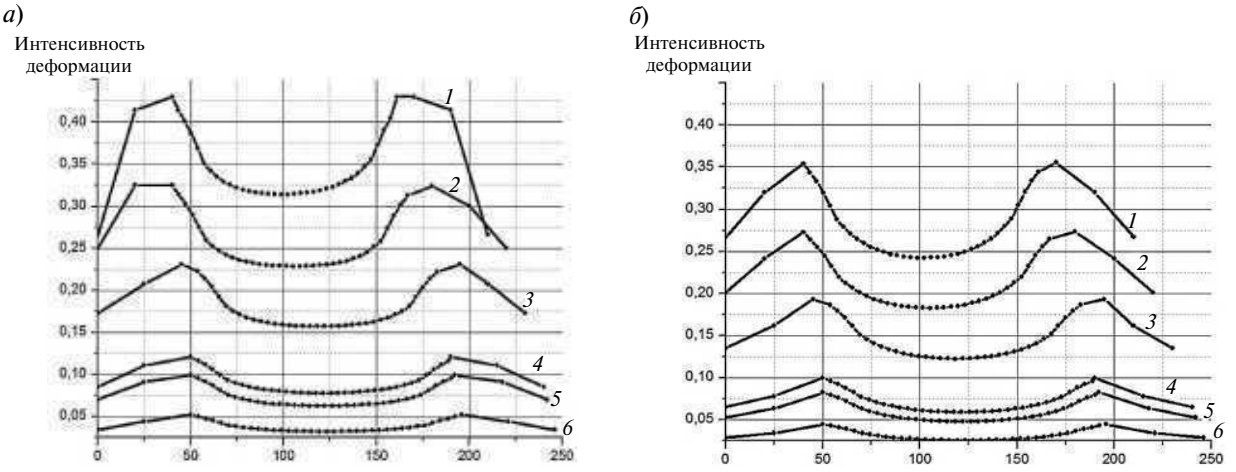


Рис. 6. Распределение интенсивностей деформации по высоте раската при прокатке сляба толщиной 250 мм с относительными обжатиями 19 (*1*), 16 (*2*), 12 (*3*), 6 (*4*), 3,3 (*5*), 1,6 % (*6*) при толщине захоложенных корочек 50 мм и их температуре 700 (*а*) и 1000 (*б*) °С

20 % и значении критерия $l/h_{ср} = 0{,}65$. При этом существенно (в 1,35 раза) возрастает интенсивность деформации в центральных слоях раската (рис. 7).

Результаты расчетов показывают, что при толщине захоложенных корочек 50 мм и их температуре 700 °С деформирующие напряжения $p_{ср}/K$ и сила прокатки возрастают приблизительно на 20–25 %, а напряжения на контакте с валками — приблизительно в 2 раза. В связи с этим улучшение прорабатываемости средних слоев металла для обеспечения хорошей многократно рекристаллизованной структуры аустенита требует жертвовать стойкостью валков и увеличением расхода электроэнергии.

Таким образом, схема НДС с неравномерным распределением температур сляба по сравнению с равномерным распределением становится более благоприятной: в средней по толщине области очага деформации отсутствуют растягивающие напряжения, повышается интенсивность деформаций в центральных слоях. Это должно положительно сказаться на структуре и свойствах готового листа и снизить вероятность нарушения сплошности в центральных слоях проката.

Можно отметить также, что неравномерность температур сдвигает условные границы высокого очага деформации в сторону меньших

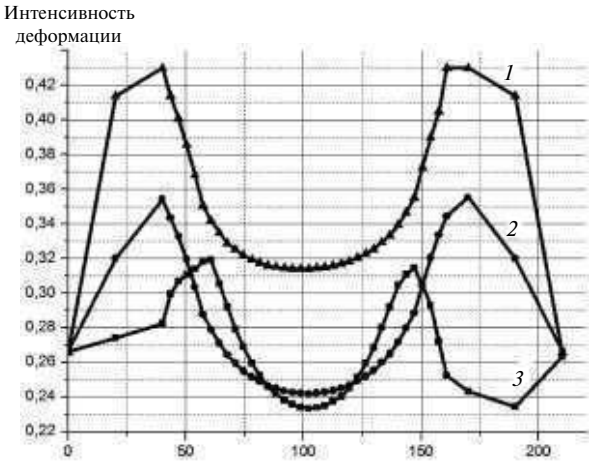


Рис. 7. Распределение интенсивностей деформации по высоте раската при прокатке сляба толщиной 250 мм с относительным обжатием 19 % при наличии корочки толщиной 50 мм с температурой 700 °С (*1*) и 1000 °С (*2*),а также при равномерной температуре раската 1200 °С (*3*)

значений критерия $l/h_{ср}$, в некоторых случаях (см. рис. 4) очаг деформации может становиться средним, в котором отсутствуют растягивающие напряжения, при значениях показателя формы $l/h_{ср} = 0{,}44$.

Отметим, что при черновой прокатке нежелательны малые обжатия, приводящие к низкой прорабатываемости центральных слоев раската и появлению в них растягивающих напряжений.

Возможность практического использования градиентов температур сляба для корректировки технологий прокатки на стане 5000. При черновой прокатке существуют два способа улучшения конечной структуры металла за счет лучшей проработки центральных слоев металла:

повышение обжатий в проходах до достижения температур окончания рекристаллизации;

преднамеренное создание температурного градиента в слябе перед прокаткой.

Первый способ имеет ограничения, поскольку с возрастанием обжатия могут быть превышены допустимые значения энергосиловых параметров прокатки. Возможно, что более предпочтителен второй способ. Один из вариантов его реализации на стане 5000 — трехстадийная прокатка. По этой технологии раскат после 3–4 черновых проходов отправляют на подстуживание, затем выполняют оставшиеся черновые проходы, дополнительное подстуживание, после которого следует чистовая прокатка.

Можно рассмотреть и другой вариант создания температурного градиента — за счет изменения времен предварительных операций. На толстолистовых станах, например на стане 5000, перед началом черновой прокатки сляб проходит ряд предварительных операций — транспортировку от методической печи к камере гидросбива, собственно гидросбив окалины, транспортировку после гидросбива к прокатной клети [7]. Обычно длительности этих операций составляют 100–150 с, в том числе 50–70 с — транспортировка сляба от методической печи к камере гидросбива, 4–6 с — гидросбив окалины, 40–70 с — транспортировка от гидросбива к прокатной клети.

На стане 5000 ОАО «Северсталь» используются слябы толщиной 250 и 313 мм. Расчет режимов изменения температуры этих слябов во время подготовительных стадиях обработки был

выполнен в [7]. Показано, что за 66 секунд транспортировки сляба от методической печи к камере гидросбива, 5 сек. работы устройства гидросбива окалины, 55 сек. транспортировки сляба после гидросбива к прокатной клети толщины захоложенных слоев составили примерно 25–28 мм для обеих толщин слябов, а их средние температуры — приблизительно 1060 °С (рис. 8, *а*). При известных толщине и температуре захоложенных корочек при помощи программы *Deform–3D* было выполнено моделирование первого чернового прохода с относительным обжатием 15 %. На рис. 9,*а* представлено распределение продольных напряжений в очаге деформации и распределение интенсивности деформаций по толщине раската.

Видно, что в очаге деформации существует область растягивающих напряжений, а интенсивность деформаций в центральных слоях раската невысока и составляет приблизительно 0,15. Таким образом, рассмотренные длительности предварительных операций не могут обеспечить при прокатке схему НДС благоприятную для хорошей прорабатываемости структуры центральных слоев металла.

Температуру захоложенных поверхностных слоев можно снизить, а толщину их повысить, увеличив времена предварительных операций. Для оценки возможных изменений температурного градиента сляба при увеличении длительностей предварительных операций был выполнен численный эксперимент. В первом варианте увеличили время гидросбива окалины до 30 с, во втором — дополнительно увеличили время транспортировки сляба до прокатной клети, приняв его равным 400 с. Расчеты показали, что в рассмотренных случаях толщина захоложенных слоев, как и в предыдущем случае, не зависит от толщины сляба и составляет приблизительно 40 и 60 мм для различных вариантов расчета, а их средние температуры — приблизительно 930 и 960 °С (рис. 9, *б*, *в*). Характер НДС и распределение интенсивности деформаций по толщине раската показаны на рис. 9, *б*, *в* и рис. 10. Время транспортировки от методической печи до гидросбива при проведении численного эксперимента не увеличивали, поскольку на этом этапе сляб покрыт толстым слоем окалины и его температура при этом снижается медленно [7].

При помощи стандартной подпрограммы *Deform–3D* определяли значения силы прокатки в проходах без учета участков захвата и выхода полосы из клети. При увеличении времени гидросбива сила прокатки возросла от 29918 до 31028 кН, а при дополнительном увеличении времени транспортировки — до 35549 кН. Результаты расчетов показывают (см. рис. 8), что

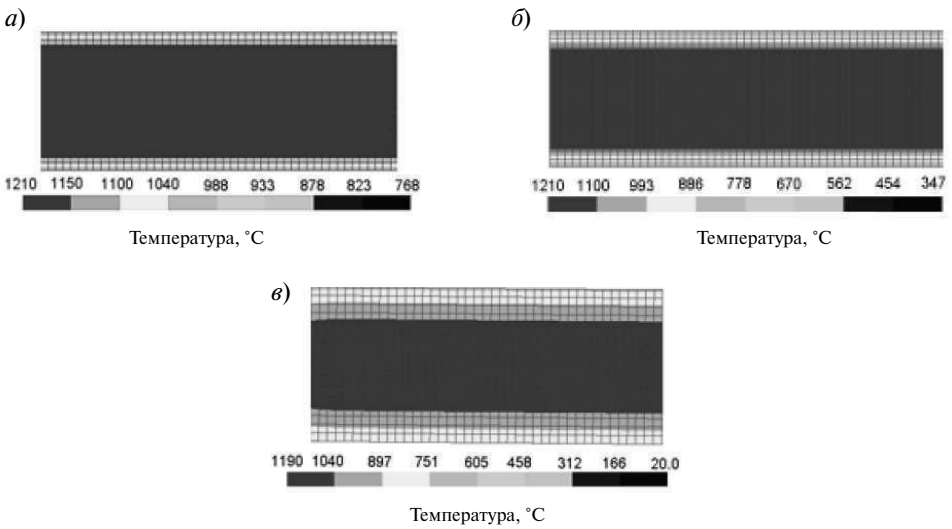


Рис. 8. Температурный градиент сляба толщиной 313 мм перед первым проходом в случае использования стандартной технологии предварительных операций (*а*), при увеличении времени удара гидросбива (*б*), при увеличении времени удара гидросбива и времени транспортировки от гидросбива к прокатной клети (*в*)

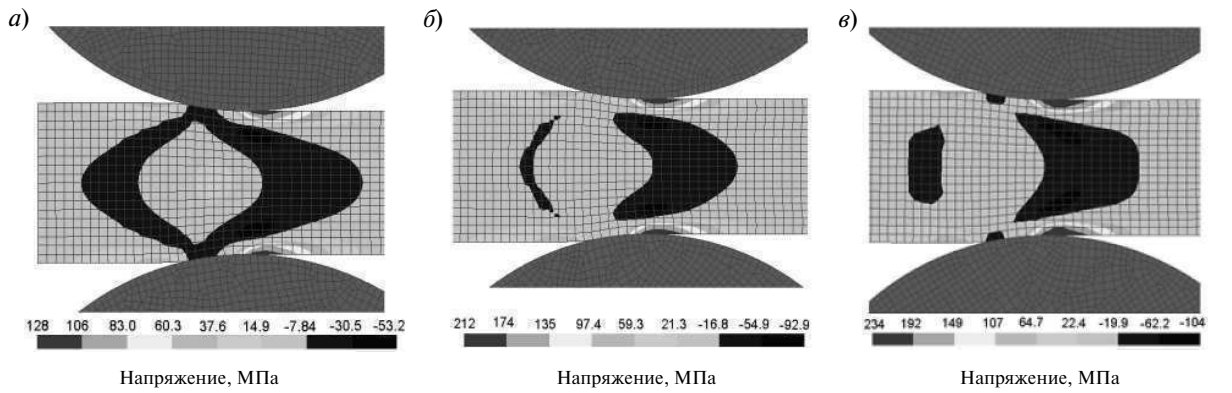


Рис. 9. Распределение продольных напряжений при прокатке сляба толщиной 313 мм с относительным обжатием 15 % при обычной технологии предварительных операций (*а*), после увеличения времени гидросбива окалины до 30 с (*б*) и после увеличения времени транспортировки до прокатной клети 400 с (*в*)

увеличение времени гидросбива окалины существенно снижает температуру захоложенной корочки сляба, но слабо влияет на толщину этого слоя. Увеличение времени транспортировки сляба от гидросбива к прокатной клети приводит к увеличению толщины захоложенного слоя, но при этом его температура повышается за счет теплового взаимодействия с разогретыми центральными слоями.

На рис. 10 представлены результаты расчета изменения интенсивности деформаций по высоте после первого прохода при прокатке сляба

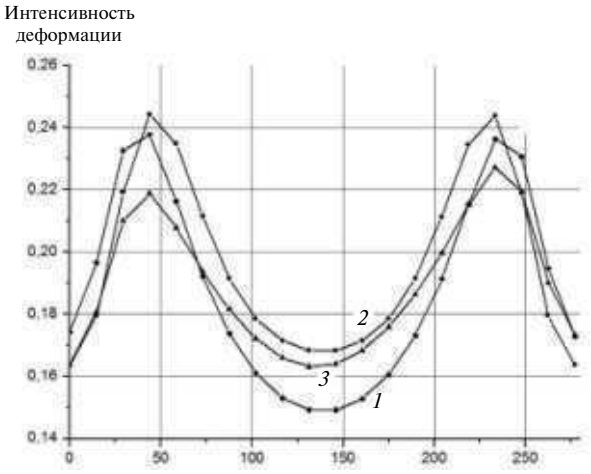


Рис. 10. Распределение интенсивности деформаций при прокатке сляба толщиной 313 мм с относительным обжатием 15 % при обычной технологии предварительных операций (*1*), после увеличения времени гидросбива окалины до 30 с (*2*) и после увеличения времени транспортировки до прокатной клети 400 с (*3*)

толщиной 313 мм после обычного времени подготовительных операций и после изменения времени гидросбива окалины и транспортировки к клети прокатного стана. Видно, что при увеличении времени гидросбива окалины интенсивность деформации центральных слоев может возрасти более чем на 13 %. Увеличение времени транспортировки сляба к прокатной клети не приводит к повышению прорабатываемости центральных слоев, наоборот, она даже несколько снижается из-за повышения температуры захоложенного слоя.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

На характер напряженно-деформированного состояния металла в высоком очаге деформации при прокатке толстого листа существенно влияет не только наличие температурного градиента по сечению раската, но и характер распределения температур по высоте раската, определяемый толщиной и температурой захоложенных слоев.

При преднамеренном создании температурного градиента в слябе перед черновой прокаткой удается снизить растягивающие напряжения в центральных слоях раската вплоть до их полного отсутствия, а также существенно повысить прорабатываемость центральных слоев раската. При этом энергосиловые параметры прокатки возрастают незначительно.

При помощи управления соотношением толщины и температуры захоложенных корочек сляба, формирующихся на стадиях предварительных

операций перед прокаткой, можно управлять характером напряженно-деформированного состояния металла вплоть до полного исчезновения растягивающих напряжений в центральной части высокого очага деформации и повышать прорабатываемость структуры центральных слоев металла за счет возрастания интенсивности сдвиговых напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ /

1. **Полухин, П.И.** Прокатка толстых листов [Текст] / П.И. Полухин и др.— М.: Металлургия, 1984.— 288 с.

2. **Чекмарев, А.П.** Теория прокатки крупных слитков [Текст] / А.П. Чекмарев, В.Л. Павлов, В.И. Мелешко, В.А. Токарев— М.: Металлургия, 1968.— 252 с.

3. **Рудской, А.И.** Теория и технология прокатного производства [Текст]: Учеб. пособие / А.И. Рудской, В. А. Лунев.— СПб.: Наука, 2008.

4. **Колмогоров, В.Л.** Пластичность и разрушение [Текст] / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев— М.: Металлургия, 1977.— 366 с.

5. **Казаков, А.А.** Влияние структурной анизотропии в ферритно-бейнитных сталях после термомеханической обработки на уровень их механических свойств [Текст] / А.А. Казаков, Д.В. Киселев, Е.И. Казакова [и др.] // Черные металлы.— 2010. №6.— С. 7–14.

6. **Колбасников, Н.Г.** Исследование бейнита реечной морфологии в высокопрочной трубной стали [Текст] / Н. Г. Колбасников, О. Г. Зотов, А. И. Шамшурин, А. А. Лукьянов // Металловедение и термическая обработка металлов.— 2013. №6.— С. 3–9.

7. **Лунев, В.А.** Тепловые потери при прокатке толстого листа на стане 5000. Часть 1: Теплопотери на операциях, предшествующих прокатке [Текст] / В.А. Лунев, И. А. Шишов, П.А. Глухов, А.А Беляев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. №1(166).— С. 146–153.

8. **Бровман, М.Я.** Энергосиловые параметры непрерывных заготовочных станов [Текст] / М.Я. Бровман— М.: Металлургиздат, 1962.

9. **Троицкий, В. П.** Исследование процесса ковки крупных слитков с предварительным подстуживанием поверхности [Текст]: Дис.... канд. техн. наук. / В. П. Троицкий.— М., 1966.

10. **Ершов, С.В.** Влияние температурного поля на напряженно-деформированное состояние металла при сортовой и листовой прокатке [Текст] / С.В. Ершов, В.В. Степчук, С.А. Воробей // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический университет».— Вестник машиностроения.— 2011. № 63.

11. **Колбасников, Н.Г.** Исследование возможностей повышения свойств стали 10Г2ФБ за счет реализации технологии прокатки TRIP-сталей [Текст] / Н.Г. Колбасников, О.Г. Зотов, В.В. Мишин, А.А. Немтинов, А.В. Голованов, С.В. Сосин // Черные металлы.— 2009. №7.— С. 12–16.

12. **Соколов, С.Ф.** Исследование и моделирование эволюции микроструктуры и сопротивления деформации сталей при горячей обработке давлением [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / С.Ф. Соколов.— СПб., 2013.

REFERENCES

1. **Polukhin, P.I. [i dr.].** Prokatka tolstykh listov [Tekst].— M.: Metallurgiia, 1984.— 88 s. (rus.)

2. **Chekmarev A.P., Pavlov V.L., Meleshko V.I., Tokarev V.A.** Teoriia prokatki krupnykh slitkov [Tekst].— M.: Metallurgiia, 1968.— 252 s. (rus.)

3. **Rudskoi A.I., Lunev V.A.** Teoriia i tekhnologiia prokatnogo proizvodstva: Ucheb. Posobie [Tekst].— SPb.: Nauka, 2008. (rus.)

4. **Kolmogorov V.L., Bogatov A.A., Migachev B.A.** Plastichnost' i razrushenie [Tekst].— M.: Metallurgiia, 1977.— 366 s. (rus.)

5. **Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. [i dr.].** Vliianie strukturnoi anizotropii v ferritno-beinitnykh staliakh posle termomekhanicheskoi obrabotki na uroven' ikh mekhanicheskikh svoistv [Tekst] // Chernye metally.— 2010. №6.— S. 7–14. (rus.)

6. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Shamshurin A.I., Luk'ianov A.A.** Issledovanie beinita reechnoi morfologii v vysokoprochnoi trubnoi stali [Tekst] // Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov.— 2013. №6.— S. 3–9. (rus.)

7. **Lunev V.A., Shishov I.A., Glukhov P.A., Beliaev A.A.** Teplovye poteri pri prokatke tolstogo lista na stane 5000. Chast' 1: Teplopoteri na operatsiiakh, predshestvuiushchikh prokatke [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. №1(166).— S. 146–153. (rus.)

8. **Brovman M.Ya.** Energosilovye parametry nepreryvnykh zagotovochnykh stanov [Tekst].— M.: Metallurgizdat, 1962. (rus.)

9. **Troitskii V.P.** Issledovanie protsessa kovki krupnykh slitkov s predvaritel'nym podstuzhivaniem poverkhnosti [Tekst]: Dis.... kand. tekhn. nauk.— M. –1966. (rus.)

10. **Ershov S.V., Stepchuk V.V., Vorobei S.A.** Vliianie temperaturnogo polia na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie metalla pri sortovoi i listovoi prokatke [Tekst] // Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskii politekhnicheskii universitet». Vestnik mashinostroeniia.— 2011. № 63. (rus.)

11. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Mishin V.V., Nemtinov A.A., Golovanov A.V., Sosin S.V.** Issledovanie vozmozhnostei povysheniia svoistv stali 10G2FB za schet realizatsii tekhnologii prokatki TRIP-stalei [Tekst] // Chernye metally.— 2009. №7.— S. 12–16. (rus.)

12. **Sokolov S.F.** Issledovanie i modelirovanie evoliutsii mikrostruktury i soprotivleniia deformatsii stalei pri goriachei obrabotke davleniem [Tekst]: Dis. ... kand. tekhn. nauk.— SPb., 2013. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследования материалов Института металлургии, машиностроения и транспорта, заведующий лабораторией исследования и моделирования структуры и свойств металлических материалов научно-технологического комплекса «Материалы и технологии» объединенного научно-технологического института СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Химический корпус, ауд. 24, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

ШИШОВ Иван Александрович — инженер научно-исследовательской лаборатории пластической обработки металлов» научно-технологического комплекса «Материалы и технологии» объединенного научно-технологического института СПбГПУ, аспирант кафедры технологии и исследования материалов института металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ; 195251, ул. Политехническая, 29, Химический корпус, ауд. 24, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: shishov_i@list.ru

КОРЧАГИН Андрей Михайлович — кандидат технических наук старший менеджер Центра компетенции штрипса ОАО «Северсталь»; 196651, пр. Ленина, д.1, Колпино, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: amkorchagin@severstal.com

БЕЛЯЕВ Александр Анатольевич — специалист по технологии и оборудованию ЛПЦ-3 ОАО «Северсталь», 196651, пр. Ленина, д.1, Колпино, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: belyaev@severstal.com

AUTHORS

KOLBASNIKOV Nikolay G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

SHISHOV Ivan A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: shishov_i@list.ru

KORCHAGIN Andrej A. — JSC «Severstal»; 196651, Lenina Av., 1, Kolpino, St. Petersburg, Russia; e-mail: amkorchagin@severstal.com

BELYAEV Alexander A. – JSC «Severstal»; 196651, Lenina Av., 1, Kolpino, St. Petersburg, Russia; e-mail: belyaev@severstal.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 541. 13

В.П. Юркинский, Е.Г. Фирсова, Е.С. Константинова

ПЛОТНОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА (II)

V.P. Yurkinsky, E.G. Firsova, E.S. Constantinova

DENSITY AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF AQUEOUS SOLUTIONS OF FERROUS SULFATE (II)

Изучена плотность и электропроводимость водных растворов сульфата железа (II) в интервале температур 15–50 °С с использованием соответственно пикнометрического и кондуктометрического методов. Определены плотность и удельная электропроводимость растворов (УЭП) в зависимости от содержания сульфата железа (II) и температуры.

ПЛОТНОСТЬ. ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ. ПИКНОМЕТРИЯ. КОНДУКТОМЕТРИЯ. РАСТВОРЫ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА (II).

The density and electrical conductivity of aqueous solutions of ferrous sulfate (II) are studied in the temperature range 15–50 °C using a pycnometric and conductometric methods, respectively. The density and specific conductivity of the solutions are determined depending on the ferrous sulfate (II) content and temperature.

DENSITY. ELECTRICAL CONDUCTIVITY. PYCNOMETRY. CONDUCTOMETRY. FERROUS SULFATE SOLUTIONS (II).

В промышленных масштабах очистку поверхности различных изделий стального проката проводят путем их травления в растворах кислот, в частности в растворах серной кислоты [1]. При этом существует проблема постоянного оперативного определения концентрационного состава травильных ванн по содержанию серной кислоты и образующегося в ходе процесса травления стальных изделий сульфата железа (II), так как их количественное содержание в ванне влияет на время удаления окалины [2]. Для получения калибровочных кривых, используемых для определения количественного состава растворов в травильных ваннах, необходимо знать электропроводимость и плотность обоих компонентов исследуемых смесей [1]. В нашей работе изучены плотность и электропроводимость растворов сульфата железа (II).

Экспериментальная часть

Электропроводимость растворов определяли кондуктометрическим методом [3–5]. В работе использовали U-образную электрохимическую ячейку капиллярного типа с диаметром капилляра 1,0 мм и длиной 5–7 см. В качестве материала электродов применяли никель. Электрическое сопротивление растворов измеряли с помощью автоматического моста переменного тока Е7–15 на частоте 1 кГц. Нагрев ячейки осуществляли со скоростью 15 град·ч$^{-1}$. При измерении сопротивления раствора нагрев кратковременно прекращали с целью стабилизации температуры в ячейке. Точность измерения температуры составляла ± 0,1°.

Электропроводимость растворов серной кислоты изучена достаточно хорошо [6, 7], а электропроводимость растворов сульфата железа (II) изучена лишь при температуре 18 °С [8, 9] из-за низкой термической устойчивости этих растворов, которые при более высоких температурах подвергаются гидролизу с образованием осадка основной соли железа:

$$2FeSO_4 + 2H_2O = (FeOH)_2SO_4 + H_2SO_4. \quad (1)$$

Наличие в растворе сульфата железа (II) серной кислоты позволяет полностью предотвра-

тить протекание процесса гидролиза. Поэтому в нашей работе в области температур 18–50 °С была исследована электропроводимость растворов смесей серной кислоты и сульфата железа. Далее по разности полученных значений электропроводимости смесей и известных значений электропроводимости растворов серной кислоты была рассчитана электропроводимость растворов сульфата железа (II).

Для приготовления растворов использовали концентрированную серную кислоту (ρ = = 1,84 г/см^3) и сульфат железа (II) квалификации х.ч. Концентрация серной кислоты в растворах изменялась в пределах 37–381 г·л$^{-1}$, а сульфата железа (II) — 5–225 г·л$^{-1}$.

Из-за термической неустойчивости растворов сульфата железа (II) в настоящее время их плотность изучена лишь при температуре 15 °С.

Определение плотности смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа позволяет при известной концентрации серной кислоты, а следовательно, и плотности раствора серной кислоты при этой концентрации [6] рассчитать плотность растворов сульфата железа (II) в области более высоких температур.

Используя метод аддитивности, расчет проводили по формуле

$$\rho_{FeSO4} = \rho_{см} - (\rho_{H2SO4} - \rho_{H2O}), \qquad (2)$$

где ρ_{FeSO4}, ρ_{H2SO4} и ρ_{H2O} —плотности соответственно растворов сульфата железа (II), серной кислоты и воды при определенной температуре. Плотность смешанных растворов $\rho_{см}$ серной кислоты и сульфата железа (II) в нашей работе определяли пикнометрическим методом [10]. При этом исследуемый раствор в пикнометре помещали в термостаты с различной температурой, выдерживали 1 час, далее охлаждали и взвешивали на электронных весах.

По разности весов определялась масса раствора и с учетом известного объема пикнометра (50 мл) рассчитывалась плотность растворов. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с применением стандартной компьютерной программы «ORIDGIN».

Полученные значения удельной электропроводимости (УЭП) смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа (II) при температурах 18, 25 и 50 °С представлены в табл. 1.

Используя известные данные об удельной электропроводности серной кислоты [6, 7] и приведенные значения УЭП смешанных растворов, по их разности была рассчитана удельная электропроводимость растворов сульфата железа (II). Полученные значения УЭП представлены в табл. 2.

При 18 °С имеются литературные данные [8, 9], которые приведены для сравнения. Как видно, наблюдается хорошее совпадение литературных и экспериментальных значений χ.

На основе данных, представленных в табл. 2, построены температурные и концентрационные зависимости для электропроводимости растворов сульфата железа (II). Температурные зависимости χ (См·м$^{-1}$) — t(°С) линейны и описываются уравнением $\chi = A + Bt$ (A и B — постоянные коэффициенты). Значения параметров A и B приведены в табл. 3 (R — значение доверительного интервала).

Таблица 1

Удельная электропроводимость χ смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа (II) при различных температурах и составах раствора

Номер раствора	C (H_2SO_4 + $FeSO_4$), г·л$^{-1}$	χ, См·м$^{-1}$		
		18 °С	25 °С	50 °С
1	37+150	19,94	22,41	32,09
2	48+224,9	24,96	28,16	40,52
3	69+186,1	32,16	36,25	50,7
4	127+108,6	49,2	54,58	73,37
5	213+31,0	65,54	72,81	97,62

Таблица 2

Удельная электропроводимость χ растворов сульфата железа (II)

Концентрация $C(FeSO_4)$, г·л$^{-1}$	χ, См·м$^{-1}$			
	18 °С		25 °С	50 °С
	Данные [8, 9]	Экспериментальные данные		
224,9	4,6	4,6	6,62	13,83
186,1	4,35	4,55	6,24	12,99
150	3,9	4,0	5,60	11,49
108,6	3,28	3,48	4,62	9,41
31,0	1,42	1,67	2,55	6,0

Таблица 3

Зависимость удельной электропроводимости χ растворов сульфата железа (II) от температуры

Концентрация $C(FeSO_4)$, г·л$^{-1}$	Коэффициенты зависимости $\chi = A + Bt$, См·м$^{-1}$		R
	A	B	
224,9	–0,59125	0,28843	0,997
186,1	–0,510	0,270	0,999
150	–0,29084	0,23562	0,996
108,6	–0,16875	0,19157	0,997
31,0	–1,07144	0,14177	0,998

Зависимость УЭП от концентрации сульфата железа (II) описывается полиномом второй степени $\chi = A + B_1C + B_2C^2$ (A, B_1, B_2, — постоянные коэффициенты, C — концентрация $FeSO_4$, г·л$^{-1}$). Значения коэффициентов полинома приведены в табл.4.

В табл. 5 приведены значения плотности смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа (II) в зависимости от температуры и состава раствора. На основе этих данных с учетом известной плотности растворов серной кислоты и плотности воды была рассчитана

Таблица 4

Зависимость удельной электропроводимости χ растворов сульфата железа (II) от концентрации

t, °С	Коэффициенты зависимости $\chi = A + B_1C + B_2C^2$, См·м$^{-1}$			R
	A	B_1	B_2	
18	0,45982	0,0330	–0,000065	0,995
25	1,47636	0,03576	–0,000056	0,998
50	4,23336	0,05646	–0,000058	0,998

Таблица 5

Плотность ρ смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа (II) при различных температурах и составах раствора

Номер раствора	Концентрация C (H_2SO_4 + $FeSO_4$), г·л$^{-1}$	ρ, г·см$^{-3}$				
		15 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
1	131,93+224,9	1,2867	1,2745	1,2664	1,2583	1,2502
2	175,90+186,1	1,2765	1,2645	1,2565	1,2485	1,2405
3	263,85+108,6	1,2708	1,2589	1,2510	1,2431	1,2352
4	351,80+31,0	1,2409	1,2304	1,2234	1,2164	1,2094
5	381,35+5,0	1,2342	1,2350	1,2217	1,2111	1,2045

плотность растворов сульфата железа (II). Плотность растворов сульфата железа (II) определялась по формуле (2).

Полученные результаты расчета плотности растворов $FeSO_4$ приведены в табл. 6. Здесь же представлены литературные данные [1], полученные при 15 °C. Как видим, наблюдается достаточно хорошее совпадение результатов.

С использованием данных, представленных в табл. 6 построены температурные и концентрационные зависимости для плотности растворов сульфата железа (II). Зависимости $\rho = f(t)$ и $\rho = f(C)$ имеют линейный вид и описываются соответственно уравнениями $\rho = A_1 + B_1 t$ и $\rho = A_2 + B_2 C$. Значения параметров этих уравнений приведены в табл. 7 и 8.

Таблица 6

Плотность ρ растворов сульфата железа (II)

Концентрация C ($FeSO_4$), г·л$^{-1}$	ρ, г·см$^{-3}$					
	15 °C		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
	Данные [1]	Экспериментальные данные				
224,9	1,2003	1,2009	1,1940	1,1873	1,1808	1,1740
186,1	1,1662	1,1637	1,1576	1,1514	1,1455	1,1392
108,6	1,0980	1,1037	1,0992	1,0940	1,0891	1,0838
31,0	1,0297	1,0199	1,0180	1,0145	1,0114	1,0079
5	1,0068	1,0046	1,0013	0,9954	0,9910	0,9861

Таблица 7

Зависимость плотности ρ растворов сульфата железа (II) от температуры

Концентрация C ($FeSO_4$), г·л$^{-1}$	Коэффициенты зависимости $\rho = A_1 + B_1 t$, г·см$^{-3}$		R
	A_1	B_1	
224,9	1,2110	–0,00060	0,996
186,1	1,1730	–0,00055	0,996
108,6	1,1114	–0,00045	0,993
31,0	1,0250	–0,00027	0,983
5,0	1,0122	–0,00042	0,988

Таблица 8

Зависимость плотности ρ растворов сульфата железа (II) от концентрации

t, °C	Коэффициенты зависимости $\rho = A_2 + B_2 \cdot C$, г·см$^{-3}$		R
	A_2	B_2	
15	0,9981	0,00090	0,998
30	0,9967	0,00088	0,998
40	0,9912	0,00088	0,997
50	0,9876	0,00086	0,996
60	0,9836	0,00085	0,998

Определены плотность и удельная электропроводимость смешанных растворов серной кислоты и сульфата железа (II) в зависимости от состава раствора и температуры.

С использованием метода аддитивности рассчитаны плотность и электропроводимость растворов сульфата железа (II) в зависимости от концентрации и температуры.

Полученные данные могут служить основой построения калибровочных кривых для определении состава ванн в процессе травления стального проката в растворах серной кислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А. с. 65953 (1946) G01N9/36**. Способ определения концентрации солей в растворах разбавленных кислот [Текст] / П.И. Гусев // Б.И.— 1946. № 3.

2. **Лихачев, Н.И.** Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст]: Справочник проектировщика. / Н.И. Лихачев, И.И. Ларин [и др.] / Под ред. В. Н. Самохина.— М.: Стройиздат, 1981.— 639 с.

3. **Будников, Г.К.** Основы современного электрохимического анализа [Текст] / Г.К. Будников, В.Н. Майстренко, М.Р. Вяселев.— М.: Изд-во «Бином. Лаборатория знаний». 2003.— 592 с.

4. **Грилихес, М.С.** Контактная кондуктометрия. Теория и практика метода [Текст] / М.С. Грилихес, Б.К. Филановский.— Л.: Химия, 1980.— 176 с.

5. **Галюс З.** Теоретические основы электрохимического анализа [Текст] / З. Галюс.— М.: Мир, 1974.— 555 с.

6. Справочник сернокислотчика [Текст] / Под ред. К.М. Малина.— М: Химия, 1971.— 744 с.

7. Справочник по электрохимии [Текст] / Под ред. А.М. Сухотина.— Л.: Химия, 1981.– 488 с.

8. **Рабинович, В.А.** Краткий химический справочник [Текст] / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин.— Л.: Химия, 1991.— 432 с.

9. **Никольский, Б.П.** Справочник химика Т. 3 [Текст] / Б.П. Никольский, О.Н. Григоров, М.Е. Позин.— М.: Химия. 1965.— 1005 с.

10. **Алешин, В.А.** Практикум по неорганической химии. [Текст] / В.А. Алешин, К.М. Дунаев, А.И. Жиров [и др.] / Под ред. Ю.Д. Третьякова— М.: Издательский центр «Академия», 2004.— 384 с.

REFERENCES

1. **A. s. 65953 (1946) G01N9/36.** Sposob opredeleniia kontsentratsii solei v rastvorakh razbavlennykh kislot [Tekst] / P.I. Gusev // B.I.— 1946. № 3. (rus.)

2. **Likhachev N.I., Larin I.I. [i dr.].** Kanalizatsiia naselennykh mest i promyshlennykh predpriiatii (Spravochnik proektirovshchika) [Tekst] / Pod red. V.N. Samokhina.— M.: Stroiizdat, 1981.— 639 s. (rus.)

3. **Budnikov G.K., Maistrenko V.N., Viaselev M.R.** Osnovy sovremennogo elektrokhimicheskogo analiza [Tekst].— M.: Izd-vo «Binom. Laboratoriia znanii», 2003.— 592 s. (rus.)

4. **Grilikhes M.S., Filanovskii B.K.** Kontaktnaia konduktometriia. Teoriia i praktika metoda [Tekst].— L.: Khimiia, 1980.— 176 s. (rus.)

5. **Galius Z.** Teoreticheskie osnovy elektrokhimicheskogo analiza [Tekst].— M.: Izd-vo «Mir». 1974.— 555 s. (rus.)

6. Spravochnik sernokislotchika [Tekst] / Pod red. K.M. Malina.— M: Khimiia, 1971.— 744 s. (rus.)

7. Spravochnik po elektrokhimii [Tekst] / Pod red. A.M. Sukhotina.— L.: Khimiia, 1981.— 488 s. (rus.)

8. **Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya.** Kratkii khimicheskii

spravochnik [Tekst].— L.: Khimiia, 1991.— 432 s. (rus.)

9. **Nikol'skii B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E.** Spravochnik khimika T. 3 [Tekst].— M.: Khimiia. 1965.— 1005 s. (rus.)

10. **Aleshin V.A., Dunaev K.M., Zhirov A.I. [i dr.].** Praktikum po neorganicheskoi khimii [Tekst] / Pod red. Iu.D. Tret'iakova— M.: Izdatel'skii tsentr «Akademiia», 2004.— 384 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЮРКИНСКИЙ Владимир Павлович — доктор химических наук профессор кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: jurkinskij@rambler.ru

ФИРСОВА Елена Германовна — кандидат технических наук доцент кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

КОНСТАНТИНОВА Екатерина Сергеевна — студентка пятого курса кафедры физико-химии и технологии микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

AUTHORS

YURKINSKY Vladimir P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: jurkinskij@rambler.ru

FIRSOVA Elena G. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

CONSTANTINOVA Ekaterina S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.1.017:669.018.44:669:018.28

Г.П. Анастасиади, С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО ЖАРОСТОЙКОГО СПЛАВА 45Х26Н33С2Б2

G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondrat'yev, M.D. Fuks

HIGH-TEMPERATURE OXIDATION OF THE HEAT RESISTING HEAT-RESISTANT ALLOY 45H26N33S2B2

Исследован процесс окисления сплава 45Х26Н33С2Б2 при температурах 400–1150 °С на воздухе и в вакууме (10^{-2} мм рт. ст.). Представлены экспериментальные кривые содержания кислорода на поверхности различных фаз в структуре сплава после высокотемпературной выдержки различной длительности. Выявлен сложный характер процесса окисления, связанный с многофазностью структуры сплава. Установлена высокая стойкость сплава к окислению.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ. МИКРОСТРУКТУРА. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ.

Process of oxidation of an alloy 45H26N33S2B2 is investigated at temperatures of 400–1150 °C on air and in vacuum (10^{-2} mm of mercury). Experimental curve contents of oxygen on a surface of various phases in alloy structure after high-temperature endurance of various duration are submitted. Difficult nature of process of the oxidation, connected with multiphase of structure of an alloy, is revealed. High resistance of an alloy to oxidation is established.

CAST HEAT RESISTING HEAT-RESISTANT ALLOYS. HIGH-TEMPERATURE OXIDATION. MICROSTRUCTURE. PHASE COMPOSITION.

Высокотемпературное окисление жаропрочных жаростойких сплавов системы 25Cr-35Ni-C-Si-Nb — неизбежный процесс, происходящий в них при длительной эксплуатации. Особенности окисления этих сплавов связаны с их многофазной структурой, формирующейся в литом состоянии, которая в исходном состоянии включает: стабильную матричную γ-фазу на железо-хром-никелевой основе; эвтектику, расположенную по границам дендритных ячеек и состоящую из карбида на основе хрома (M_7C_3) и матричной фазы; равномерно распределенный в матрице карбид ниобия (NbC) [1]. При длительной выдержке в интервале рабочих температур 700–1200 °С карбидные фазы в структуре непрерывно взаимодействуют с матрицей, образуя промежуточные фазы переменного состава, обозначаемые как γ′ и γ″ и содержащие в разных соотношениях никель, хром, железо, ниобий, кремний, азот и другие химические элементы, входящие в состав сплава [2, 3]. Поведение различных исходных и промежуточных фаз в структуре сплавов рассматриваемой системы компонентов при длительной высокотемпературной выдержке в среде, содержащей окислители (O_2, CO, CO_2 и др.), кардинальным образом различается. По уровню сопротивления окислению фазы в сплавах данной системы можно ранжировать от большего к меньшему в виде следующего ряда: карбиды на основе хрома, матрица, промежуточные фазы, карбиды на основе ниобия. При этом возможно также протекание процесса внутреннего окисления активных элементов состава — кремния, титана, алюминия, хрома и др. — при диффузии анионов кислорода через пленку окалины в сплав. Одновременно элементы, имеющие высокую летучесть, — хром, марганец и др. — при высокой температуре интенсивно испаряются в окружающую среду, существенно нарушая исходное оптимальное соотношение химических компонентов в сплаве и снижая за счет этого его сопротивление окислению. В ряде случаев это может приводить к катастрофическому окисле-

нию с уносом части массы сплава в окружающую среду [4–6].

Исходное положение теории окисления — «оксидный слой является плотной, идеально прилегающей к сплаву окалиной», являющееся справедливым при окислении некоторых особо чистых металлов (никель, медь, алюминий и др.), в случае окисления сплавов, содержащих несколько химических элементов и неизбежные сопутствующие примеси, практически не выполняется. Причины последнего в таких сплавах: образование в формирующихся оксидах большого числа дефектов структуры различной природы; присутствие в структуре фаз с различной склонностью к окислению и их трансформация при эксплуатационных температурах; наличие при эксплуатации рабочих напряжений и термических циклов и др. Эти факторы неизбежно приводят к разрушению структуры оксидных пленок на поверхности сплавов и снижению их защитных функций в процессе эксплуатации [7–9].

Общие соображения, связанные с влиянием диффузионных процессов на кинетику образования оксидных пленок в жаростойких сплавах при температуре эксплуатации, подтверждаются непосредственными надежными измерениями коэффициентов диффузии, проведенными с использованием изотопов кислорода (O^{18}) и элементов, обеспечивающих жаростойкость сплавов — никеля, хрома, кобальта и др. Например, полученные по результатам непосредственных измерений в экспериментах с изотопами выражения для расчета коэффициентов диффузии ионов кислорода и металлов имеют вид [8, 10, 11]:

для диффузии кислорода в оксиде никеля (NiO)

$$D(\mathrm{O}) = 10^{-5}\exp(-54000/RT),$$

$$D(\mathrm{Ni}) = 1{,}5\cdot 10^{-2}\exp(-58000/RT);$$

для диффузии кислорода в оксиде кобальта (CoO)

$$D(\mathrm{O}) = 10^{-6}\exp(-36000/RT),$$

$$D(\mathrm{Co}) = 5\cdot 10^{-3}\exp(-38390/RT);$$

для диффузии хрома в оксиде Cr_2O_3

$$D(\mathrm{Cr}) = 2\cdot\exp(-70\,000/RT),$$

$$D(\mathrm{O}) = 6{,}7\cdot 10^{-2}\exp(-76000/RT).$$

Соответственно значения коэффициентов диффузии кислорода и хрома для температуры 1200 °С равны

$$D(\mathrm{O}) = 1\cdot 10^{-16}\ \text{см}^2/\text{с}$$

с разбросом 10^{-15}–10^{-17} см^2/с;

$$D(\mathrm{Cr}) = 10^{-11}\text{–}10^{13}\ \text{см}^2/\text{с}.$$

Такие большие значения коэффициентов диффузии хрома по сравнению с кислородом получены, несмотря на то, что эксперименты проводили на монокристаллах оксидов с контролируемой малодефектной структурой.

На практике реальная структура оксида, образующаяся на поверхности жаростойкого сплава системы 25Cr-35Ni-C-Si-Nb, формируется в нестационарных условиях и является полиэдрической, причем диффузионная проницаемость оксида по границам зерен значительно — на порядки величины — выше, чем по объему, а сама структура сплава неустойчива и при высоких температурах склонна к собирательной рекристаллизации, образованию трещин и летучих соединений, вызывающих ее деструкцию в процессе окисления.

В связи с этим анализ процесса окисления жаропрочных жаростойких многокомпонентных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni при длительной высокотемпературной эксплуатации необходимо проводить для конкретных условий работы и определенных состава сплава, технологии производства деталей и рабочей среды.

Целью нашей работы было исследование процесса окисления сплавов системы 25Cr-35Ni-C-Si-Nb при температурах 600–1150 °С и оценка их жаростойкости в условиях, соответствующих эксплуатационным для высокотемпературных установок пиролиза в нефтехимической промышленности.

Материал и методика эксперимента

Материал исследования — жаропрочный сплав 45Х26Н33С2Б2, разработанный ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [12]. Сплав выплавляли в индукционной печи емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (ГОСТ 977–88). Фактический химический состав, %, исследованного сплава:

C	0,46
Si	1,73
Mn	1,31

Cr 25,5
Ni 35,6
Nb 1,60
W..... 0,59
Mo..... 0,31
Ti 0,21
N 0,05
Fe ..... Ост.

Для оценки жаростойкости использовали образцы сплава размером 10×10×15 мм.

Испытания проводили с использованием вакуумной камеры с водяным охлаждением и вольфрамовым нагревателем. Установка позволяет поддерживать вакуум на уровне 10^{-2}–10^{-3}. Контроль температуры осуществляется термопарой типа ВР (W-Re), закрепленной в середине образца и выведенной через специальное вакуумное уплотнение. Точность измерения температуры образца составляла ± 2 °С.

После высокотемпературной выдержки в интервале 400–1150 °С в воздушной среде и вакууме измеряли глубину окисленного слоя и исследовали вглубь от поверхности структуру, фазовый состав сплава и характер распределения химических элементов.

Исследование микроструктуры сплава выполняли на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 при увеличениях ×50–1000 с применением программы автоматического количественного анализа изображений согласно ASTM E 1245–03. Микрорентгеноспектральный анализ распределения элементов в матрице и состава фаз проводили на установке Tescan VEGA 5136 LM с точностью определения концентрации (%, относительн.): для Fe, Ni, Cr, Si, Nb, Mo, W, Ti — 3 %; для C, N — 20 %. Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в 10-процентной щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95. Структуру сплава исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D FEG.

Результаты эксперимеетальных исследований

Металлографический и микрорентгеноспектральный анализы позволили выявить химический состав первичных и промежуточных фаз, образующихся в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 при кристаллизации и высокотемпературной выдержке. Экспериментальные результаты, полученные для матричной, карбидных и интерметаллидных фаз, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав фаз (матрица, карбиды и интерметаллиды), образующихся в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 при первичной кристаллизации и длительной высокотемпературной выдержке

№	Состояние сплава и режим нагрева	Фаза и ее расположение в структуре	Условная формула фазы	Содержание основных химических элементов, % ат.
1	Исходное литое	Матричный твердый раствор	–	3,8Si; 0,9Mn; 25,0Cr; 33,0Ni; 36,5Fe; 0,5Nb
2	Исходное литое	В эвтектике	M_7C_3	9,1C, 78,8Cr, 8,4Fe, 1,6Ni, 0,7Mo, 1,4W
3	Исходное литое	В матрице	NbC	11,7C, 84,8Nb, 0,8Ti, 1,2Cr, 0,7Fe, 0,8Ni
4	1150 °С, 100 ч	Матричный твердый раствор	–	4,3Si; 0,9Mn; 24,0Cr; 33,5Ni; 36,7Fe; 0,5Nb
5	1150 °С, 50 ч	В эвтектике	$M_{23}C_6$	5,3C, 73,5Cr, 12,3Fe, 4,4Ni, 1,2Mo, 3,3W
6	1150 °С, 50 ч	γ′-фаза на границе карбида ниобия хрома и матрицы	$Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	14,2Si; 35,3Cr; 26,6Ni; 4,5Fe; 6,0Nb; 13,4N

Окончание табл. 1

№	Состояние сплава и режим нагрева	Фаза и ее расположение в структуре	Условная формула фазы	Содержание основных химических элементов, % ат.
7	1150 °С, 100 ч	Центр γ′-фазы, расположенной в матрице	$Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	14,5Si; 33,8Cr; 27,0Ni; 4,6Fe; 6,3Nb; 13,8N
		Край γ′-фазы, расположенной в матрице	$Cr_7Ni_5Si_3N_3Fe_3Nb$	11,8Si; 31,7Cr; 27,6Ni; 11,7Fe; 4,6Nb; 12,6N
8	1150 °С, 50 ч	γ″-фаза на границе с карбидом ниобия	Cr_5NiFe	66,0Cr; 14,3Fe; 14,3Ni
9	1150 °С, 2 ч	γ′-фаза внутри карбида ниобия	$Fe_7Cr_4Ni_8Si$	35,0Fe; 20,0Cr; 40,0Ni; 5,0Si

Из полученных результатов видно, что химический состав матричного твердого раствора и карбида ниобия остается стабильным при длительной высокотемпературной выдержке, а первичный эвтектический карбид на основе хрома — M_7C_3 — преобразуется в карбид $M_{23}C_6$. Состав промежуточных интерметаллидных фаз непрерывно изменяется. Очевидно, что стойкость к окислению кардинально различных по химическому составу структурных составляющих (см. например, строки 6 и 8 табл. 1) должна существенно различаться.

Анализ микроструктуры литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 600 °С на воздухе показал, что характер окисления разных фаз в нем, действительно, значительно различается (рис. 1). Количественно это подтверждается результатами определения химического состава окисленного слоя на поверхности различных фаз (табл. 2). Наибольшему окислению подвергается карбид ниобия, причем равномерно по всей поверхности образца (рис. 2).

Установленные закономерности окисления фаз в сплаве 45Х26Н33С2Б2 сохраняются и при температуре выдержки 800 °С (табл. 3). Следует отметить, что степень окисления фаз при повышении температуры выдержки от 600 до 800 °С увеличивается (табл. 2, 3).

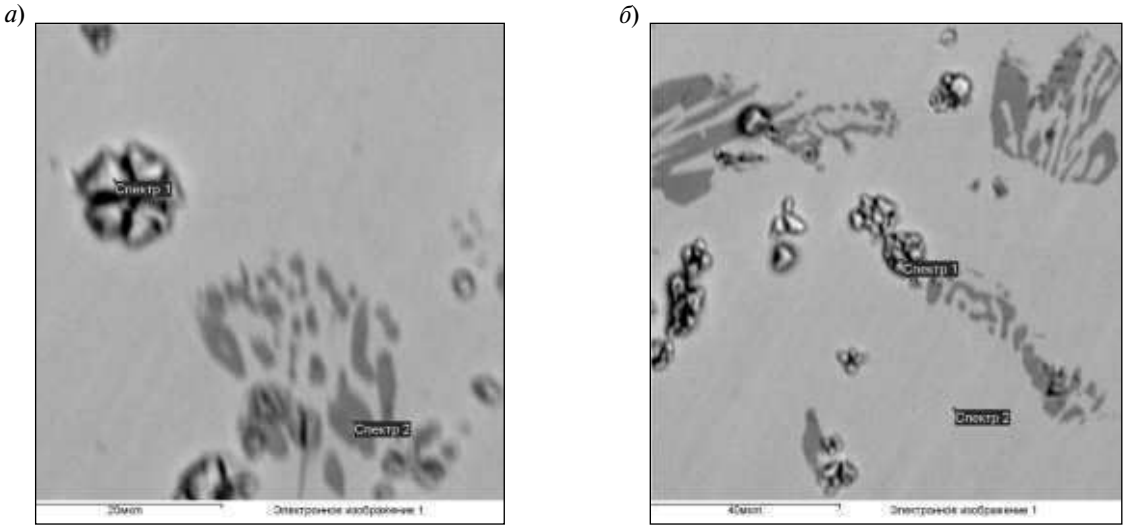


Рис. 1. Характер окисления карбида ниобия (*а*, спектр 1), карбида хрома (*а*, спектр 2) и матрицы (*б*, спектр 2) в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 600 °С в течение 10 мин на воздухе. РЭМ

Таблица 2

Химический состав поверхности фаз в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 600 °С длительностью 10 мин на воздухе

Фаза	Спектр на рис. 1	Содержание химических компонентов, % масс.							
		O	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Карбид ниобия Nb_2O_5 (условно)	1, рис. 1, *а*	32,5	–	0,6	3,4	3,8	2,6	56,5	0,6
Карбид ниобия Nb_2O_5 (условно)	1, рис. 1, *б*	30,0	–	–	1,7	2,1	1,9	64,2	–
Карбид хрома	2, рис. 1, *а*	1,5	–	–	78,6	12,3	5,8	–	1,7
Матрица	2, рис. 1, *б*	2,8	1,9	–	22,4	37,1	34,8	0,3	–

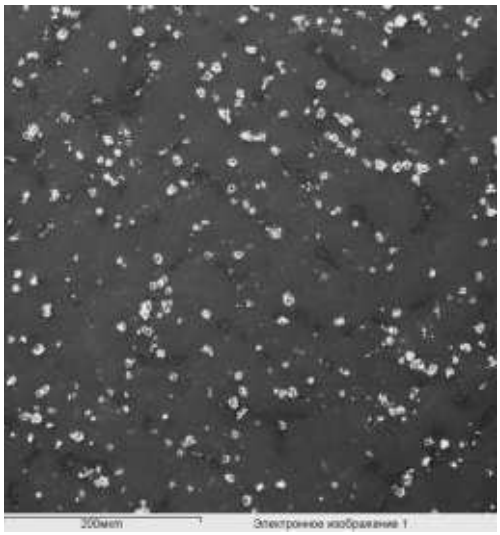


Рис. 2. Панорама равномерного окисления карбида ниобия в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 600 °С длительностью 10 мин на воздухе. РЭМ

Таблица 3

Химический состав поверхности фаз в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 800 °С длительностью 10 мин на воздухе

Фаза	Условная формула	Содержание химических компонентов, % масс.						
		O	Si	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Матрица	γ-фаза, окислена	7,2	1,9	22,8	32,8	30,4	0,2	–
Карбид ниобия	Nb_2O_5	38,2	0,8	10, 1	10,7	8,9	30,3	–
Карбид хрома	Оксидная пленка на карбиде	5,0	0,2	83,2	9,6	1,7	0,2	–

Характерно, что окисление фаз в структуре сплава наблюдается также и после высокотемпературной выдержки в вакууме, однако активность этого процесса в вакууме незначительна, причем и в этом случае наиболее интенсивно окисляется карбид ниобия (табл. 4).

Для количественной оценки жаростойкости литого сплава 45Х26Н33С2Б2 в условиях работы высокотемпературных установок нефтехимической промышленности исследовали образцы после испытаний на длительную прочность при температуре 1150 °С на воздухе при внешнем напряжении 6 МПа. Длительность испытаний до момента разрушения образцов сплава составила более 550 часов.

Анализ структуры сплава после длительного нагружения при 1150 °С показал существенное окисление всех фаз на поверхности образцов. Однако глубина окалины относительно невелика, составляет величину 15–25 мкм (рис. 3).

Таблица 4

Химический состав поверхности фаз в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 800 °С длительностью 10 мин в вакууме

Фаза и ее условная формула	Содержание химических компонентов, % масс.						
	O	Si	Cr	Fe	Ni	Nb	W
Матрица	4,6	1,7	20,3	33,8	32,5		6,1
Карбид ниобия Nb_2O (условно)	7,2	–	3,0	0,7	1,1	87,8	1,65
γ′-фаза, $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	4,8	7,2	35,5	5,7	34,0	8,2	3,4
Карбид хрома	5,7	–	83,9	3,7	0,5	0,4	4,6

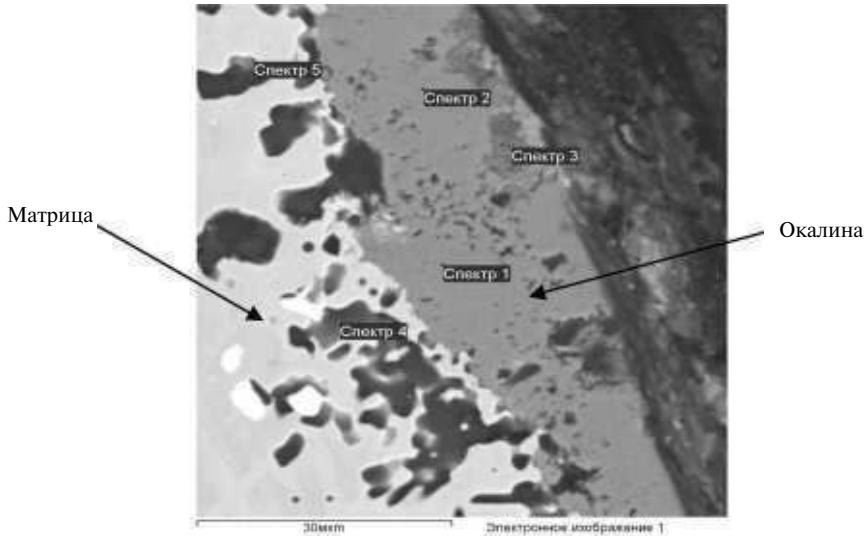


Рис. 3. Микроструктура окалины и окисленного поверхностного слоя образца литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 1150 °С длительностью 565 ч под напряжением 6 МПа на воздухе. РЭМ

Наибольшему окислению по сравнению с другими фазами, присутствующими в структуре сплава, как и при температурах 600–800 °С, подвергается карбид ниобия. В этом случае (при 1150 °С) он практически отсутствует в окисленном слое образца в результате окисления и сублимации. Промежуточные интерметаллидные фазы, наоборот, являются наиболее устойчивыми к окислению даже при такой высокой температуре. Стойкость к окислению карбидов хрома сопоставима с матрицей (табл. 5).

Обсуждение результатов

Обобщенные результаты определения химического состава оксидной пленки, образующейся на разных фазах в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при высокотемпературной выдержке при различных температурах на воздухе и в вакууме, приведены в табл. 6 и на рис. 4.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что наименее устойчивой фазой в структуре сплава является карбид ниобия. Интенсивное окисление карбида ниобия

Таблица 5

Химический состав оксидов в слое окалины и фаз в структуре окисленного слоя на поверхности образца литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при температуре 1150 С длительностью 565 ч под напряжением 6 МПа на воздухе

Фаза (условно)	Спектр на рис. 3	Содержание химических компонентов, % масс.					
		O	Si	Cr	Fe	Ni	Nb
CrO_2	1 (в окалине)	37,0	0,7	61,8	0,5	–	–
CrO_2	2 (в окалине)	36,9	0,4	62,1	0,5	–	–
M_2O_3 $\{(CrSi)_2O_3\}$	3 (в окалине)	32,1	12,4	55,4	–	–	–
MO_2 (SiO_2)	4 (в матрице)	44,5	22,5	3,0	8,4	8,2	13,3
γ′-фаза (окислена)	5 (в матрице)	19,2	10,3	8,8	29,6	27,2	4,9

Таблица 7

Содержание кислорода, % масс. в фазах, присутствующих в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после высокотемпературной выдержки на воздухе (p = 1 атм.) или в вакууме ($p = 10^{-2}$ мм рт.ст.)

Фаза	Содержание кислорода (% масс.) после выдержки сплава при разных условиях					
	400 °С, 10 мин, вакуум	600 °С, 10 мин, вакуум	600 °С, 10 мин, воздух	800 °С, 10 мин, вакуум	800 °С, 10 мин, воздух	1150 °С, 565 ч, воздух
Матрица – γ-твердый раствор	0,8–1,5	2,4–2,6	2,3–3,1	4,1–5,8	6,7–8,3	10,6–11,9
γ′-фаза – $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	–	1,6–2,0	1,3–2,1	4,0–6,9	9,2–11,0	18,2–19,9
γ′-фаза – $Fe_7Cr_4Ni_8Si$	–	–	–	4,3–5,2	–	–
Карбид хрома		1,9–2,3	1,5–4,6	3,4–3,7	5,0–5,7	6,5–7,4
Карбид ниобия	2,9–3,6	3,2–3,7	30,0–32,5	4,2–7,2	32,6–34,2	37,3–38,4
Окалина — CrO_2 (рис. 3, спектры 1, 2)	–	–	–	–	–	36,2–37,5
Окалина — Cr_2O_3 (рис. 3, спектр 3)	–	–	–	–	–	30,2–33,1
Оксид MO_2 (SiO_2) в матрице под окалиной (рис. 3, спектр 4)	–	–	–	–	–	42,4–45,5
γ′-фаза (окислена) в матрице под окалиной (рис. 3, спектр 5)	–	–	–	–	–	7,8–20,2

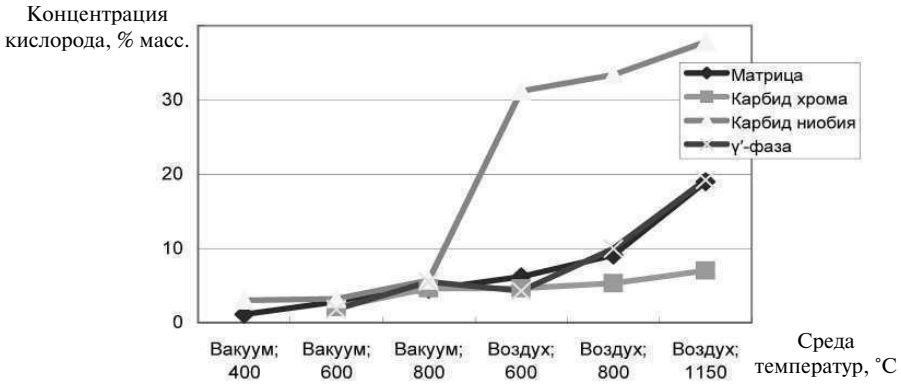


Рис. 4. Содержание кислорода в фазах, присутствующих в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 после высокотемпературного окисления при различных условиях

начинается при температуре 600 °С, а матрицы и промежуточной интерметаллидной γ′-фазы — при 800 °С. Характерно, что при образовании окисной пленки на γ′-фазе в ней происходит избирательное окисление кремния, содержание которого определяет в этом случае интенсивность накопления кислорода. Так, после выдержки одинаковой длительности при температуре 1150 °С концентрация кислорода в γ′-фазе переменного состава увеличивается от 8,4 до 10,4 и 15,6 % масс. при содержании кремния соответственно 8,3, 10,6 и 17,3 % масс.

Карбиды хрома относительно стабильны к окислению до температуры 1150 °С. Так, плотная пленка окалины толщиной до 15–25 мкм, образующаяся на поверхности образцов при температуре 1150 °С после выдержки длительностью 565 ч, состоит из оксидов на основе хрома с условной формулой $CrO_{1,93}$ при недостатке кислорода (CrO_2) и оксида на основе хрома и кремния $Cr_{1,06}Si_{0,44}O_2$ с условной формулой $M_2O_{2,66}$ также при недостатке кислорода (M_2O_3).

Полученные результаты показывают, что концентрация кислорода в окружающей среде (вакуум — 10^{-2} мм рт. ст., воздух — 1 атм.) несущественно влияет на интенсивность окисления фаз в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 при температурах 400–800 °С, кроме карбида ниобия, который начинает интенсивно окисляться на воздухе при 600 °С, а в вакууме — при 800 °С (табл. 6, рис. 5, 6).

Интенсивное окисление ниобия на воздухе при температурах начиная с 600 °С происходит до образования оксида Nb_2O_5. При этом ниобий

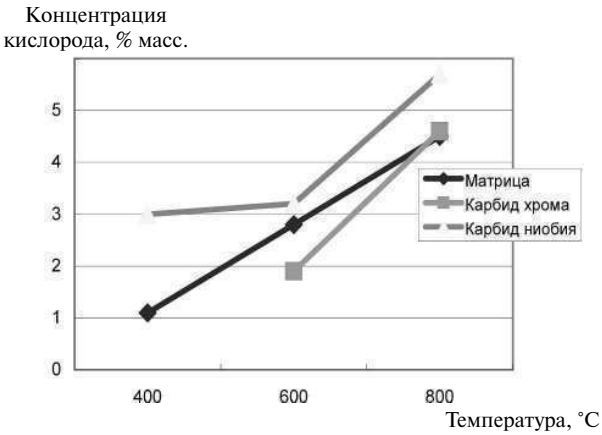


Рис. 5. Влияние температуры на окисление фаз в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при выдержке в вакууме длительностью 10 мин

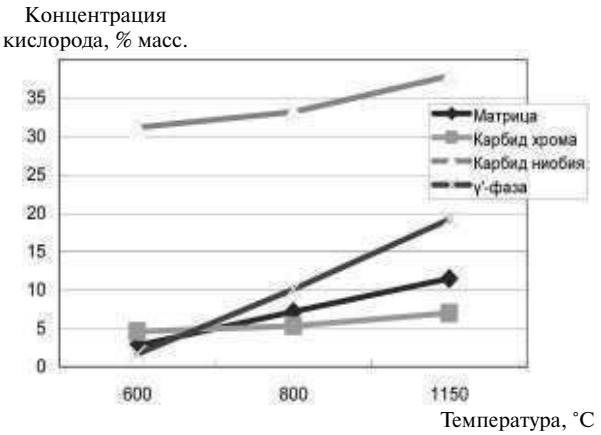


Рис. 6. Влияние температуры на окисление фаз в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при выдержке на воздухе длительностью: 10 мин при 600 и 800 °С и 565 ч при 1150 °С

активно участвует не только в образовании окалины, но и в подповерхностном окислении сплава (см. рис. 3). Однако внутреннее подповерхностное окисление сплава происходит в тонком слое образцов, равном 10–15 мкм и сопоставимом с толщиной образующейся на поверхности окалины (15–25 мкм). Это свидетельствует о примерно равной интенсивности диффузии анионов кислорода в металлическую основу сплава и катионов хрома в окалину, которые лимитируют процессы внутреннего окисления (кислород) и рост пленки окалины (хром).

Промежуточные фазы с повышенной концентрацией кремния, идентифицированные в [2, 3] как γ′ и γ″-фазы переменного состава, не содержащие ниобий и азот, подвергаются внутреннему окислению. В этом случае степень окисления зависит от содержания кремния.

Приложение внешних напряжений, соответствующих уровню эксплуатационных 6 МПа, незначительно влияет на структуру и защитные свойства окалины в исследованном сплаве 45Х26Н33С2Б2.

Таким образом, полученные результаты исследования жаростойкости литого сплава 45Х26Н33С2Б2 в интервале температур 400–1150 °С позволили установить, что процесс окисления в нем имеет сложный характер, связанный с многофазностью структуры. Присутствие в исходной литой структуре сплава нескольких фаз и образование промежуточных фаз при высокотемпературной выдержке, значительно различающихся по химическому составу, определяет избирательный характер окисления.

Первичные фазы в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 — матричный γ-твердый раствор, карбид хрома и карбид ниобия — при нагреве в вакууме до 800 °С окисляются незначительно, причем склонность к окислению увеличивается в таком порядке: карбид хрома, матрица, карбид ниобия. При окислении на воздухе, начиная с 600 °С карбид ниобия с поверхности окисляется практически до образования соединения Nb_2O_5. С повышением температуры до 1150 °С на поверхности образцов происходит образование плотной окалины толщиной до 15–25 мкм, состоящей из оксидов на основе хрома (MO_2 и M_2O_3), которая защищает сплав от дальнейшего интенсивного окисления.

В приповерхностном слое сплава под окалиной, в зоне толщиной 10–15 мкм (при температуре 1150 °С после выдержки 565 ч), происходит внутреннее окисление матрицы и промежуточных интерметаллидных фаз, содержащих кремний, до оксида SiO_2.

Важно отметить, что наличие внешних напряжений при длительной высокотемпературной выдержке не приводит к разрушению структуры окалины, что обеспечивает сохранение ее защитных свойств при окислении поверхности сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1. Литое состояние [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1 (142).— С. 155–163.

2. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2. Влияние высокотемпературной выдержки [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2-1(147).— С. 217–228.

3. **Рудской, А.И.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 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. № 3-2(154).— С. 143–150.

4. **Биркс, Н.** Введение в высокотемпературное окисление металлов [Текст] / Н. Биркс, Д. Майер / Пер. с англ. под ред. Е.А. Ульянина.— М.: Металлургия, 1987.— 184 с.

5. **Войтович, Р.Ф.** Окисление карбидов [Текст] / Р.Ф. Войтович.— Киев: Наукова думка, 1981.— 192 с.

6. **McIntyre, N.** Characterization of Oxide Structures Formed on Nickel-Chromium Alloy During Low Pressure Oxidation at 500–600 °C [Text] / N. McIntyre, N. Chan, C. Chen // Oxidation of Metals.— 1990. Vol. 33, № 5–6.— P. 458–479.

7. **Asteman, H.** Oxidation of 310 (25/20) steel in H_2O/O_2 mixture at 600 °C. Effect of water-vapor-enhanced chro-

mium evaporation [Text] / H. Asteman, J. Svensson, L. Johansson // Corrosion Science.— 2002. № 44.— P. 2635–2649.

8. **Ostwald, C.** Initial oxidation and chromium diffusion. Effects of surface working on 9–20 % Cr steels [Text] / C. Ostwald, H. Grabke // Corrosion Science.— 2004. № 46.— P. 1113–1127.

9. **Angerman, C.L.** Long-Term Oxidation of Superalloys [Text] / C.L. Angerman // Oxidation of Metals.— 1972. Vol. 5, № 2.— P. 149–167.

10. **Papageorgiou, D.G.** Oxygen adatom diffusion on the NiO (001) surface by molecular dynamics simulation [Text] / D.G. Papageorgiou, T. Karakasidis, G.A. Evangelakis // Physica B: Condensed Matter.— June 2002.— Vol. 318. № 2–3.— P. 211–216.

11. **Akida, K.** Quantitative Prediction of Voids Formation in a Growing Cobaltous Oxide Scale at 1373 K [Text] / K. Akida, M. Ueda, K. Kawamura, E. Maruyama // Materials Transactions.— 2007. Vol. 48, № 11.— P. 2997–3006.

12. **Орыщенко, А.С.** Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург.— 2008. № 2.— С. 66–68.

REFERENCES

1. **Oryshchenko A.S., Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N.** Osobennosti strukturnykh izmenenii v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshchenie 1. Litoe sostoianie [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. № 1 (142).— S. 155–163. (rus.)

2. **Oryshchenko A.S., Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N.** Osobennosti strukturnykh izmenenii v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshchenie 2. Vliianie vysokotemperaturnoi vyderzhki [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. № 2-1(147).— S. 217–228. (rus.)

3. **Rudskoi A.I., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Kondrat'ev S.Yu., Fuks M.D.** Osobennosti strukturnykh izmenenii v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshchenie 3. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashchenii [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. № 3-2(154).— S. 143–150. (rus.)

4. **Birks N., Maier D.** Vvedenie v vysokotemperaturnoe okislenie metallov [Tekst] / Per. s angl. pod red. E.A. Ul'ianina.— M.: Metallurgiia, 1987.— 184 s.

5. **Voitovich R.F.** Okislenie karbidov [Tekst].— Kiev: Izd-vo «Naukova dumka», 1981.— 192 s. (rus.)

6. **McIntyre N., Chan N., Chen C.** Characterization of Oxide Structures Formed on Nickel-Chromium Alloy During Low Pressure Oxidation at 500–600 °C [Tekst] // Oxidation of Metals.— 1990. Vol. 33, № 5–6.— P. 458–479. (rus.)

7. **Asteman H., Svensson J., Johansson L.** Oxidation of 310 (25/20) steel in H2O/O2 mixture at 600 C. Effect of water-vapor-enhanced chromium evaporation [Tekst] // Corrosion Science.— 2002. № 44.— P. 2635–2649. (rus.)

8. **Ostwald C., Grabke H.** Initial oxidation and chromium diffusion. Effects of surface working on 9–20 % Cr steels [Tekst] / Corrosion Science.— 2004. № 46.— P. 1113–1127. (rus.)

9. **Angerman C.L.** Long-Term Oxidation of Superalloys [Tekst] / Oxidation of Metals.— 1972.— Vol. 5, № 2.— P. 149–167. (rus.)

10. **Papageorgiou D.G., Karakasidis T., Evangelakis G.A.** Oxygen adatom diffusion on the NiO (001) surface by molecular dynamics simulation / Physica B: Condensed Matter.— June 2002.— Vol. 318, № 2–3.— P. 211–216. (rus.)

11. **Akida K., Ueda M., Kawamura K., Maruyama E.** Quantitative Prediction of Voids Formation in a Growing Cobaltous Oxide Scale at 1373 K / Materials Transactions.— 2007. Vol. 48, № 11.— P. 2997–3006. (rus.)

12. **Oryshchenko A.S.** Konstruktsionnye materialy dlia radiantnykh zmeevikov vysokotemperaturnykh ustanovok neftekhimicheskogo kompleksa [Tekst] // Metallurg.— 2008. № 2.— S. 66–68. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия

ФУКС Михаил Дмитриевич — аспирант, инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия

AUTHORS

ANASTASIADI Grigoriy P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: anastas45@yandex.ru

KONDRAT'YEV Sergey Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

FUKS Mihail D. — Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»; 191015, Shpalernaya Str. 49, St. Petersburg, Russia; e-mail: stoma_87@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.77

Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов, А.А. Огольцов

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ТОЛСТОГО ЛИСТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА СТАНЕ 2000

Kolbasnikov N.G., Yu.A. Bezobrazov, A.A.Ogoltsov

HOT ROLLING SCHEDULES ANALYSIS OF HIGH STRENGTH PIPE-LINE STEEL THICK SHEET ON MILL 2000

Исследовано влияние параметров горячей прокатки на стане 2000 на эволюцию структуры высокопрочной трубной стали. Проведено компьютерное моделирование формирования структуры и механических свойств стали в программе HSMM, AusEvol+, AusTran. Физическое моделирование термомеханической обработки стали выполнено на симуляторе Gleeble-3800. Найденные режимы обеспечивают получение механических свойств, удовлетворяющих требованиям ISO к трубным сталям категории прочности X80.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. МИКРОЛЕГИРОВАННЫЕ ТРУБНЫЕ СТАЛИ. КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The influence of continuous mill 2000 hot rolling parameters on the high strength pipeline steel structure evolution was investigated. Computer simulation of structure and mechanical properties formation was realized with the help of Hot Strip Mill Model (HSMM), AusEvol + and AusTran programs. Physical simulation of metal thermomechanical treatment was made by Gleeble-3800. Found modes are provided to receipt mechanical properties that meet ISO requirements for the X80 strength class pipeline steels.

THERMOMECHANICAL PROCESSING. MICROALLOYED PIPELINE STEELS. COMPUTER AND PHYSICAL SIMULATION.

В последние годы российские компании ведут активное освоение новых месторождений нефти и газа, что поддерживает высокий спрос на трубы большого диаметра (ТБД). Одним из основных производителей широкого листа для ТБД в России является ОАО «Северсталь», где такой лист в основном прокатывается на стане 5000. В настоящее время рассматривается возможность производства листа трубных сталей категорий прочности X80 на стане 2000. В связи с этим разработка режимов прокатки таких сталей на этом стане представляет практический интерес.

На первом этапе разработки промышленных режимов прокатки новых сталей обычно выполняется серия экспериментов по их физическому моделированию с использованием современных термомеханических симуляторов, таких, как комплексы Gleeble [1–4]. При этом значительная экономия времени и средств может быть достигнута, если предварительно перспективные режимы выбираются с привлечением соответствующих математических моделей. Известным примером модели, которая может быть использована для этих целей, — HSMM (Hot Strip Mill Model) [5]. Однако применимость данной модели для современных микролегированных трубных сталей не вполне обоснована в связи с их преимущественно бейнитной микроструктурой. Отмеченный недостаток HSMM может быть компенсирован использованием дополнительных математических моделей, позволяющих рассчитывать эволюцию микроструктуры рассматриваемых сталей как на стадии их горячей прокатки, так и при последующем ускоренном охлаждении, в процессе которого аустенит распадается с образованием практически важных составляющих, включая бейнит. Кроме того, необходимо использовать математические модели для предсказания конечных механических свойств формирующихся структур. Такие моде-

ли были разработаны авторами ранее и реализованы в компьютерных программах AusEvol+ и AusTran [6, 7], которые позволяют проводить все необходимые расчеты за исключением температурно-деформационного режима процесса. В то же время программа HSMM, адаптированная к условиям стана 2000 [8], позволяет проводить отмеченные расчеты. Таким образом, объединив возможности перечисленных программ, можно моделировать конечную микроструктуру горячекатаной стали и оценивать ее механические свойства.

Цель настоящей работы — демонстрация того, как можно разрабатывать перспективные режимы прокатки трубной стали на стане 2000 ОАО «Северсталь», используя возможности современных математического и физического моделирования [9]. В результате проведенных исследований предложен режим прокатки трубной стали категории прочности Х80, удовлетворяющей требованиям ISO [10] по механическим свойствам.

Компьютерное моделирование горячей прокатки

Моделирование температурно-деформационного и скоростного режима прокатки проведено с использованием лицензионной программы HSMM, которая была ранее адаптирована для выполнения соответствующих расчетов применительно к стану 2000 [8]. Структурная схема агрегатов данного стана представлена на рис. 1. Химический состав исследуемой стали следующий:

Химический элемент	Содержание (масс.), %
C	0,06
Si	0,2
Mn	1,7
P	<0,001
S	<0,001
Mo	0,2
Al	0,03
Nb	0,045
Ti	0,02
V	0,04
N	0,005

Основной целью проведения совокупности моделирующих расчетов был выбор режимов прокатки, обеспечивающих получение минимального размера зерна аустенита после горячей прокатки, и скорости последующего охлаждения проката, которая позволяет формировать бейнитную структуру, обладающую требуемым уровнем свойств.

Для достижения этих целевых показателей варьировали скорость прокатки и распределение обжатий в клетях стана с учетом ограничений по энергосиловым параметрам оборудования и принятой конечной толщине полосы (16 мм). Кроме того, добивались приемлемого выравнивания по температуре полосы на промежуточном рольганге ($\Delta T < 30$ °C), а также необходимой температуры начала чистовой прокатки.

При моделировании режимов прокатки с использованием программы HSMM в качестве базовой марки выбрана сталь HSLA Nb-V-Ti, химический состав которой близок к составу исследуемой стали.

Размеры сляба приняты равными 250×800××10300 мм. Его начальная температура (температура выдержки в печи) полагалась равной 1200 °C. Начальный размер зерна аустенита принимали равным 80 мкм, что соответствует выдержке данной стали в течение 60 секунд при температуре 1200°C.

Результаты расчета параметров прокатки в черновой группе клетей представлены в табл. 1. Рассчитанные значения параметров деформации и изменения температуры металла были использованы в качестве входных данных в программе AusEvol+, с помощью которой выполнены расчеты изменения размера зерна аустенита,

Рис. 1. Структурная схема стана 2000 ОАО «Северсталь»

Таблица 1

Результаты моделирования черновой прокатки на стане 2000

Номер режима	Печь	Скорость прокатки, м/с	Истинная деформация в клетях					Толщина после клети №5, мм	$T_{НП}$, °C	$T_{КП}$, °C	d_γ, мкм
			CR1	CR2	CR3	CR4	CR5				
1	№1	2	0,25	0,53	0,55	0,53	0,47	26	1182	1109	54
2		4,5	0,25	0,55	0,49	0,51	0,46	28		1146	54
3	№4	2	0,20	0,43	0,46	0,44	0,41	38	1156	1093	52
4		4,5	0,20	0,43	0,40	0,42	0,40	42		1120	50

$T_{НП}$ — температура начала прокатки; $T_{КП}$ — температура конца прокатки; d_γ — размер зерна аустенита после выдержки на промежуточном рольганге в течение 60 сек

а также выделения частиц Nb(CN). Их результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2. Из табл. 1 видно, что в соответствии с полученными данными минимальный размер зерна аустенита после черновой прокатки и использованной выдержки на промежуточном рольганге достигается в случае прокатки по режиму 4. Этот режим был выбран в качестве оптимального и использовался в моделировании дальнейшей эволюции микроструктуры аустенита при чистовой прокатке.

На следующем этапе моделирования были проведены расчеты, в которых при фиксированном режиме горячей прокатки варьировали длительность выдержки на промежуточном рольганге, скорость прокатки и режимы обжатий в чистовой группе клетей. Параметры режимов чистовой прокатки, моделируемой с помощью программы HSMM, а также результаты расчета размера зерна аустенита и содержания Nb в твердом растворе, полученные с помощью программы AusEvol+, приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Из данных, приведенных в табл. 4 и на рис. 3, видно, что прокатка по режимам 4 и 5 обеспечивает получение наименьших размеров зерна аустенита при значительной разнице содержания Nb в твердом растворе. В связи с этим данные режимы были выбраны как наиболее перспективные для дальнейшего исследования.

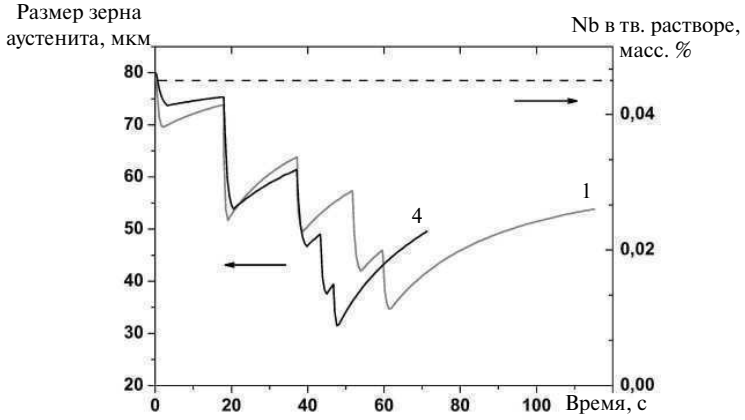


Рис. 2. Изменение размера зерна аустенита (сплошные линии) и концентрации Nb в твердом растворе (пунктирная линия) в процессе черновой прокатки по режимам 1 и 4, рассчитанные с помощью программы AusEvol+

Таблица 2

Результаты моделирования чистовой прокатки на стане 2000 с помощью программ HSMM и AusEvol+

Номер режима	Скорость прокатки, м/с	Выдержка на пром. рольганге, с	$T_{нм}$, °С	$T_{кп}$, °С	d_γ, мкм	C_{Nb}^{SS}, масс. %
1	4	0	1049	997	28	0,028
2		60	1019	976	37	0,017
3		300	856	847	69	0,008
4	21	0	1086	1083	20	0,045
5		60	1033	1037	23	0,022
6		300	878	906	70	0,014

C_{Nb}^{SS} — концентрация Nb в твердом растворе

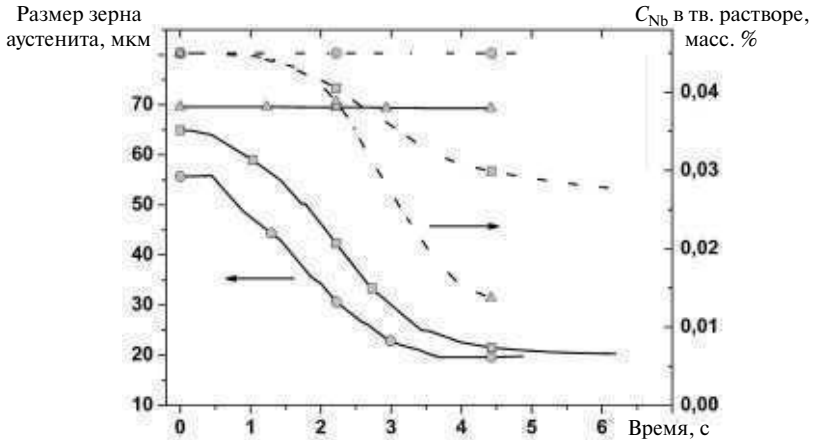


Рис. 3. Изменение размера зерна аустенита (сплошные линии) и концентрации Nb в твердом растворе (пунктирная линия) в процессе чистовой прокатки по режимам 4, 5 и 6, рассчитанные с помощью программы AusEvol+ (—○— — *4*; —□— — *5*; —△— — *6*)

На заключительном этапе поиска режимов прокатки и последующего ускоренного охлаждения, обеспечивающих получение высокого уровня конечных механических свойств стали, было проведено моделирование распада аустенита после прокатки по режимам 4 и 5. Соответствующие расчеты с помощью программы AusTran выполнены для скоростей охлаждения 5 и 10 °С/с. Полученные результаты по предсказанию значений определяющих параметров конечных микроструктур и рассчитанных на их основе механических свойств приведены в табл. 3. Морфология и размер бейнитных пакетов главным образом определяют механические свойства полученного материала. Для оценки механических свойств использованы эмпирические формулы, полученные для исследуемой стали [3]:

$$\sigma_в = 420 + (9{,}7V_{ГБ} + 14{,}3V_{РБ} + 9V_{АФ})\, d_Б^{-0{,}5};$$

$$\sigma_т = 302{,}7 + (7{,}3V_{ГБ} + 13{,}7V_{РБ} + 8{,}1V_{АФ})\, d_Б^{-0{,}5},$$

где $\sigma_т$ — предел текучести, МПа; $\sigma_в$ — предел прочности, МПа; $V_{ГБ}$, $V_{РБ}$, $V_{АФ}$ — объемные доли соответственно гранулярного, реечного бейни-

та и ацикулярного феррита, %; $d_Б$ — размер бейнитного пакета, мкм. Из табл. 4 видно, что для обоих режимов прокатки, как и следовало ожидать, максимально высокий уровень свойств получен при наибольшей скорости охлаждения.

Согласно полученным результатам оба режима прокатки в сочетании со скоростью охлаждения 10 °С/с обеспечивают формирование полностью бейнитных структур с близкими значениями микроструктурных параметров. Согласно данным выполненных расчетов механических свойств предсказываемые значения предела текучести составляют 644 и 637 МПа, а предела прочности — 797 и 794 МПа соответственно для режимов 4 и 5. Результаты предсказания механических свойств стали после обработки по режимам, найденным в результате проведенной серии моделирующих расчетов, были проверены путем ее физического моделирования.

Физическое моделирование горячей прокатки

Схемы режимов термомеханической обработки исследуемой стали, проведенной на комплексе Gleeble 3800, представлены на рис. 4, *а*. Эксперименты по режимам 1–4 были выполнены для получения бейнитных микроструктур, химическое травление которых позволило определить размеры бывших аустенитных зерен после черновой (режимы 1, 2) и чистовой (режимы 3, 4) стадий прокатки. Эксперименты, проведенные по режимам 5 и 6, реализуют физическое моделирование всей прокатки и последующего ускоренного охлаждения стали по режимам, найденным в результате математического моделирования технологического процесса. Кроме того, дополнительно режимы 5 и 6 были реализованы на специально разработанных образцах, которые после обработки на Gleeble можно испытывать на маятниковом копре для определения ударной вязкости образца. Чертеж разработанного образца представлен на рис. 4, *б*. После обработки на комплексе Gleeble образец фрезеруется до размеров, удовлетворяющих ГОСТ 9454–78, и испытывается на ударный изгиб при пониженной, комнатной или повышенной температуре. Количественный анализ полученных микроструктур выполнен с использованием анализатора изображений ThixometPro. Результаты экспериментального определения среднего размера зерна аустенита и его расчетов, выполненных с использованием программы AusEvol+, представлены в табл. 4. Сравнение представленных данных показывает их хорошее количественное согласие.

Микроструктура стали, обработанной по режимам 5, 6 (см. рис. 3), представляет собой смесь реечного и гранулярного бейнита (рис. 5).

На последнем этапе экспериментальной работы были проведены механические испытания образцов исследуемой стали, обработанных на комплексе Gleeble-3800 при физическом моделировании технологической цепочки производства полосы по режимам 5 и 6.

Таблица 3

Результаты расчета с помощью программы AusTran параметров микроструктур стали, формирующихся в результате охлаждения аустенита с разными скоростями после горячей прокатки по режимам 4 и 5 с

$V_{охл}$, °С/с	C_{Nb}^{SS}, масс. %	d_γ, мкм	Бейнит разной морфологии, %			$d_Б$, мкм	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
			ГБ	РБ	АФ			
Режим прокатки 4								
5	0,044	36,5	72	28	0	14,5	709	541
10	0,045	33,5	34	66	0	11,4	797	644
Режим прокатки 5								
5	0,017	27,4	80	20	0	14,3	701	530
10	0,021	25,9	41	59	0	11	794	637

$V_{охл}$ — скорость охлаждения; $d_Б$ — размер бейнитного пакета

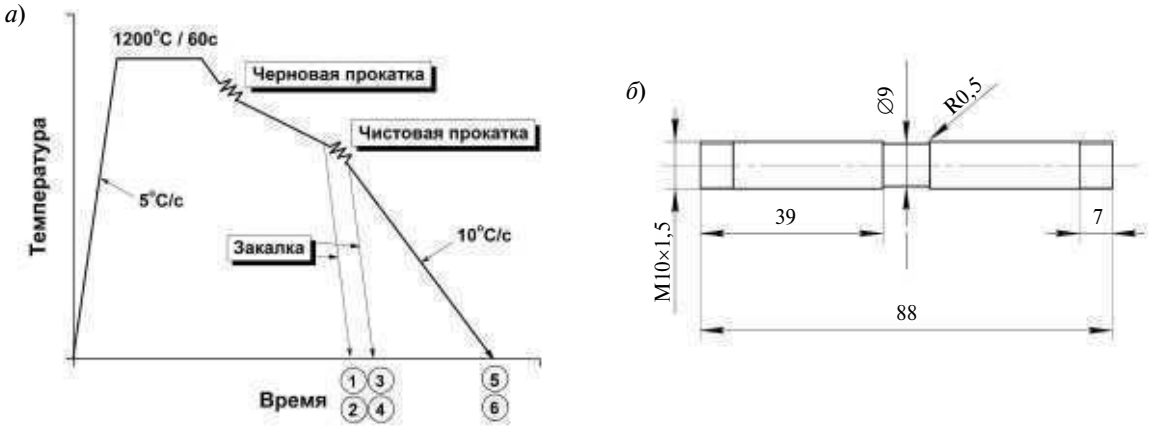


Рис. 4. Режимы термомеханической обработки стали на комплексе Gleeble-3800 (*а*) и схема образца для моделирования многостадийной пластической деформации на модуле Pocket Jaw симулятора Gleeble-3800 и для дальнейшего определения ударной вязкости (*б*)

Таблица 4

Результаты расчета и измерения размеров зерна аустенита после различных режимов обработки образцов на комплексе Gleeble-3800

Номер режима	d_γ, мкм		Относительная ошибка δ, %
	Расчет	Эксперимент	
1	53	43	23,8
2	63	60	5,5
3	31	32	3,1
4	37	32	15,6

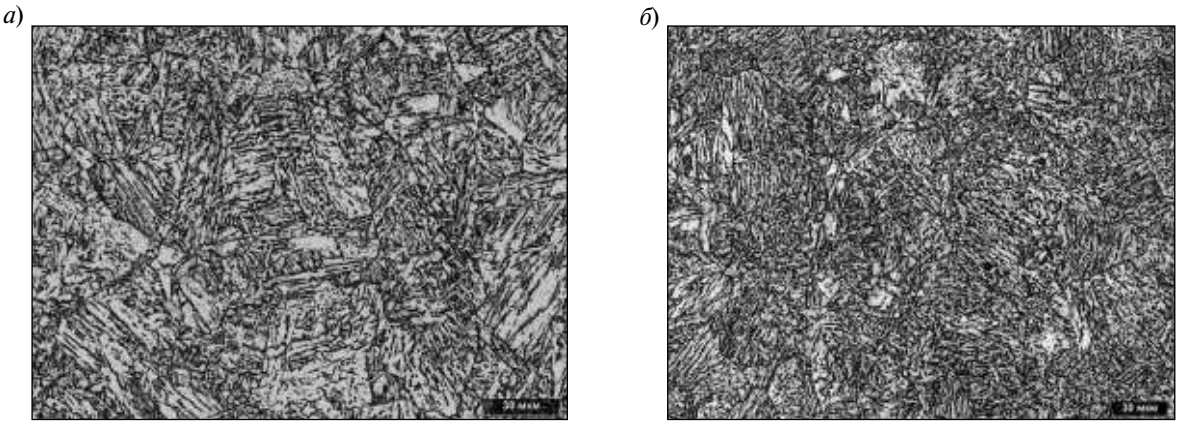


Рис. 5. Микроструктуры (×1000) исследуемой стали, полученные в результате физического моделирования горячей прокатки по режимам 5 (*а*) и 6 (*б*)

Таблица 5

Механические свойства исследуемой стали после обработки по режимам 5 и 6

Номер режима	Расчетные значения		Измеренные значения				Относительная ошибка расчета	
	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\delta_{корр.}$, %	KCV_{-20}, Дж/см^2	$\sigma_т$, %	$\sigma_в$, %
5	644	797	594	809	33	121	8,4	1,5
6	637	794	608	770	38	122	4,8	3,1
Среднее:							6,6	2,3

Образцы испытывали на разрывной машине Zwick//Roell Z100 со скоростью растяжения 2 мм/мин. Кроме того, были проведены испытания по определению ударной вязкости полученных микроструктур.

Сравнение результатов экспериментального исследования механических свойств с данными расчетов, выполненных с использованием разработанных моделей, показывает хорошее согласие по всем свойствам (табл. 5).

Найденные режимы прокатки позволяют удовлетворить требованиям к пределу прочности, пределу текучести, относительному удлинению и ударной вязкости, что подтверждается сравнением полученных механических свойств исследуемой стали со следующими требованиями ISO к свойствам трубной стали категории прочности X80:

$\sigma_Т$, МПа 555–705
$\sigma_В$, МПа 625–825
$\sigma_Т/\sigma_В$ 0,93
δ, % ..... > 25
KCV_{-20}, Дж/см^2 40–80

Основные результаты представленной работы сводятся к следующему:

С использованием компьютерных программ AusEvol+, AusTran и программы HSMM проведен поиск оптимальных режимов прокатки трубной стали на стане 2000 ОАО «Северсталь». Найденные режимы обеспечивают получение механических свойств, удовлетворяющих требованиям ISO к трубным сталям категории прочности X80.

Одновременное использование программ AusEvol+ и AusTran позволяет количественно моделировать эволюцию микроструктуры аустенита на стадии горячей прокатки сталей и его распада при ускоренном охлаждении, а также оценивать конечные механические свойства. Отмеченные возможности программ создают основу для компьютерного поиска оптимальных режимов промышленного производства горячекатаных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bezobrazov, Yu.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling [Text] / Yu.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov, A.A. Naumov // Materials Science & Technology 2012 Conference & Exhibition (MS&T'12), Thermal and Thermomechanical Processing Session.— Pittsburgh, PA, USA.— P. 1054–1061.

2. **Naumov, A.A.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing [Text] / A.A. Naumov, Yu.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov, E.V. Chernikov // Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.

3. **Колбасников, Н.Г.** Эволюция структуры высокопрочной двухфазной стали при горячей прокатке [Текст] / Н.Г. Колбасников, Ю.А. Безобразов, А.А. Наумов // Сталь.— 2013. №7.— С. 73–79.

4. **Колбасников, Н.Г.** Исследование эффекта Баушингера, физическое моделирование формирования свойств микролегированной стали в процессе изготовления труб [Текст] / Н.Г. Колбасников, О.Г. Зотов, И.С. Мартяшов, Р.В. Сулягин // Сталь.— 2012. №8. — С. 56.

5. http://www.integpg.com/

6. **Соколов, С.Ф.** Исследование и моделирование эволюции микроструктуры и сопротивления деформации сталей при горячей обработке давлением [Текст]: Автореф. дис. .. канд. тех. наук / С.Ф. Соколов.— СПб., 2013.

7. **Соколов, Д.Ф.** Разработка моделей распада аустенита и прогнозирования механических свойств при контролируемой прокатке сталей [Текст]: Автореф. дис. ... канд. тех. наук / Д.Ф. Соколов.— СПб., 2013.— 23 с.

8. **Колбасников, Н.Г.** Внедрение компьютерной программы HOT STRIP MILL MODEL (HSMM) в прокатное производство для управления структурой и свойствами сталей [Текст] / Н.Г. Колбасников // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. №3.— С. 38–47.

9. **Безобразов, Ю.А.** Подтверждение методики растяжение-сжатие для физического моделирования процессов многостадийной пластической деформации металлов [Текст] / Ю.А. Безобразов, Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // Сб. трудов: СММТ. 2013.— Санкт-Петербург, 2013.— С. 305–307.

10. Трубы для трубопроводов. Технические условия API Spec 5L [Текст] / ISO 3183.— 2008.— 154 с.

REFERENCEC

1. **Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Naumov A.A.** Approvement of Tension-Compression Technique Developed for Physical Simulation of Multistage Metal Plastic Deformation Processing // AMMT 2013, Spb, 2013, #3.— p.305–307.

2. **Naumov A.A., Bezobrazov Yu.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V.** Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing [Text] // Materials Science Forum.— 2013. Vol. 762.— P. 62–69.

3. **Kolbasnikov N.G., Bezobrazov Y.A., Naumov A.A.** High Strength Dual-Phase Steel Structure Evolution During Hot Rolling [Text] // Steel/— 2013. №7.— P. 73–79.

4. **Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Martyashov I.S., Sulyagin R.V.** Bauschinger effect investigation, physical simulation of the formation properties of microalloyed steel during pipe production [Text] // Steel.— 2012. №8.— P. 56.

5. http://www.integpg.com/

6. **Sokolov S.F.** Research and Simulation of Microstructure Evolution and Deformation Resistance of Steels During Hot Working [Text]: Ph.D. Thesis.— St. Petersburg State Polytechnical University.— St. Petersburg, 2013.

7. **Sokolov D.F.** Development of austenite decomposition and mechanical properties prediction models during controlled rolling steel [Text]: Ph. D. Thesis.— St.Petersburg State Polytechnical University, St.Petersburg, 2013.

8. **Kolbasnikov N.G.** The introduction of HSMM computer program in rolling production to control the structure and properties of steels [Text] // Scientific and technical sheets SPSPU.— 2007. №3.— P. 38–47.

9. Pipes for pipelines. Technical Specifications API Spec 5L [Text] / ISO 3183.— 2008.— P. 154.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЗОБРАЗОВ Юрий Алексеевич — аспирант кафедры пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nw86master@mail.ru

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

ОГОЛЬЦОВ Алексей Андреевич — менеджер Центра технического развития и контроля (ЦТРК); ОАО «СеверСталь»; 162608, ул. Мира 30, Череповец, Россия; e-mail: Alexey.Ogoltsov@severstal.com

AUTHORS

BEZOBRAZOV Yuriy A. — postgraduate, Metal Processing Department, IMM&T, Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nw86master@mail.ru

KOLBASNIKOV Nikolay G. — Doctor of Technical Sciences, Metal Processing Department, IMM&T, Professor; Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nikolay.kolbasnikov@gmail.com

OGOLTSOV Alexey A. — manager Centre of Technical Development and Control CTDC; JSC «SeverStal»; 162608, Mira Str. 30, Cherepovets, Russia; e-mail: Alexey.Ogoltsov@severstal.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.9.048.7

Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, А.Д. Ахметов, О.В. Величко

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

G.A. Turichin, I.A. Tsibulskiy, M.V. Kuznetsov, A.D. Akhmetov, O.V. Velichko

LASER-ARC WELDING IN DIFFERENT ATTITUDE POSITION

В статье рассмотрено влияние пространственного положения лазерно-дуговой сварки на геометрию зоны проплавления и термодинамический КПД процесса. Также рассматривается проблема предотвращения протекания расплава, определяются пути ее решения.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. МЕТАЛЛЫ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН. ПРОТЕКАНИЕ РАСПЛАВА. РАЗЛИЧНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ЛУЧ.

Influence of laser-arc welding attitude position on geometry of penetration zone and thermodynamic efficiency. The problem of melt fluxion prevention was considered and variants of its decision were detected.

LASER-ARC WELDING. THICKNESS METALL. MELT FLUXION. DIFFERENT ATTITUDE POSITION. HORIZONTAL BEAM.

Широкое применение лазерно-дуговой сварки (ЛДС) в мировой практике обусловлено огромным количеством экспериментальных исследований, к которым можно отнести сравнительный анализ лазерного, дугового и гибридного способов сварки [1], а также исследования гибридной сварки с использованием различных лазерных источников [2]. В ряде работ освещены исследования влияния на механические свойства и геометрию сварного соединения частоты, напряжения и времени пульсации дуги [3], расстояния между осью луча лазера и электродом [4], формы разделки [5], типа обработки разделки [6], типа соединения, состава защитной газовой смеси [7]. В других работах описаны результаты исследования амплитудно-частотных характеристик при сканировании лазерного луча [8], а также влияние технологических параметров ЛДС на геометрию сварного соединения. Проводился сравнительный анализ лазерно-дуговой и лазерной сварки с присадочным материалом, исследовалось влияние температуры предварительного подогрева на твердость металла шва [9], а также погонной энергии на микроструктуру металла шва при одно- и двух проходной сварке [10]. Некоторые авторы проводили сравнительный анализ ЛДС с одним и двумя электродами [11] и исследовали формирование сварного шва при орбитальной ЛДС [12].

Из приведенного краткого обзора понятно, что большинство исследований проводилось для случая сварки в нижнем пространственном положении (НПП). К сожалению, получение стабильного сквозного проплавления при ЛДС в НПП с ограниченной мощностью лазерного излучения не всегда возможно из-за протекания расплава. К примеру, при мощности лазерного излучения 15 кВт максимально возможная толщина пластин, свариваемых за один проход без протекания расплава, около 12 мм. При увеличении толщины пластин необходимо снижать скорость сварки, а это приводит к протеканию расплава.

Проблема предотвращения протекания расплава крайне актуальна для отечественной промышленности. В связи с этим были проведены специальные исследования и определены не-

которые пути ее решения. Результаты этих исследований описаны в данной публикации.

Оборудование и материалы

ЛДС в нижнем и вертикальном пространственном положении (ВПП) (рис. 1) осуществлялась на экспериментальном стенде для лазерной и лазерно-дуговой сварки — лазерно-дуговом технологическом комплексе (ЛДТК), разработанном сотрудниками института лазерных и сварочных технологий. В качестве источников энергии использовались иттербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт (НТО «ИРЭ-Полюс») и выпрямитель для дуговой сварки ВДУ-1500 DC (ЗАО НПФ «ИТС»).

При экспериментах в НПП и ВПП была использована сталь обычного качества (Ст3) и высокопрочная сталь РС Е36, применяемая в отечественном судостроении, с толщиной пластин соответственно 16 и 20 мм. В качестве присадочного материала использовалась металлопорошковая сварочная проволока типа POWER BRIDGE 60M.

Сварка осуществлялась прямолинейными стыковыми швами. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовалась смесь аргона с углекислым газом.

Поверхности, примыкающие к кромкам стыкуемых деталей, на ширине не менее 10 мм от стыка перед сваркой обезжиривались и зачищались до металлического блеска для удаления грязи, масла и ржавчины.

Сборка листов под сварку производилась с применением сборочных приспособлений (прижимы).

Качество швов оценивалось визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов.

Моделирование лазерно-дуговой сварки в системе инженерного анализа LaserCAD

Предварительный модельный эксперимент по лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом в НПП и ВПП был осуществлен с помощью системы инженерного анализа LaserCAD. Геометрия зоны проплавления (поперечный вид), ванны расплава (продольный вид) и сварного соединения представлены на рис. 2 и 3. По результатам моделирования были получены следующие предварительные параметры лазерно-дуговой сварки: для сварки в НПП — $P_л = 15$ кВт, $V_{св} = 25$ мм/сек, $I_д = 400–500$А, $U_д = 24–25$В; для сварки в ВПП — $P_л = 15$ кВт, $V_{св} = 25$ мм/сек, $I_д = 200–300$ А, $U_д = 23–24$ В.

Лазерно-дуговая сварка в нижнем пространственном положении

Лазерно-дуговая сварка в НПП была выполнена по пластине с различным (от 0 до 5 мм) расстоянием Δl между лучом лазера и электродом при опережающем положении дуги. На рис. 4 представлены макрошлифы сварных соединений, полученных в режиме $P_л = 15$ кВт, $V_{св} = 25$ мм/сек, $d_{пр} = 1{,}6$ мм, $V_{п\,п} = 9{,}12$ м/мин.

а) *б*)

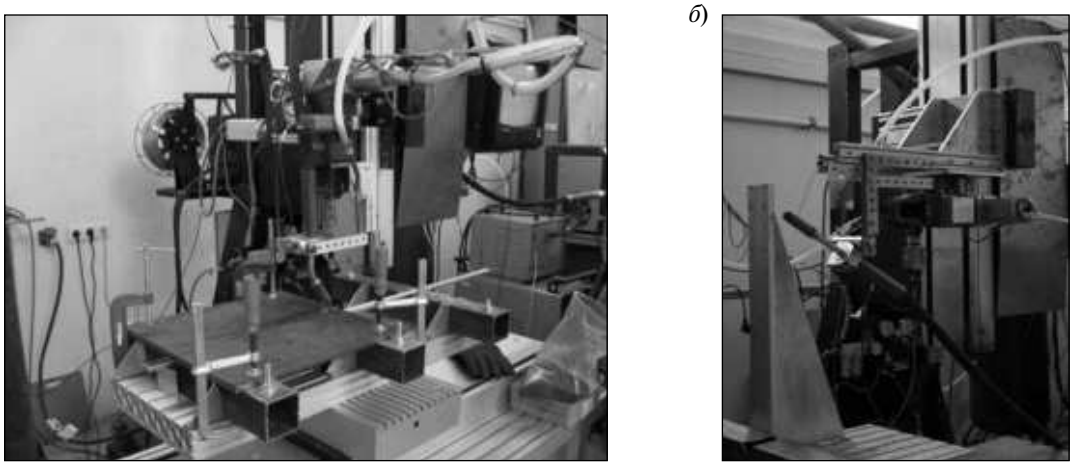


Рис. 1. Система взаимного относительного перемещения рабочего инструмента и изделия ЛДТК: лазерно-дуговая сварка в нижнем (*а*) и верхнем (*б*) пространственном положении

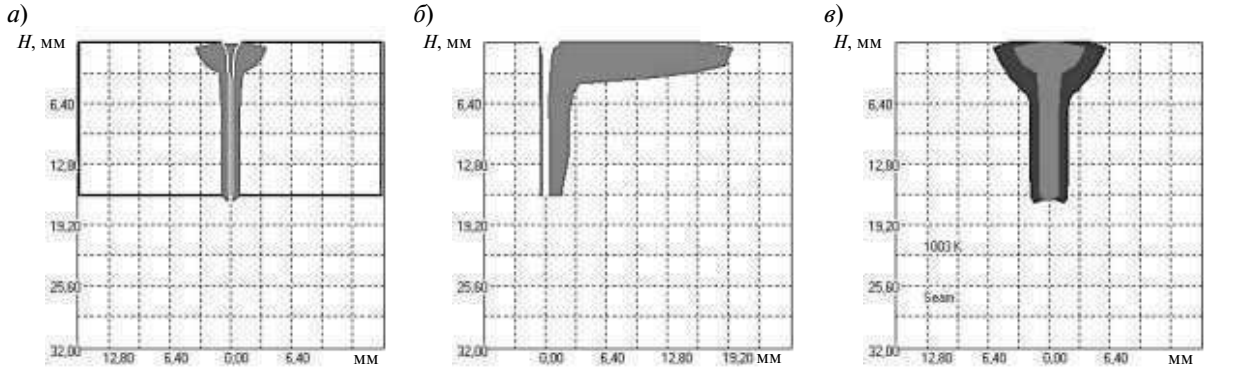


Рис. 2. Лазерно-дуговая сварка в нижнем пространственном положении: *а* — зона проплавления; *б* — сварочная ванна (продольный вид), *в* — сварное соединение

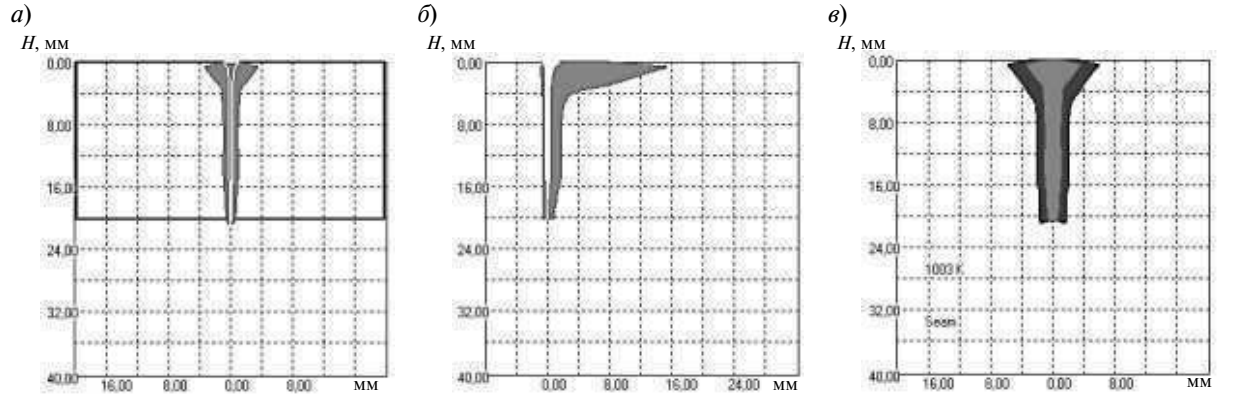


Рис. 3. Лазерно-дуговая сварка в верхнем пространственном положении: *а* — зона проплавления; *б* — сварочная ванна (продольный вид); *в* — сварное соединение

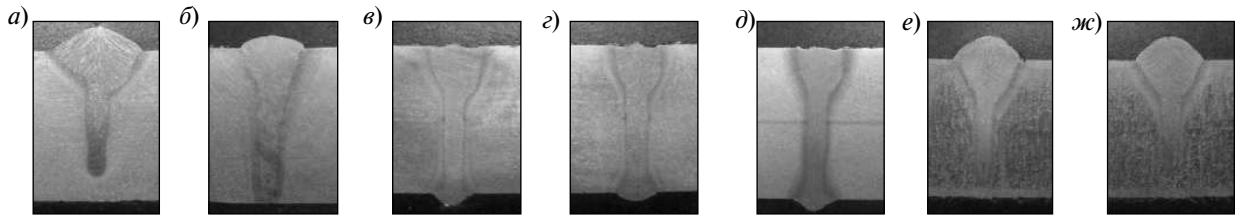


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений, образованных при различном расстоянии (указано в мм) между лучом лазера и электродом: *а* — 0; *б* — 1; *в* — 2; *г* — 3; *д* — 3,5; *е* — 4; ж — 5 мм

Из фотографий макрошлифов, представленных на рис. 4, видно, что наибольшая глубина проплавления (сквозное проплавление) получена при расстояниях между лучом лазера и электродом 2–3,5мм.

Анализ процесса лазерно-дуговой сварки с использованием скоростной видеосъемки (скорость съемки — 2000 кадров/сек) позволил объяснить данную зависимость. При $\Delta l = 0$–1 мм часть энергии лазерного излучения расходуется на плавление электрода, при этом процесс сварки нестабилен. При $\Delta l = 2$–3,5 мм лазерное излучение взаимодействует с расплавленным металлом в кратере дуговой ванны (область катодного пятна), при этом наблюдается стабильный процесс сварки. При $\Delta l = 4$–5 мм ла-

Рис. 5. Кадры скоростной видеосъемки лазерно-дуговой сварки при различном расстоянии (указано в мм) между лучом лазера и электродом: *а* — 0; *б* — 1; *в* — 2; *г* — 3; *д* — 3,5; *е* — 4; *ж* — 5 мм

зерное излучение взаимодействует с расплавленным металлом в задней части дуговой ванны с образованием нестабильного процесса сварки (рис. 5).

Результаты дальнейшего исследования геометрии сварных соединений и расчета эффективности процесса ЛДС приведены в таблице.

На рис. 6 представлены графики зависимости от расстояния между лучом лазера и электродом коэффициента формы проплавления, площади проплавления и термодинамического КПД процесса ЛДС.

Как следует из таблицы и рис. 4, максимальное значение термодинамического КПД — 31,8 % — было зафиксировано при расстоянии между лучом лазера и электродом, равным 3 мм. При этом сварное соединение не имело наплавленного валика — объем протекшего металла составлял около 33 % от объема металла сварного шва. По-видимому, при оптимизации параметров режима лазерно-дуговой сварки можно получить более высокое значение термодинамического КПД (около 40 %), что немаловажно при внедрении ЛДС в промышленность. Основной причиной протекания является сила тяжести, которая при значительных размерах ванны расплава, характерных для сварки металлов больших толщин за один проход, значительно превосходит силу поверхностного натяжения. При наличии дополнительной мощности лазерного излучения данная проблема решается за счет увеличения скорости сварки и, как следствие, кристаллизации расплава. Данную проблему можно также решить с помощью дополнительных операций, таких, как разделка кромок, использование керамических подкладок или флюсовой «подушки» для поддержания ванны расплава, либо за счет значительного увеличения расстояния между лучом лазера и электродом при опережающем положении луча лазера. Но последний вариант скорее похож на сварку за два прохода с незначительным перемешиванием легирующих элементов присадочной проволоки по сечению металла шва.

Геометрия сварных соединений и эффективность сварки.

Δl, мм	a, мм	b, мм	Ψ	$S_{пр}$, мм^2	$Q_{св}$, Квт	$Q_{ст}$, кВт	$\eta_{тд}$, %
0	7,7	12,9	0,6	33,5	24,8	6,9	27,9
1	5,7	15	0,38	34,5	25,4	7,1	28,1
2	4,2	16	0,26	38,4	25,6	7,9	31
3	3,4	16	0,21	39,7	25,8	8,2	31,8
3,5	4,3	16	0,27	35,6	25,8	7,4	28,5
4	6,6	14,3	0,46	32,3	25,8	6,7	25,9
5	6,5	12,7	0,51	30,9	25,8	6,4	24,7

Примечание: a — ширина шва на поверхности пластины, мм; b — глубина проплавления, мм; Ψ — коэффициент формы проплавления ($\Psi = a/b$); $S_{пр}$ — площадь проплавления, мм^2; $Q_{св}$ — энергия на выходе из источников, кВт; $Q_{ст}$ — энергия аккумулированная в стыке, кВт; $\eta_{тд}$ — термодинамический КПД, %.

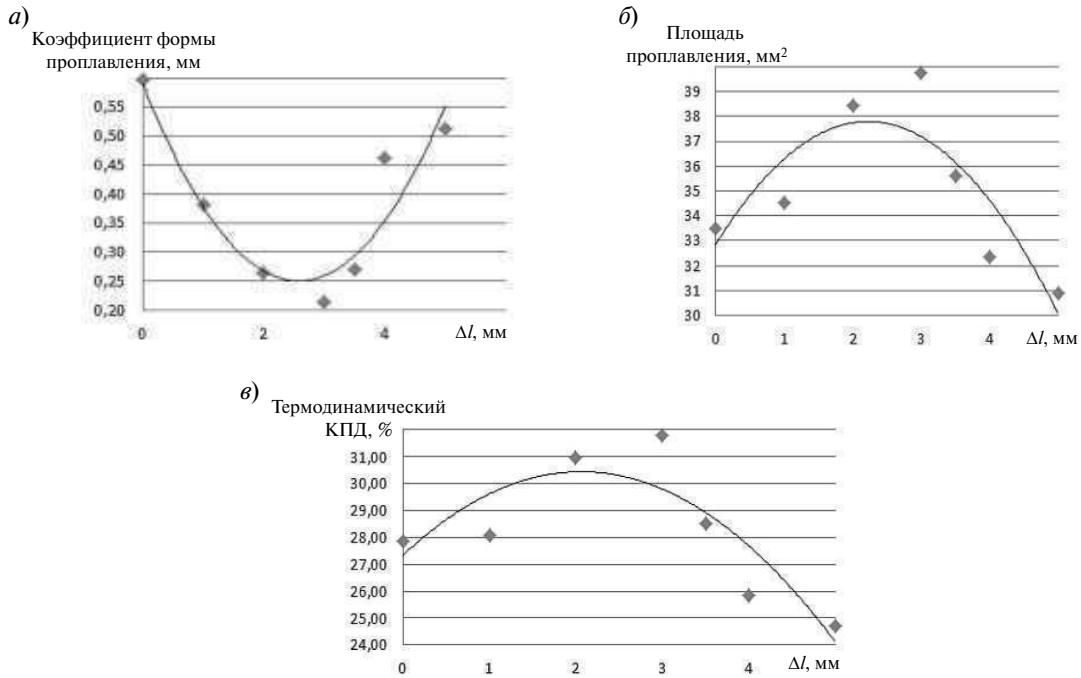


Рис. 6. Влияние расстояния Δl между лучом лазера и электродом на коэффициент формы проплавления (*а*), площадь проплавления (*б*) и термодинамический КПД процесса лазерно-дуговой сварки (*в*)

В статье предлагается иной вариант решения проблемы — ЛДС в вертикальном пространственном положении.

Лазерно-дуговая сварка в вертикальном пространственном положении

При ЛДС в ВПП, как и при сварке в НПП, одним из параметров, определяющих формирование сварного соединения, является относительное положение лазерного луча и электрода. Здесь также возможны два направления перемещения источника нагрева: сварка на спуск и сварка на подъем. При этом возможны две схемы расположения источников (рис. 7): как при опережающем положении дуги, так и при опережающем положении лазерного луча.

Наиболее стабильное сквозное проплавление образовалось при сварке на спуск с опережающим положением дуги. При данном положении дуга не только подогревает металл перед лучом лазера, но и поддерживает ванну расплава.

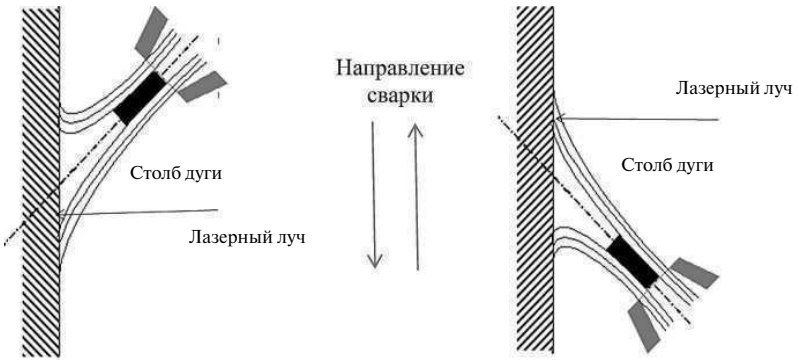


Рис. 7. Схемы процесса ЛДС плавящимся электродом вертикальных стыков

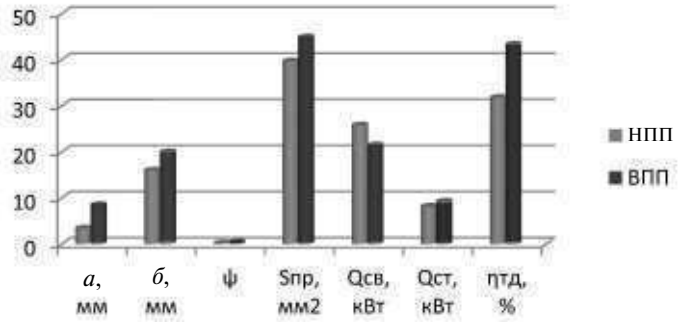


Рис. 9. Диаграмма сравнения геометрии сварных соединений и эффективности лазерно-дуговой сварки в НПП и ВПП

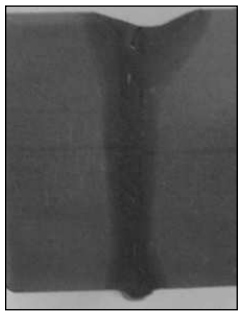


Рис. 8 . ЛДС в вертикальном пространственном положении:
$P_л$ = 15кВт; $V_{п\,п}$ = 12,5 м/мин;
$V_{св.}$ = 25 мм/сек

При низкой скорости сварки либо высокой скорости подачи присадочной проволоки расплавленный металл также вытекает из ванны. В данном случае решение проблемы было найдено при образовании зазора между свариваемыми пластинами, который заполнялся излишком расплавленного металла. При этом появилась возможность образования стабильного сквозного проплавления при ЛДС пластин толщиной 20 мм за один проход без вытекания расплава (рис. 8). Эффективность процесса ЛДС в ВПП характеризуют следующие результаты:

a, мм 8,5
b, мм 20
Ψ 0,42
$S_{пр}$, мм^2 44,87
$Q_{св}$, Квт 21,44
$Q_{ст}$, кВт 9,27
$\eta_{тд}$, % 43,3

На рис. 9 приведена диаграмма, где наглядно сравниваются основные характеристики геометрии сварных соединений и термодинамический КПД процессов сварки, ведущихся в различных пространственных положениях.

Из диаграммы видно: в варианте ЛДС в ВПП при меньшей мощности источников нагрева большее количество энергии концентрируется в зоне стыка и, как следствие, образуется сварной шов с большим (приблизительно на 36 %) значением термодинамического КПД по сравнению с ЛДС в НПП. При этом удалось решить проблему протекания расплавленного металла.

По-видимому, немалую роль в эффективности лазерно-дуговой сварки в ВПП также играет и зазор. Данный вопрос в дальнейшем планируется исследовать более детально.

Максимальное значение термодинамического КПД лазерно-дуговой сварки достигается при взаимодействии лазерного излучения с расплавленным металлом в кратере дуговой ванны (область катодного пятна) и составляет около 40 %.

При ЛДС пластин толщиной 16 мм в НПП для образования стабильного сквозного проплавления без протекания расплава необходимы скорость сварки свыше 2,4 м/мин и, как следствие, дополнительная мощность лазерного излучения.

При ЛДС с максимальной мощностью лазерного излучения 15 кВт можно получить стабильное сквозное проплавление без протекания расплава толщиной в ВПП около 20 мм, в НПП — 12 мм.

Эксперименты показали, что величина зазора между свариваемыми пластинами оказывает влияние на эффективность ЛДС. Данный вопрос планируется исследовать в дальнейшем.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №14.527.12.0027 от 20.10.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moore, P.L.** Development of Nd:YAG Laser and Laser / MAG Hybrid Welding for Land Pipeline Application [Text] / P.L. Moore, D.S. Howse, E.R. Wallach // Welding and Cutting.— 2004. №4.— P. 186–190.

2. **Томи, С.** Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа [Текст] / С. Томи, Т. Зефелд // Автоматическая сварка.— 2006. №6.— С. 36–9.

3. **Nilsson, K.** Parameter Influence in CO2-laser/MIG Hybrid Welding [Text] / K. Nilsson, K. Heimbs, H. Engstrom, A.F.H. Kaplan // Proc. of Int. Conf IIW Doc. IV-843–03, 2003.— P. 17–23.

4. **Туричин, Г.А.** Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин [Текст] / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №4(110).— С. 181–187.

5. **Matsuda, J.** Tig or MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate [Text] / J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamasaki, S. Nagata // Joining and Materials.— 1988. №7.— P. 31–34.

6. **Verwimp, J.** Hybrid Nd:YAG/GMAW Welding of Ultra High Strength Steel [Text] / J. Verwimp, J. Gedopt, G. Maes, W.V. Haver // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Aplication».— Russia. Saint-Petersburg, 2009.— P. 315–321.

7. **Шелягин, В.Д.** Лазерная и лазерно-дуговая сварка сталей в защитных газах / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, А.В. Сиора [и др.] // Автоматическая сварка.— 2007. №1.— С. 34–38.

8. **Туричин, Г.А.** Теория и технология гибридной сварки металлов больших толщин [Текст] / Туричин Г.А., Цибульский И.А., Валдайцева Е.А., Карасев М.В. // 6-я Междунар. конф. «Лучевые технологии и применение лазеров». Россия, Санкт-Петербург, 2009.— С. 11–18.

9. **Adamiec, J.** Hybrid Welding of Sheet Pile Walls by Light Waveguide Laser [Text] / J. Adamiec, P. Adamiec, M. Wiecek // Welding International.— 2008. Vol. 22, №6.— P. 393–396.

10. **Hyatt, C.V.** Laser-Assisted Gas Metal Arc Welding of 25-mm-Thick HY-80 Plate [Text] / C.V. Hyatt, K.H. Magee, J.F. Porter [et all.] // Welding Research Supplement.— 2001. July.— P. 163–172.

11. **Dilthey, U.** Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes [Text] / U. Dilthey, A. Wieschemann // Proc. of the IIW International Conference «The Human Factor and its Environment». Lissabon, 1999.— P. 29–44.

12. **Rethmeier, M.** Perspectives of Application of Laser-GMA-Hybrid Girth Welding for Pipeline Construction [Text] / M. Rethmeier, S. Gook, A. Gumenyuk // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Aplication». Russia, Saint-Petersburg.— 2009.— P. 278–288.

REFERENCES

1. **Moore P.L., Howse D.S., Wallach E.R.** Development of Nd:YAG Laser and Laser /MAG Hybrid Welding for Land Pipeline Application [Text] // Welding and Cutting.— 2004. №4.— P. 186–190.

2. **Thomy S., Zefeld T.** Feature of Hybrid Laser-arc Welding with Melted Electrode in Shielding Gas [Text] // Avtomaticheskaya svarka.— 2006. №6.— P. 36–39(rus.).

3. **Nilsson K., Heimbs K., Engstrom H., Kaplan A.F.H.** Parameter Influence in CO2-laser/MIG Hybrid Welding [Text] // Proc. of Int. Conf IIW Doc. IV-843–03.— 2003.— P. 17–23.

4. **Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V.** Hybrid Laser-arc Welding of Thickness Metals [Tekst] // Nauchno-technicheskie vedmosti SPbGPU.— 2010. №4(110).— P. 181–187. (rus.)

5. **Matsuda J., Utsumi A., Katsumura M., Hamasaki M., Nagata S.** Tig or MIG Arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate[Text] // Joining and Materials.— 1988. №7.— P. 31–34.

6. **Verwimp J., Gedopt J., Maes G., Haver W.V.** Hybrid Nd:YAG/GMAW Welding of Ultra High Strength Steel [Text] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Aplication».— Russia, Saint-Petersburg.— 2009.— P. 315–321.

7. **Schelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Siora A.V. [et all.].** Laser and Laesr-arc Welding in Shielding Gases [Tekst] // Avtomaticheskaya svarka.— 2007. №1.— P. 34–38. (rus.)

8. **Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Valdaytseva E.A., Karasev M.V.** Hybrid Welding Theory and Tehnology of Thickness Metal [Tekst] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Aplication».— Russia, Saint-Petersburg, 2009.— P. 11–18. (rus.)

9. **Adamiec J., Adamiec P., Wiecek M.** Hybrid Welding of Sheet Pile Walls by Light Waveguide Laser [Text] // Welding International.— 2008. Vol. 22, №6.— P. 393–396.

10. **Hyatt C.V., Magee K.H., Porter J.F., Merchant V.E., Matthews J.R.** Laser-Assisted Gas Metal Arc Welding of 25-mm-Thick HY-80 Plate [Text] // Welding Re-search Supplement.— 2001. July.— P. 163–172.

11. **Dilthey U., Wieschemann A.** Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes // Proc. of the IIW International Conference «The Human Factor and its Environment»/ Lissabon, 1999.— P. 29–44.

12. **Rethmeier M., Gook S., Gumenyuk A.** Perspectives of Application of Laser-GMA-Hybrid Girth Welding for Pipeline Construction [Text] // Proc. of the 6 Int. Conf. «Beam Technology and Laser Aplication», Russia, Saint-Petersburg, 2009.— P. 278–288.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук, профессор заместитель директора Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: gleb@ltc.ru

ЦИБУЛЬСКИЙ Игорь Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: igor@ltc.ru

КУЗНЕЦОВ Михаил Валерьевич — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kuznetsov_mich@ltc.ru

АХМЕТОВ Александр Дмитриевич — инженер научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

ВЕЛИЧКО Ольга Валерьевна — генеральный директор общества с ограниченной ответственностью «Центр лазерных технологий»; 194354, пр. Луначарского д. 13 к 1, Санкт-Петербург, Россия.

AUTHORS

TURICHIN Gleb A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: gleb@ltc.ru

TSIBULSKIY Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: igor@ltc.ru

KUZNETSOV Mikhail V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kuznetsov_mich@ltc.ru

AKHMETOV Alexander D. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

VELICHKO Olga V. — Limited Liability Company «Center of Laser Technologies»; Lunacharskogo Pr. 13 K. 1, St. Petersburg, Russia.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 669.295:669.018

Е.В. Миронова

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20 С ПРИМЕНЕНИЕМ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ И АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФАЗ

E.V. Mironova

CHOICE OF OPTIMUM MODE OF HEAT TREATMENT OF THE TITANIC BT20 ALLOY WITH APPLICATION OF A QUANTITATIVE METALLOGRAPHY AND ANALYSIS OF CHEMICAL PHASES COMPOSITION

В работе представлены результаты структурно-фазовых, химических и физико-механических свойств промышленных заготовок из сплава ВТ20. Изучены особенности структурно-фазовых превращений и сопутствующего перераспределения легирующих элементов в зависимости от широкого интервала температур нагрев. Предложен оптимальный режим термической обработки.

СПЛАВЫ ТИТАНА. СТРУКТУРА. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ТЕРМООБРАБОТКА.

In work results of structural and phase, chemical and physicomechanical properties of industrial preparations from BT20 alloy are presented. Features of structural and phase transformations and accompanying redistribution of alloying elements depending on a wide interval of temperatures heating are studied. The optimum mode of heat treatment is offered.

ALLOYS OF THE TITAN. STRUCTURE. CHEMICAL COMPOSITION. MECHANICAL PROPERTIES. HEAT TREATMENT.

Титановые сплавы — перспективные материалы для отдельных элементов конструкций авиастроения, что обусловлено их большой удельной прочностью, немагнитностью, коррозионной стойкостью [1].

Целью работы было установление зависимостей между параметрами структуры, химического состава отдельных фаз и механическими свойствами сплавов титана.

Материалом для исследования служили заготовки из сплава титана ВТ-20, полученные в результате деформации со степенью 80 % в β–(α+β)-областях и последующего ускоренного охлаждения — душирования (исходное горячедеформированное состояние). После этого заготовки повторно нагревали в интервале температур 700–1050 °С в течение 5 часов с охлаждением на воздухе [2–6].

Исследования проводились с применением качественной и количественной металлографии, а также микрорентгеноспектрального анализа. Применение микровизора μVizo-MET позволило работать при увеличениях до 3000 раз благодаря большой глубине резкости. Применение инвертированного металлургического микроскопа серии IM7000 MEIJI TECHNO с анализатором изображения Thixomet дало возможность получить количественные характеристики параметров структуры и панорамные изображения размером в несколько десятков полей зрения (рис. 1).

В таблице представлены результаты оценки следующих структурных параметров: ширины пластин α-фазы, толщины прослоек β-фазы, содержания и дисперсности прослоек β-фазы.

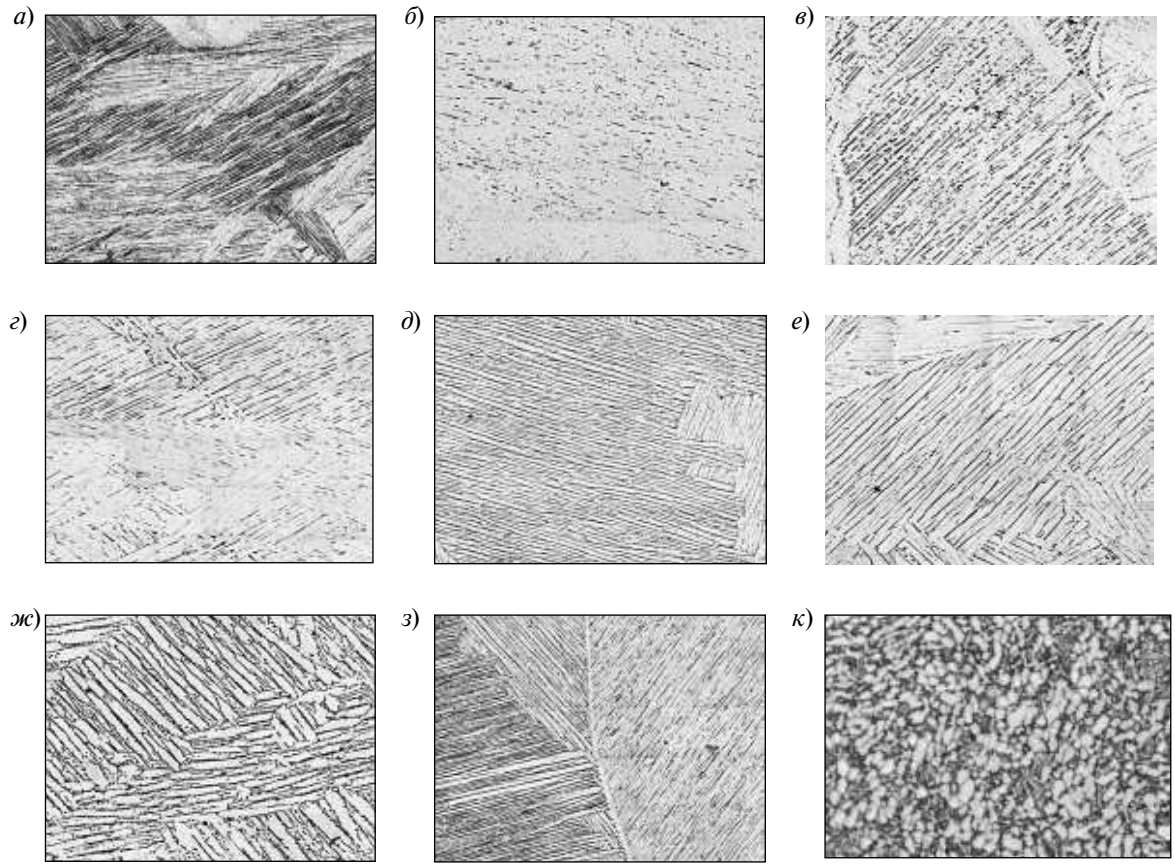


Рис. 1 Панорамные изображения (×200) сплава титана ВТ20 как в исходном состоянии (*а*), так и после отжига при температурах 800 (*б*), 850 (*в*), 880 (*г*), 950 (*д*), 970 (*е*), 1000 (*ж*) и 1050 (*з*); бимодальная структура сплава ВТ20

Числовые параметры оценки ширины пластин α-фазы, толщины прослоек β-фазы, содержания и дисперсности прослоек β-фазы

Образец	Средняя ширина пластин α-фазы, мкм	Средняя толщина β-прослоек, мкм	Средняя дисперсность β-фазы, мм$^{-1}$	Среднее содержание β-фазы, %
Исходный	2,09	0,45	11,94	20
После отжига при 800 °С	6,66	0,78	27,93	4,3
После отжига при 820 °С	4,07	0,88	23,64	5,2
После отжига при 850 °С	3,95	1,06	14,38	8,8
После отжига при 880 °С	2,99	0,55	31,57	5,3
После отжига при 950 °С	3,64	0,68	8,57	16
После отжига при 970 °С	4,35	0,91	8,84	13
После отжига при 1000 °С	5,54	0,9	4,52	20
После отжига при 1050 °С	1,24	0,47	15,53	26

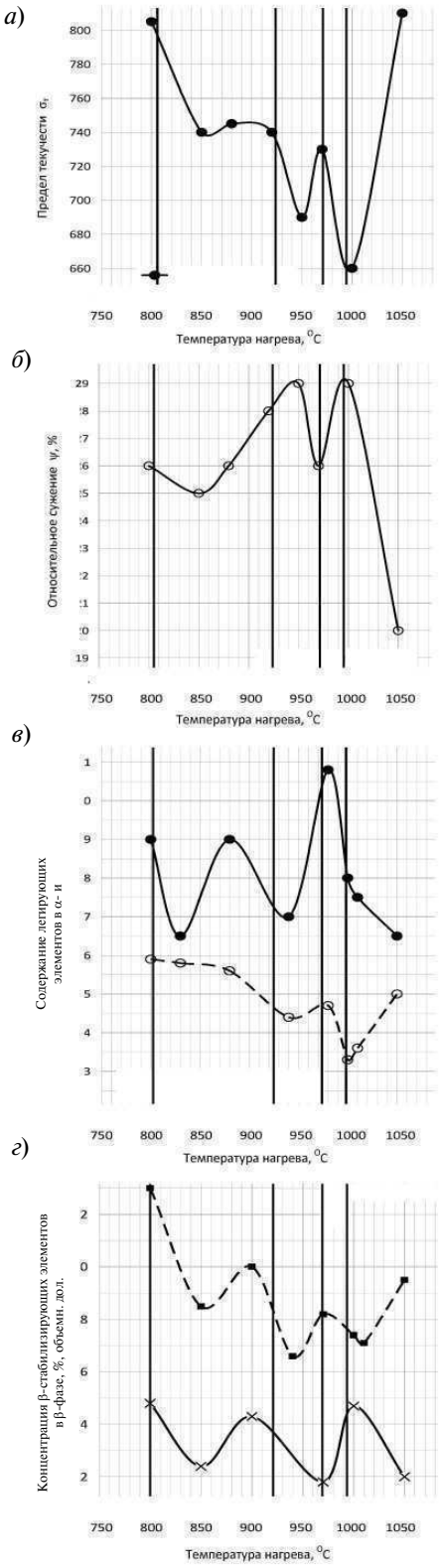


Рис. 2. Зависимости от температуры нагрева предела текучести (*а*), относительного сужения (*б*), содержания AL в α-фазе (–●–) и β-фазе (–○–) (*в*), концентрации V (–×–) и Zr (–■–) в β-фазе (*г*)

Как показали результаты, полученные с помощью микровизора μVizo-MET и анализатора изображения Thixomet, в сплаве оптимальные структурные составляющие были получены после отжига при температуре 800 °С, т. е. нагрева в верхней части α-области, вблизи нижней точки фазового α→(α+β)-превращения.

Анализ полученных результатов (см. табл.) показал, что при этом достигались максимальная ширина пластин α-фазы (6,66 мкм), средняя толщина β-прослоек (0,8 мкм) и их дисперсность (155 мм$^{-1}$), а также минимальное содержание β-прослоек (4,3 %).

Как показал микрорентгеноспектральный анализ (рис. 2) в прослойках β-фазы содержалось повышенное количество β-стабилизирующих элементов (например, ванадия 4,3 %). Это свидетельствует о распаде малолегированной β-фазы и увеличении концентрации β-стабилизирующих элементов в оставшихся β-прослойках. Такая β-фаза оказывается более мягкой, повышает пластические и эксплуатационные свойства.

На рис. 2 представлены результаты изменения кратковременных механических свойств сплава ВТ-20 — прочностных ($\sigma_т$) и пластических (ψ) — после различных температур отжига (800, 850, 880, 950, 970, 1000 и 1050 °С).

Известно, что эксплуатационные свойства двухфазных (α+β)-сплавов титана оказываются оптимальными в случае, когда α- и β-фазы равнопрочные, т. е. при эксплуатации длительное время не происходит локализации пластической деформации в отдельных структурных и фазовых составляющих [1, 9–10].

В работе установлен оптимальный температурно-временной интервал термической обработки исследуемого горячедеформированного титанового сплава — 800 °С, 5 ч., воздух, соответствующий распаду твердых β-прослоек обогащенных α-стабилизирующими элементами и сохранению мягких прослоек β-фазы, обогащенных одноименными β-стабилизирующими легирующими элементами. Формирование оптимальной структуры в титановых сплавах дало возможность получить при высоких прочностных характеристиках повышенные значения их вязко-пластических и служебных свойств [6–8].

Проведенные комплексных исследования температурно-временных особенностей форми-

рования и распада неравновесных твердых растворов позволили осуществить повышение качества титановых заготовок путем создания регламентированной структуры металла с заданными и стабильными физико-механическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глазунов, С.Г**. Конструкционные титановые сплавы [Текст] / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев // М.: Металлургия, 1974.— С. 368.

2. **Parshin A.M., Ushkov S.S., Skotnikova M.A.** Decomposition Diagram and Heat-treatment Schedule of α-alloy of Titanium [Text].— Eighth World Conference «Titanium 95», Birmingham, UK.— 1996.— P. 2515–2522.

3. **Skotnikova, M.A.** Decomposition of Nonequilibrium Solid Solutions and Mechanical Properties of Titanium Alloys [Text] / M.A. Skotnikova, S.S. Ushkov // Proc. of the 9th World Conference on Titanium.— Saint-Petersburg, Russia 1999.— Science and Technology.— 2000. Vol. 1.— P. 414–421.

4. **Скотникова, М.А.** Диаграмма распада и режим термической обработки двухфазных сплавов титана [Текст] / М.А. Скотникова, А.М. Паршин // Металловедение и термическая обработка металлов.— 1997. № 7.— С. 31–37.

5. **Скотникова, М.А.** Разработка научного принципа выбора окончательной термической обработки двухфазных горячедеформированных полуфабрикатов из сплавов титана [Текст] / М.А. Скотникова, С.С. Ушков // Прогрессивные материалы и технологии ЦНИИ КМ Прометей.— 1999. Вып. 3.— С. 91–98.

6. **Скотникова, М.А.** Изучение структурно-фазовых превращений и свойств, как способ совершенствования технологии производства и термообработки деформированных полуфабрикатов из сплавов титана [Текст] / М.А. Скотникова // MORINTECH-97 The Second International Conference and Exhibition On Marine Intellectual Technologies.— Russia, Saint-Petersburg.— 1997. Vol. 4.— P. 251–255.

7. **Скотникова, М.А.** Выбор оптимальной структуры и свойств деформированных полуфабрикатов титана после термической обработки [Текст] / М.А. Скотникова // Новые материалы и технологии машиностроения: Сб. статей / МГАТУ.— М., 1994.— С. 44.

8. **Скотникова, М.А.** Повышение вязко-пластических свойств сплавов титана в связи с особенностями микрораспределения легирующих элементов [Текст] / М.А. Скотникова, Е.З. Степанов// Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки.— Л., ЛДНТП, 1989.— С. 87–90.

9. **Скотникова, М.А.** Использование титановых сплавов в качестве материала лопаток паровых турбин [Текст] / М.А. Скотникова, Т.А. Чижик, А.А. Ланина, [и др.] // Вопросы материаловедения, №3(51).— 2007.— С. 61–70;

10. **Скотникова, М.А.** Исследование рабочих лопаток турбин большой мощности с учетом структурно-фазовых превращений в металле штамповок из титанового сплава ВТ6 [Текст]/ М.А. Скотникова, Т.А. Чижик, А.С. Лисянский [и др.] // Журнал «Металлообработка».— СПб.— 2009. № 6(54).— С. 12–21.

REFERENCES

1. **Glazunov S.G., Moiseyev V. N.** Constructional titanic alloys [Tekst].— M: Metallurgy, 1974.— P. 368. (rus.)

2. **Parshin A.M., Ushkov S.S., Skotnikova M.A.** Decomposition Diagram and Heat-treatment Schedule of α-alloy of Titanium [Text].— Eighth World Conference «Tita-nium 95», Birmingham, UK.— 1996.— P. 2515–2522.

3. **Skotnikova M.A., Ushkov S.S.** Decomposition of Nonequilibrium Solid So-lutions and Mechanical Properties of Titanium Alloys [Text] / Proceeding of the «9th World Conference on Titanium», Saint-Petersburg, Russia, 1999, Science and Technology.— 2000. Vol. 1.— P. 414–421.

4. **Skotnikova M. A. Parshin A.M.** Chart of disintegration and mode of a thermal obrakbotka of two-phase alloys of the titan [Tekst] // Metallurgical science and heat treatment of metals, 1997, No. 7, 31–37. (rus.)

5. **Skotnikova M. A. Ushkov S. S.** Development of the scientific principle of a choice of final heat treatment of two-phase hot-rolled semi-finished products from alloys of the titan [Text] // Progressive materials and technologies / Central Research Institute KM Prometheus.— 1999. № 3.— P. 91–98. (rus.)

6. **Skotnikova M. A.** Studying structural phase transformations and properties, as a way of improvement of a tekhkknologiya of production and heat treatment of the deformed semi-finished products from alloys of the titan [Text] // MORINTECH-97 The Second International Conference and Exhibition On Marine Intellectual Technologies. Russia, Saint-Peterskburg.— 1997. Vol. 4.— P. 251–255.(rus.)

7. **Skotnikova M. A.** Choice of optimum structure and properties of the deformed half-finished products of the titan after thermal processing// New materials and technologies of mechanical engineering / MGATU.— M., 1994.— P. 44 (rus.).

8. **Skotnikova M.A., Stepanov E.Z.** Increase of is viscous-plastic properties of alloys of the titan in connec-

tion with features of microdistribution of alloying elements [Tekst] // New steels and alloys, modes of their thermal processing.— L.: LDNTP, 1989.— P. 87–90. (rus.)

9. **Skotnikova M.A., Chizik T.A., Lanina A.A., Krylov N.A.** Use of titanic alloys as a material of shovels of steam turbines [Tekst] // Questions of materials science.— 2007. № 3(51).— P. 61–70. (rus.)

10. **Skotnikova M.A., Chizik T.A., Lisyansky A.S., Simin O.N., Tsybulina I.N., Lanina A.A.** Research of working shovels of turbines of big power taking into account structural and phase transformations in metal of stampings from a titanic alloy of VT6 [Tekst] // The Metalloobrabotka Magazine.— SPb.— 2009. № 6(54).— P. 12–21.(rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МИРОНОВА Екатерина Викторовна — аспирант кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: etyagunova@mail.ru

AUTHORS

MIRONOVA Ekaterina V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: etyagunova@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.182

М.А. Добротворский, Е.И. Масликова, Е.В. Новиков

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ НА ДОПУСТИМЫЕ СРОКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

A.M. Dobrotvorski, E.I. Maslikova, E.V. Novikov

EFFECTS OF THE HEAT-EXCHANGE MATERIAL STRUCTURE ON THE SERVICE LIFE OF THE OIL REFINERY EQUIPMENT

Рассматриваются вопросы влияния деградации структуры внутренней и наружной поверхностей труб печных змеевиков из хромомолибденовых сталей нефтеперерабатывающего оборудования на срок их эксплуатации. Выявлено обезуглероживание внутренней поверхности труб. Обнаружена нежелательная структурная составляющая — σ-фаза, возникновение которой связано с перегревом при образовании технологического осадка. Наличие ее затрудняет оценку остаточного ресурса по уровню механических свойств металла змеевиков. Предлагается, помимо плановых неразрушающих испытаний, проводить металлографические исследования структуры с внешней и внутренней сторон труб.

ПЕРЕРАБОТКА НЕФТИ. КАТАЛИТИЧЕСКИЙ РИФОРМИНГ. СРОКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ. ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

This article discusses the role of structural degradation of the inner and outside surface of chromium-molybdenum steel-coiled pipes on the service life of the oil refinery equipment. Decarbonizing of the inner surface of the pipes has been identified. The untoward structural cause is identified as σ-phase microconstituent, resulting from overheating due to technology sludge formation. This confounds the evaluation of the remaining life based on the level of the pipe metal stress-strain properties. Apart from the planned nondestructive evaluation, it is proposed to perform metallographic analysis of the inner and outside pipe surface.

OIL REFINING. CATALYTIC REFORMING. SERVICE LIFE. STRUCTURAL DEGRADATION. STRESS-STRAIN PROPERTIES.

Технологическое оборудование нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств эксплуатируется в условиях комплексного воздействия повышенных температур, давлений и агрессивных технологических сред, которые могут содержать в разных количествах водород, сероводород, меркаптаны, соединения хлора и другие коррозионно-активные компоненты. В первую очередь это относится к реакторным блокам технологических установок и технологическим печам. Воздействие агрессивных сред, особенно при повышенных температурах, приводит к постепенной деградации конструкционных материалов — сталей разных групп и классов, что может стать причиной отказов и аварий. По современной классификации нефтеперерабатывающие и нефтехимические заводы относятся к I классу опасности (опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности). Аварии на таких производствах сопряжены с большими материальными потерями, а в ряде случаев — с человеческими потерями. С целью обеспечения надежности и безопасности эксплуатации нефтезаводского оборудования предусмотрен целый ряд мероприятий по надзору и контролю за их состоянием. Требования к объему и качеству такого контроля постоянно увеличиваются, особенно в связи с переводом многих заводов на увеличенные сроки межремонтного пробега [1].

Наиболее уязвимы с точки зрения быстрого развития процессов деградации металла змееви-

ки трубчатых печей. В нефтепереработке используются печи разной конструкции, в которых осуществляется нагрев сырья до температур 300–900 °С. В условиях высоких температур, давлений и объемных скоростей сырьевых потоков, а также воздействия разогретых дымовых газов могут развиваться различные коррозионные и эрозионные процессы, приводящие в совокупности к потере прочности змеевиков, их формоизменению и, в конечном счете, к их разгерметизации, разрушению.

Основная причина ограничения срока службы печных змеевиков — тепловое старение под действием температурных и временных факторов, приводящее к изменению их микроструктуры и снижению длительной прочности металла [2]. Этому способствуют отклонения от технологического режима эксплуатации нагревательных трубчатых печей, сопряженные со значительным перегревом труб, что неизбежно ведет к аварийным остановкам производств.

Другая причина снижения долговечности змеевиков нагревательных и реакционных печей — воздействие технологической среды на металл труб. На внутренних поверхностях труб осаждаются продукты конденсации и частичного коксования углеводородов, соли недостаточно обессоленной нефти. Отложения снижают теплопередачу, увеличивают локальную температуру стенки и тем самым ускоряют процессы коксования. По аналогичному автокаталитическому механизму развивается сульфидная коррозия, вызываемая химическим взаимодействием металла с серосодержащими компонентами сырья. Отслоение продуктов коррозии приводит к утонению стенки трубы и локальному перегреву в местах утонения. Воздействие водорода приводит к обезуглероживанию сталей — водородной коррозии, связанной с распадом карбидов. В стояночных режимах печей они подвергаются коррозионному воздействию кислых продуктов разложения технологических отложений, контактирующих с влажным воздухом.

Для изготовления печных змеевиков в нефтехимическом производстве чаще всего применяются трубы из легированных коррозионностойких хромомолибденовых сталей 15Х5М, 15Х5МВФ, 15Х5М, 1Х2М1, Х9М. Так, большинство печных змеевиков установок каталитического риформинга, эксплуатируемых при 550–600 °С и давлении 3–5 МПа, выполнены из стали 15Х5М. При соблюдении требований технологических регламентов они надежно работают в течение 200000 ч (по результатам исследований длительной прочности) [3, 4]. Замена труб змеевиков обычно производится по истечении назначенного срока эксплуатации либо вследствие достижении отбраковочных характеристик — толщины, изменения диаметра, твердости (130–170 *HB* — для основного металла, 250 *HB* — для металла сварного шва [5]), либо при возникновении аварийных ситуаций.

В нашей работе было исследовано более 20 образцов стали 15Х5М, вырезанных из змеевиков камер радиации и конвекции после имевших место отказов или после плановой замены труб при истечении или превышении допустимого срока эксплуатации (см. таблицу).

Исследование образцов, вырезанных после плановой замены труб, эксплуатировавшихся при температуре 200–380 °С и давлении от 1,4 до 5 МПа, показало, что механические свойства большинства из них остаются в пределах, разрешенных нормативной документацией.

Исследование структуры сечения труб змеевиков выявило не только изменения, характерные для процессов теплового старения (коагуляция карбидов), но и обезуглероживание со стороны наружной, а нередко и внутренней поверхностей трубы (рис. 1).

Измерение твердости змеевика показало, что в большинстве случаев она ниже нормативной, а ее изменение в поперечном сечении подтвердило наличие обезуглероживания даже на тех образцах, на которых оно не обнаруживается структурным анализом (рис. 2). Так, например, в ряде случаев со стороны внутреннего края наблюдается относительно высокая плотность карбидов по сравнению с центральной частью сечения, что, видимо, послужило причиной распространенного мнения о науглероживании внутренней поверхности труб под воздействием углеводородов, содержащихся в технологических средах. Однако твердость таких участков сечения трубы на исследованных образцах оказалась ниже нормативной (рис. 3, *в*), что указывает на меньшую, чем со стороны наружной поверхности, интенсивность обезуглероживания.

Механические свойства печных змеевиков из стали 15Х5М после длительных сроков эксплуатации

Количество образцов, причины вырезки металла	Длительность эксплуатации	Условия эксплуатации			Механические свойства
		t, °С	Р, МПа	Среда	
высокая твердость	172800–285120 час (20–33года)	380–520	0,64–3,8	Нефтепродукт	$\sigma_{в}$ _ до 940–1146 МПа; $\sigma_{т}$ _ до 770–1043 МПа; δ = 7–20 %; *KCU* = 22–60 Дж/см^2
1 — разгерметизация после испытаний	362880 час (42 года)	480	5,0	Бензин + ВСГ	$\sigma_{в}$ = 1202,5 МПа; $\sigma_{т}$ = 1174 МПа; δ = 7 %; *KCU* = 8–9 Дж/см^2
1 - разгерметизация в процессе работы	362880 час (42 года)	480	5,0	Бензин + ВСГ	$\sigma_{в}$ = 552–608 МПа; $\sigma_{т}$ = 382–495 МПа; δ = 26–34 %; *KCU* = 277–301 Дж/см^2
1 - возгорание	285120 час (33 года)	235	1,40	Бензин НК-180	$\sigma_{в}$ = 495–506МПа; $\sigma_{т}$ = 223–230МПа; δ = 35,7–36,2 %; *KCU* = 207–264 Дж/см^2
10 — плановая замена	259200–293760 час (30–34 года)	200–380	1,4–5,0	Газосырьевая смесь	$\sigma_{в}$ = 477–540МПа; $\sigma_{т}$ = 230–290МПа; δ = 25–37 %; *KCU* = 154–305 Дж/см^2
2 — превышение срока эксплуатации	319600–359161 час (37–42 года)	350–450	1,0–5,0	Газосырьевая смесь	$\sigma_{в}$ = 477–481МПа; $\sigma_{т}$ = 255–262МПа; δ = 33–35 %; *KCU* = 296–310Дж/см^2

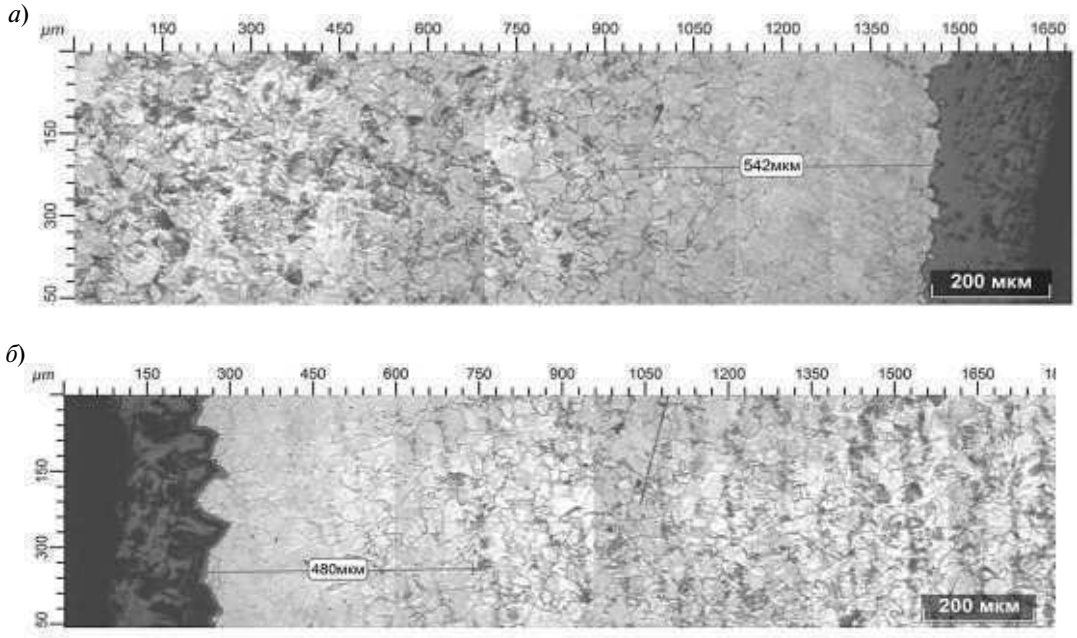


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения трубы змеевика камеры радиации (срок эксплуатации — 35 лет при *T* = 370 °С, *p* = 1,1 МПа): наружный край (*а*), внутренний край (*б*)

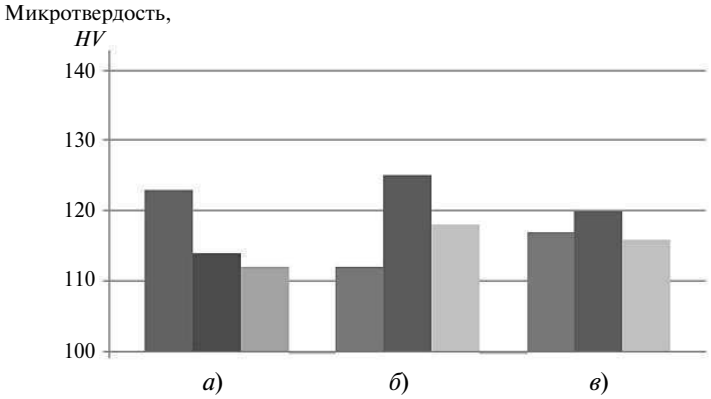


Рис. 2. Распределение твердости в поперечном сечении змеевиков из стали 15Х5М, отработавших 30–35 лет в условиях $T = 330$ °С, $p = 2{,}5$ МПа (*а*) и $T = 370$ °С, $p = 1{,}1$ МПа (*б*, *в*)
(■ — наружный край сечения трубы; ■ — центральная часть сечения трубы; ■ — внутренний край сечения трубы)

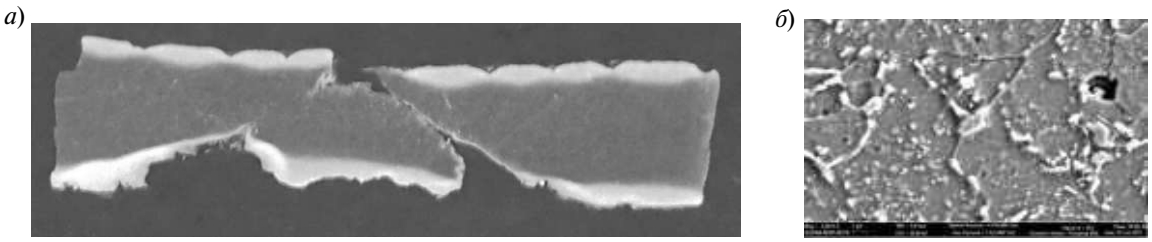


Рис. 3. Общий вид (*а*) и микроструктура (*б*) образца в зоне растрескивания

С учетом длительности процесса и состава сырья внутри змеевиков можно предположить наличие водородной коррозии на внутренней поверхности труб, первым признаком проявления которой является обезуглероживание [6, 7].

В аварийных ситуациях, связанных с возгоранием и разгерметизацией змеевика, в одних случаях имело место превышение нормативной ударной вязкости с изменениями в структуре, аналогичными тем, которые характерны для превышения срока эксплуатации, в других — значительное увеличение твердости (до 350–400 *HB*), прочности и падение ударной вязкости (см. табл.). В последнем случае изменения механических свойств связаны с охлаждением во время устранения аварии со скоростью, близкой к критической, и с температурами, превышающими критическую точку A_1, что привело к образованию бейнита или сорбита с твердостью, превышающей допустимую [8].

Перегревы вследствие нарушения теплового режима работы печи или из-за образования технологического осадка могут стать причиной образования в структуре такой опасной составляющей, как σ-фаза.

На рис. 3 представлен образец со сквозными трещинами для типичного случая аварийной ситуации — он вырезан из участка трубы в зоне утонения сечения. Со стороны внутренней поверхности отмечено скопление технологического осадка.

Измерение твердости вне зоны растрескивания (основной металл) показало, что со стороны наружного края и в центральной части она ниже нормативной (рис. 4). В зоне растрескивания со стороны наружного края наблюдается увеличение твердости по сравнению с основным металлом до 140 *HV*.

Вблизи наружного края сечения на границе зерна, где избыточная фаза образует сплошные цепочки, был проведен спектральный химический анализ с помощью многофункционального аналитического растрового электронного микроскопа Supra 55 VP. Обнаружено что со-

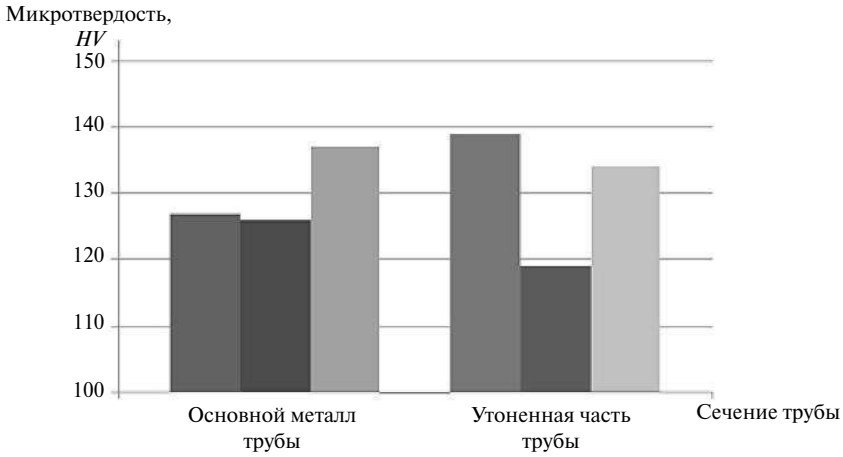


Рис. 4. Распределение твердости в основном металле трубы змеевика и в зоне растрескивания

(— наружный край сечения трубы; — центральная часть сечения трубы; — внутренний край сечения трубы)

держание хрома, железа и молибдена примерно соответствует составу σ-фазы, легированной молибденом, а именно:

C	1,43
Si	0,15
S	0,32
Cr	47,84
Mn	0,76
Fe	41,98
Ni	0,33
Mo	7,20
∑	100

Наличие σ-фазы, образующейся при температуре 700–800 °С, указывает на весьма высокие температуры, возникающие в отдельных частях змеевиков, преимущественно в участках перегибов. Появлению σ-фазы способствует также обезуглероживание наружной и внутренней поверхностей труб, снижающее долю карбидов хрома в структуре.

Таким образом, несмотря на то, что механические свойства металла змеевиков после длительных сроков эксплуатации остаются в пределах, разрешенных нормативной документацией, и, казалось бы, напрашивается вывод о возможности продления их срока эксплуатации [9], неравномерность фазового состава по сечению трубы затрудняет оценку остаточного ресурса. Нельзя не учитывать деградацию структуры со стороны внутренней и наружной поверхностей, что может представлять особую опасность в аварийных ситуациях [10].

Можно рекомендовать, помимо плановых неразрушающих испытаний, проводить металлографические исследования структуры с внешней и внутренней сторон труб. Периодичность таких исследований может быть определена сроками в 100, 200 и 300 тыс. часов эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добротворский, А.М.** Повышение надежности прогнозирования технического состояния нефтезаводского оборудования, работающего при высоких температурах [Текст] / А.М. Добротворский, В.Л. Соколов, А.В. Копыльцов [и др.] // Состояние и перспективы развития систем мониторинга технического состояния статического оборудования для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств: Матер. совещ.— М.: Изд-во ООО «НТЦ при Совете главных механиков», 2011.— С. 95–100.

2. **Mueller, F. Scholz, A.** C. Berger, Crack Behaviour of 10Cr-steels under Creep and Creep-Fatigue Conditions Institute of Materials Technology [Text].— Darmstadt University of Technolog. ECCC Creep Conference. 12–14 September 2005.— London.

3. **Теплова, Н.И.** Исследование устойчивости стали 15Х5М к воздействию технологической среды

[Текст] // Химическое и нефтегазовое машиностроение.— 2001. № 6.— С. 46–48.

4. **РД РТМ 38.14.006–66.** Методика определения сроков эксплуатации змеевиков печей установок каталитического риформинга, отработавших проектный ресурс [Текст] / ВНИКТИ нефтехимоборудования, ВНИИ нефтемашин, НПО «Леннефтехим», ВПО «Союзнефтеоргсинтез».— М., 1980.

5. **СТО-СА 03–004–2009.** Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке [Текст] / Ростехэкспертиза. Серия 03.— [Электрон. ресурс] // www.twirpx.com/file/604297/

6. **Арчаков, Ю.И.** Водородная коррозия стали [Текст] / Ю.И. Арчаков.— М.:Металлургия, 1985.— 192 с.

7. **Палий, Р.В.** Влияние водорода на механизм коррозионного разрушения промысловых трубопроводов [Текст] / Р.В. Палий, Н.Н. Прохоров, В.Д. Макаренко // Химическое и нефтегазовое машиностроение.— 2002. №5.— С. 47–49.

8. **Ватник, Л.Е.** Структура хромомолибденовых сталей змеевиков технологических печей нефтеперерабатывающих установок [Текст] / Л.Е. Ватник, И.А. Тришкина, Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич // Ремонт, восстановление, модернизация.— 2007. №5.— С. 48–53.

9. **Медведева, М.Л.** Об основных причинах отказов печных змеевиков на установках висбрекинга и путях их устранения [Текст] / М.Л. Медведева // Химия и технология топлив и масел.— 1998. №4.— С. 26.

10. **Grabke, H.J.** Korrosionsschäden— in petrochemischen Anlagen (Teil 2) [Text] // Metal Dusting, Materials and Corrosion.— 2003. Vol. 54, № 10.— S. 736–74.

REFERENCES

1. **Dobrotvorskii A.M., Sokolov V.L., Kopyl'tsov A.V.** [I dr.]. Povyshenie nadezhnosti prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia neftezavodskogo oborudovaniia, rabotaiushchego pri vysokikh temperaturakh [Tekst] // Sostoianie i perspektivy razvitiia sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia staticheskogo oborudovaniia dlia obespecheniia bezopasnoi i nadezhnoi ekspluatatsii neftepererabatyvaiushchikh i neftekh / Mater., sovesch.— M.: Izd-vo OOO «NTC pri Sovete glavnich mechanikov». 2011.— S. 95–100. (rus.)

2. **Mueller, F., Scholz, A., Berger, C.** Crack Behaviour of 10Cr-steels under Creep and Creep-Fatigue Conditions Institute of Materials Technology [Text]. Darmstadt University of Technology, ECCC Creep Conference, 12–14 September 2005, London.

3. **Teplova N.I.** Issledovaniye ustoychivosti stali 15Kh5M k vozdeystviyu tekhnologicheskoy sredy [Tekst] // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye.— 2001. № 6.— S. 46–48. (rus.)

4. **RD RTM 38.14.006–66.** Metodika opredeleniia srokov ekspluatatsii zmeevikov pechei ustanovok kataliticheskogo riforminga, otrabotavshikh proektnyi resurs [Tekst] / VNIKTI neftechimoborudovania, VNII neftemachin, NPO Lenneftechim, VPO Soyuznefteorgsintez.— M., 1980. (rus.)

5. **STO-SA 03–004–2009.**— Trubchatye pechi, rezervuary, sosudy i apparaty neftepererabatyvaiushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Trebovaniia k tekhnicheskomu nadzoru, revizii i otbrakovke [Tekst] / Rostekhekspertiza. Seria 03.— [Elektron. resurs] // www.twirpx.com/file/6042971/ (rus.)

6. **Archakov Yu.I.** Vodorodnaia korroziia stali [Tekst].— M.: Metallurgiia, 1985.— 192 s. (rus.)

7. **Palii R.V., Prokhorov N.N., Makarenko V.D.** Vliianie vodoroda na mekhanizm korrozionnogo razrusheniia promyslovykh truboprovodov [Tekst] // Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie.— 2002, №5.— S. 47–49. (rus.)

8. **Vatnik L.E., Trishkina I.A., Trykov Iu.P., Gurevich L.M.** Struktura khromomolibdenovykh stalei zmeevikov tekhnologicheskikh pechei neftepererabatyvaiushchikh ustanovok [Tekst] // Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia.— 2007. №5.— S. 48–53. (rus.)

9. **Medvedeva M.L.** Ob osnovnykh prichinakh otkazov pechnykh zmeevikov na ustanovkakh visbrekinga i putiakh ikh ustraneniia [Tekst] // Khimiia i tekhnologiia topliv i masel.— 1998, №4.— S.26. (rus.)

10. **Grabke H.J.** Korrosionsschäden— in petrochemischen Anlagen (Teil 2) Metal Dusting, Materials and Corrosion.— 2003. Vol. 54, № 10.— S. 736–74.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДОБРОТВОРСКИЙ Александр Мстиславович — доктор химических наук профессор, технический директор ЗАО НПО «Ленкор» ОАО ВНИИнефтехим; ул. Заозерная, 1, Санкт-Петербург, Россия; e-mail:npolencor@peterstar.ru

МАСЛИКОВА Елена Ивановна — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: lenamaslikova@inbox.ru

НОВИКОВ Евгений Васильевич — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: favor15@yandex.ru

AUTHORS

DOBROTVORSKI, **Alexander M**. — Zaozernaya str., 1. St. Petersburg, Russia; e-mail:npolencor@peterstar.ru

MASLIKOVA Elena I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: lenamaslikova@inbox.ru

NOVIKOV Evgeniy V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: favor15@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 66-9

С.В. Орлов, Я.С. Ватулин

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПЛАСТМАССОВЫХ ИЗДЕЛИЙ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

S.V. Orlov, Ya.S. Vatulin

THE AUTOMATED DESIGN OF EQUIPMENT FOR PLASTIC PRODUCTS OF MASS PRODUCTION

В статье представлен процесс проектирования литниковых систем для пластмассовых изделий,чье производство осуществляется на термопластавтоматах (KuASY, MONOmat, ДБ) литьем под давлением. Метод позволяет получать изделия сложной формы с глубокими полостями, с тонкой и сложной арматурой.

ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. МОДУЛЬ SOLIDWORKS. СЛОЖНАЯ ФОРМА. ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТ.

This paper presents the design process gating systems for plastic products. Manufacture of a product is carried out on KuASY, MONOmat injection molding machines under pressure. This method allows us to make products of complex form with deep cavities with thin and complex armature.

GATING SYSTEM. MODELLING. SOLID WORKS MODULE. COMPLEX FORM. INJECTION MOLDING MACHINE.

В производстве широко применяются технологические приспособления, выполненные из полиэтилена высокого давления [1] и используемые в качестве моделей для литейного производства заготовок ложементов и других упаковочных элементов.

Производство таких изделий осуществляется на термопластавтоматах (KuASY, MONOmat, ДБ) литьем под давлением термопластичных материалов через литниковую систему в оформляющие полости предварительно сомкнутой охлаждаемой формы. Метод позволяет получать изделия сложной формы с глубокими полостями, с тонкой и сложной арматурой.

К основным недостаткам данного метода относятся высокие трудоемкость и стоимость производства пресс-форм. Эффективность работы пресс-форм зависит от целого ряда взаимосвязанных характеристик: температурного градиента расплава вещества, скорости течения вещества по полостям формы, пространственной конфигурации литниковых каналов и их формы, поперечных размеров и класса чистоты поверхностей. Существующие практические рекомендации [2] по обеспечению рациональных условий течения материала в форме устанавливают пределы полей значений параметров, определяют требования к формообразующим полостям в зависимости от вязкости сырья, конфигурации изделия, места подвода литника [9]. При этом конструктору необходимо принимать во внимание фактор взаимосвязи градиентов скоростей движения, температуры и давления расплава.

На практике после изготовления пресс-формы выполняется корректировка ее литниковой системы, которая заключается в том, что выполненную по расчетам форму заполняют дозой расплава минимального объема. Определяют степень заполнения оформляющей полости. Производят расточку тоннельных и подводящих каналов. Вновь повторяют процедуру, увеличивая объем дозы вещества последовательно от цикла к циклу до величины, равной массе изделия. Технологическая операция расточки тоннельных каналов [7] — длительная и крайне трудоемкая процедура в производстве; кроме того, она не обеспечивает условий получения изделий с одинаковыми свойствами.

Таким образом, назначение конкретных параметров литниковой системы — по сути оптимизационная задача: требуется найти экстремум целевой функции (одновременное и полное заполнение формообразующих полостей термопластом при условии заданного температурного и скоростного градиентов [6]) в некоторой области конечномерного векторного пространства значений параметров каналов литниковой системы.

Возможность проследить характер взаимовлияния конструктивных параметров литниковой системы пресс-формы и технологических параметров подачи расплава сырья позволяет компьютерное моделирование в среде SolidWorks Flow Simulation [3, 5]. Этот модуль базируется на последних достижениях вычислительной газогидродинамики и позволяет рассчитывать широкий круг задач, рассматривающих трехмерные нестационарные течения многокомпонентных текучих сред в каналах различной конфигурации, с учетом теплообмена между сопряженными поверхностями. Движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье — Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды.

Постановка задачи. Необходимо изготовить корпусной элемент ложемента наградной медали, представляющий собой кольцо с внешним диаметром 150 мм, внутренним — 110 мм, толщиной 6,8 мм, с держателями, выполненными в виде приливов секторной формы, расположенными со стороны внутреннего кольца. Материал сырья — полиэтилен высокого давления (ГОСТ 16337–77) [1].

Геометрическая модель пресс-формы (рис. 1) представлена сборным металлическим цилиндром внутренними полостями различной конфигурации — литниковой системой. Литниковая система имеет один центральный литниковый канал, соединенный четырьмя разводящими каналами круглой формы с оформляющей полостью, в которой есть газоотводящий зазор по линии разъема корпуса пресс-формы.

Требуется определить необходимый размер и форму поперечных сечений каналов литниковой системы при условии соблюдения заданных градиентов температуры (от $t^0_{\text{распл}} = 190–220$ °С до $t^0_{\text{форм}} = 30–60$ °С), давления ($P_{\text{лит}} = 42–5$ МПа)

Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель пресс-формы (вырез четверти) — копия с экрана

и скорости (3–0 м/с) расплава при его прохождении от места подвода литника до формообразующих полостей.

Решение. При проектировании литниковой системы для полиэтилена (ГОСТ 16338–77) рекомендуется [2] добиваться такого расположения разводящих каналов, которое обеспечивает идентичные условия заполнения оформляющей полости расплавом полимера, а именно:

для снижения потерь давления при заполнении формы длина тоннельных каналов должна быть минимальной, а площадь их сечения — достаточно малой, чтобы обеспечить легкое отделение литника от изделия;

площадь сечения канала не должна быть слишком мала, так как это приводит к большим потерям давления, затрудняет заполнение формы, приводит к возникновению внутренних усадочных дефектов в зоне впуска (возможна также термическая деструкция материала из-за его перегрева при прохождении с высокой скоростью через канал малого сечения);

площадь канала не должна быть слишком велика, поскольку это усложняет отделение литников, приводит к излишнему уплотнению расплава увеличению внутренних напряжений в зоне впуска.

Примерные значения диаметра подводящих каналов можно определить по формуле методики [2]:

$$d_p = 0,2\sqrt{\frac{V}{\pi\upsilon\tau}},$$

где V — объем впрыска, см^3; υ — средняя скорость течения материала в литниковой втулке,

см/с; τ — продолжительность впрыска, с. Ориентировочное значение диаметра подводящего канала составляет 1,34 мм.

Продолжительность цикла литья в значительной степени зависит от эффективности отвода теплоты и степени нагрева изделия. Выдержка теплового режима позволяет получить стабильность размеров продукта, снизить внутренние напряжения, склонность к растрескиванию, усадку и коробление.

С помощью модуля SolidWorks Flow Simulation [10] можно выполнить виртуальное моделирование режима течения расплава по литниковой системе формы с учетом требуемых параметров градиентов давления и температуры.

Вначале выполняется моделирование теплового режима формы [3]: требуется получить такой градиент падения температуры по длине тоннельного канала, чтобы нижняя заданная граница температурного поля было бы расположено максимально близко к оформляющей полости (рис. 2 *а*, *б*).

Моделируя воздействие хладагента последовательной итерацией приложения тепловой нагрузки к поверхности пресс-формы, получили требуемый градиент падения температуры на участке от выпускного литника до оформляющей полости

Заданный градиент снижения давления расплава в процессе его течения по литниковой системе формы достигается за счет варьирования площади подводящих каналов (рис. 3, *а*, *б*).

В результате моделирования выявлены и устранены участки с резким повышением сопротивления движению расплава (защемление в узле соединения тоннельного канала с питателем). С целью компенсации потери давления участки, наиболее удаленные от места впрыска с максимальным сопротивлением течению, имеют коническую форму (с увеличением сечения на 1,5 % к периферии).

Наиболее проблематичными участками оказались питатели — короткие впускные каналы, соединяющие подводящие каналы

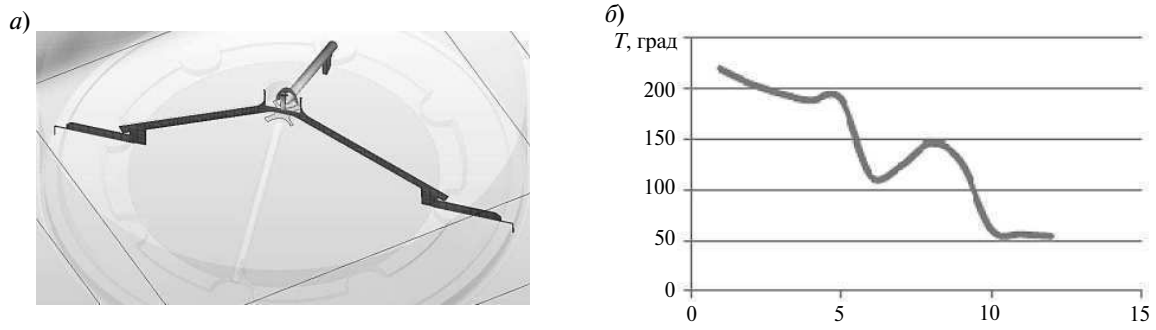


Рис. 2. Моделирование теплового режима поверхности впускного литника и сопряженного тоннельного канала: *а* — общий вид; *б* — график падения температуры по контрольным сечения подводящего канала

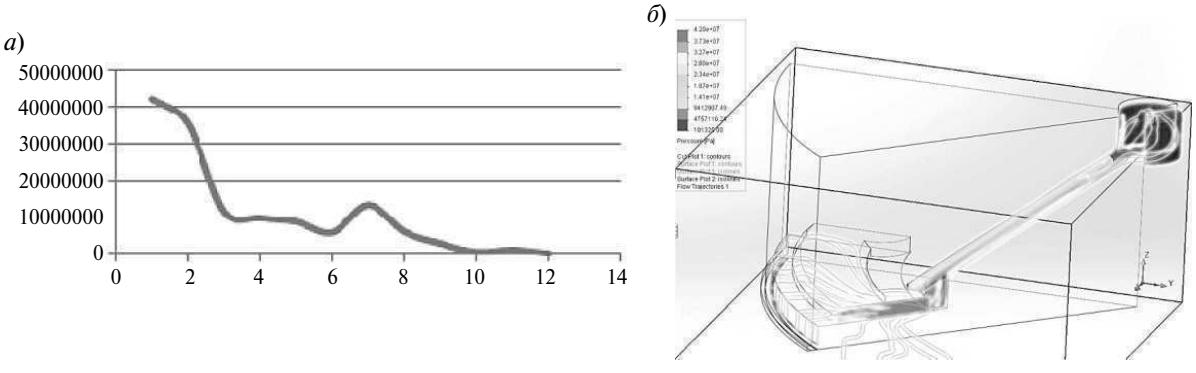


Рис. 3. Эпюра движения расплава по литниковой системе формы

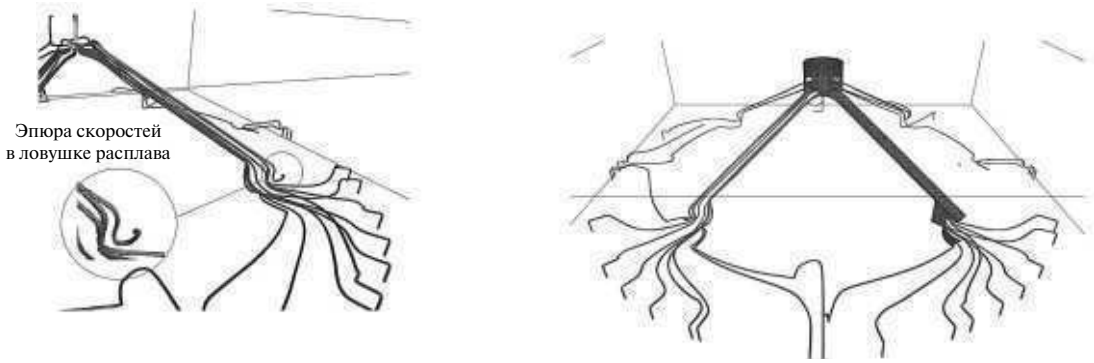
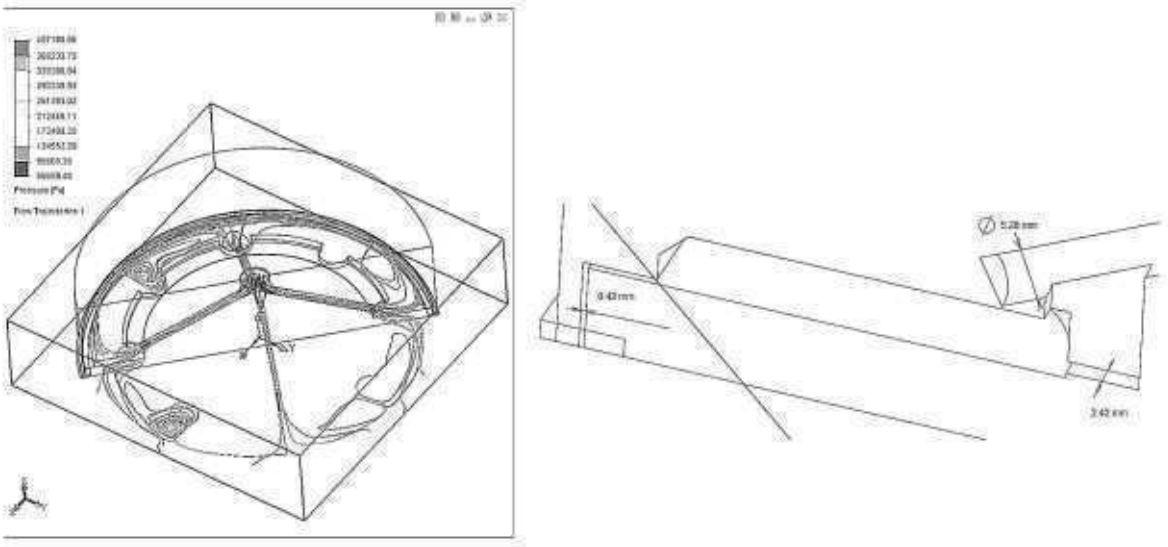


Рис. 4. Эпюра скоростей движения расплава в литниковой системе пресс-формы

а)



б)

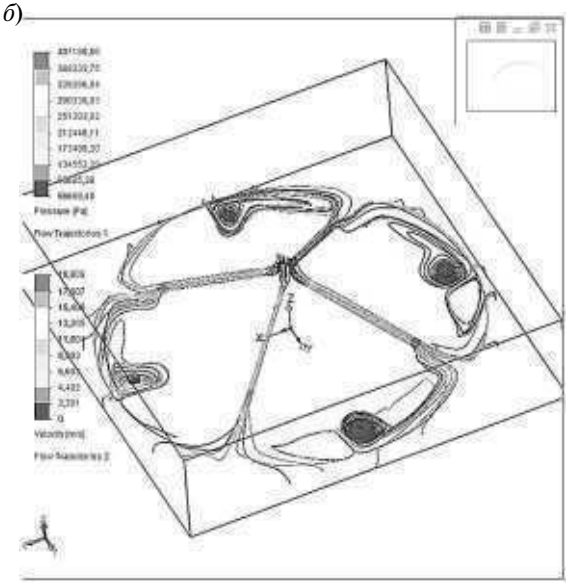


Рис. 5. Эпюра давления расплава в литниковой системе пресс-формы (шаг итерации) и основные параметры проходных сечений каналов (*а*) и совместная эпюра давления среды и температуры расплава (*б*) в процессе заполнения оформляющей полости

с оформляющей полостью пресс-формы. Задача питателей — направить струю расплава в дно полости, что обеспечивает рассеивание, способствующее равномерному заполнению полости расплавом материала. Из-за конструктивной особенности места сопряжения (резкий поворот струи расплава) образуется турбулентный режим течения, определяемый отношением площади отверстия к его периметру. Оптимизация размеров впускных каналов позволяет избежать появления дефектов в виде резко выраженных спаев в местах встречи потоков расплава, недоливов, прижегов.

К моменту достижения веществом участка, где сопрягается тоннельный канал с питателем, происходит охлаждение переднего фронта расплава (повышение вязкости), что может привести к временному блокированию дальнейшего движения потока и, как следствие, к образованию каверн. Для уменьшения этих явлений разводящий канал перед соединением с питателем рекомендуется оснастить специальными сборниками охлажденного расплава — ловушками (см. рис. 1) в виде удлинений за пределы соединения на величину 1,5*d*.

Полученная моделированием эпюра скоростей в процессе течения расплава (рис. 4) подтверждает факт входа переднего фронта расплава в зону ловушки, таким образом, проходное сечение питателя остается свободным. Тем не менее по результатам исследования видно, что заполнение оформляющей полости происходит неравномерно, имеют место участки с выраженными спаями в местах встречи потоков с охлажденными передними фронтами.

Причина данного явления — в недостаточной ширине питателей. Согласно рекомендациям [2] суммарная ширина каналов должна быть не менее 50 % периметра оформляющей полости в плоскости разъема. На эпюре давлений (рис. 5, *а*) показаны шаги итерации, в результате которых определены параметры проходных сечений питателей, способствующие равномерному заполнению полости расплавом материала.

В результате виртуального моделирования движения расплава (рис. 5, *а*) по литниковой системе пресс-формы получены оптимальные параметры проходных сечений каналов литниковой системы при условии соблюдения заданных градиентов температуры, давления и скорости расплава: диаметр тоннельных каналов — 5,28 мм, ширина питателя — 2,42 мм, ширина газоотводящего канала — 0,42 мм. Совместное моделирование движения среды с учетом взаимного теплообмена с корпусом пресс-формы (рис. 5, *б*) показывает удовлетворительные результаты по критерию заполнения оформляющей полости.

Целью проведенного компьютерного моделирования было устранение длительной и трудоемкой процедуры доводки пресс-формы до требуемых характеристик. Полученные результаты, по-видимому, не лишены погрешностей, связанных с неточностями в постановке задачи и выборе настроек программы. Проблема состоит в обеспечении корректности замены реальных конструктивных особенностей объекта упрощенными виртуальными аналогами [4], которые могли бы без ущерба качества передачи свойств объекта исследования экономить вычислительные ресурсы компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 16337–77.** Полиэтилен высокого давления. Технические условия [Текст].— Введ.1979–01–01.— М.: Стандартинформ, 2008.— 36 с.

2. **Пантелеев, А.П.** Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс [Текст] / А.П. Пантелеев, Ю.М. Шевцов, И.А. Горячев.— М.: Машиностроение, 1986.

3. **Алямовский, А.А.** SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи [Текст].— СПб.: БХВ — Петербург, 2012.

4. **Алямовский, А.А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation [Текст] / А.А. Алямовский.— М.: ДМК Пресс, 2010.

5. **Соценко О.В.** Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей энергоемких промышленных изделий [Электронный ресурс] / О.В. Соценко, И.Ю. Посыпайко, А.В. Белич // Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.— Режим доступа: http://www.ukrrosmetall.com.ua/publication/info/34

6. **Ковалёва Т.В.** Моделирование процесса литья под давлением изделий из пластмасс [Электронный ресурс] / http://www.rusnauka.com/8_DN_2011/Chimia/1_81748.doc.htm ;

7. Процесс изготовления пресс-формы [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.rpmufa.

ru/index.php?pageid=press#5 ;

8. **Крыжановский В.К.** Производство изделий из полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко.— Санкт-Петербург, 2004.

9. **Чанг Дей Хан.** Реология в процессах переработки полимеров [Текст] / Чанг Дей Хан.— М.: Химия, 1979.

10. **Алямовский, А.А.** SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.Н. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев.— СПб.: БХВ — Петербург, 2006.—

REFERENCES

1. **GOST 16337–77.** High-pressure polyethylene. Specifications [Tekst]. (rus.)

2. **Panteleyev A.P., Shevtsov Yu.M., Goryachev I.A.** Spravochnik po proektirovaniyu osnastki dlya pererabotki plastmass [Tekst].— M.: Mashinostroyenie, 1986. (rus.)

3. **Alyamovskiy A.A**. SolidWorks Simulation. Kak reshat prakticheskie zadachi [Tekst].— Spt., 2012. (rus.)

4. **Alyamovskiy A.A**. Inzhenerniye raschety v SolidWorks Simulation [Tekst].— M.: DMK Press, 2010. (rus.)

5. **Sotsenko O.V., Posypaiko I.Yu., Belich A.V.** Komp'yuternoe modelirovanie tekhnologicheskogo proces-sa lit'ya detaley energoyemkikh promyshlennykh izdeliy [Tekst] // Natsionalnaya metallurgicheskaya akademiya Ukrainy, Dnepropetrovsk [Elektron. resurs] .— Available :// http://www.ukrrosmetall.com.ua/publication/info/34 (rus.)

6. Kovaleva T.V. Modelirovanie processa lit'ya pod davleniem izdeliy iz plastmass [Elektron. resurs].— Availab-le:// http://www.rusnauka.com/8_DN_2011/Chimia/ 1_81748.doc.htm (rus.)

7. Process izgotovleniya press-formy.— Available:// http://www.rpmufa.ru/index.php?pageid=press#5 (rus.)

8. **Kryzhanovskiy V.K., Kerber M.L., Burlov V.V., Panimatchenko A.D.** Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh materialov [Tekst].— Sankt-Peterburg, 2004. (rus.)

9. **Chang Day Han.** Reologiya v orocessakh pererabotki polimerov [Tekst].— M.: Chimia, 1979. (rus.)

10. **Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.N., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B.** SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Tekst].— SPb.: BKHV— Peterburg, 2006. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОРЛОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизированного проектирования Петербургского государственного университета путей сообщения, директор Санкт-Петербургского монетного двора Гознака, ; 190031, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: sor.kr@mail.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — кандидат технических наук заведующий кафедрой автоматизированного проектирования Петербургского государственного университета путей сообщения; 190031, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: yan-roos@yandex.ru

AUTHORS

ORLOV Sergey V. — Petersburg State Transport University; 190031, 9 Moskovsky pr, Saint Petersburg; e-mail: sor.kr@mail.ru

VATULIN Yan S. — Petersburg State Transport University; 190031, 9 Moskovsky pr, Saint Petersburg; e-mail: yan-roos@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 62–18

В.В. Барсков

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

V.V. Barskov

SELECTION OF OPTIMAL SOLUTIONS IN THE DESIGN OF LOW-POWER GAS TURBINES

В статье рассматривается проблема выбора частоты вращения турбины и компрессора, оптимальных для получения максимального КПД газотурбинных установок малой мощности, возникающая при их проектировании. Предложена новая компоновка таких установок — с независимыми валами для турбины и компрессора. Обозначены ее возможности и достоинства, а также ограничения и проблемы.

ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (МГТУ). МГТУ С НЕЗАВИСИМЫМИ ВАЛАМИ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ОБОРОТОВ. ПОВЫШЕНИЕ КПД. ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА.

The article deals with the problem that arises when designing MGTU, in the selection of the optimal frequency of rotation of the turbine and compressor to maximize the efficiency of the plant. Proposed solution — the creation of MGTU with independent shafts for turbines and compressors. Marked limitations, problems, opportunities and advantages of the new layout.

LOW-POWER GAS TURBINES. INDEPENDENT SHAFTS. SELECTION OF THE OPTIMAL SPEED. INCREASE EFFICIENCY. OPTIMIZE THE LAYOUT OF TURBINE GENERATOR.

Газотурбинные установки малой мощности находят все более широкое применение в качестве автономных энергоисточников. На рынке востребованы подобные автономные энергоисточники благодаря длительному ресурсу, низкому уровню выбросов, возможности работать на различных видах энергоносителей и с относительно высокому КПД [1, 2].

В нашу страну импортные газотурбинные установки поставляют компании Elliott, Capstone, Turbec. Компания Elliott предлагает микротурбинные установки TA-100 RCHP и TA-100 R мощностью 100 кВт, а также установку Offshore для тяжелых условий эксплуатации на морских нефте- и газодобывающих платформах, компания Capstone — установки C30, C60 и C65 мощностью соответственно 30, 60 и 65 кВт в различных вариантах исполнения, компания Turbec — установки T100 мощностью 100 кВт[10].

Эффективность МГТУ малой мощности определяют:

сравнительно низкая себестоимость производства электроэнергии;

относительно высокий КПД;

высокая надежность энергоснабжения;

независимость режима работы от загруженности энергосистемы;

уменьшение отчуждения территории под крупное энергетическое строительство;

применение перспективных современных технологий и технических решений при создании новой техники;

мобильность использования;

малое время развертывания (от возникновения потребности до ввода в эксплуатацию);

простота эксплуатации по сравнению с дизель-генераторами [1].

При проектировании МГТУ для получения высокого КПД (0,33–0,35) необходимо применять высокоэкономичную турбину с внутренним КПД по полным параметрам не менее 0,9. Такой турбиной в настоящее время является только радиально-осевая малорасходная турбина.

Наиболее простой вид МГТУ — одновальный агрегат и простой цикл без рекуперации. Большая часть мощности, развиваемой газовой турбиной, затрачивается на привод компрессора и вспомогательных устройств, а оставшаяся часть передается потребителю (электрическому генератору). Подобный тип установки не может обеспечить приемлемый уровень КПД.

Внутренний КПД МГТУ простого цикла определяется по формуле

$$\eta_{\text{в}} = \frac{H_{\text{в}}}{q_1}, \qquad (1)$$

где q_1 — удельный расход теплоты; $H_{\text{в}}$ — внутренняя удельная работа МГТУ.

Один из способы повышения КПД МГТУ — использование цикла с рекуперацией. Цикл изображен на рис. 1. [2, 3].

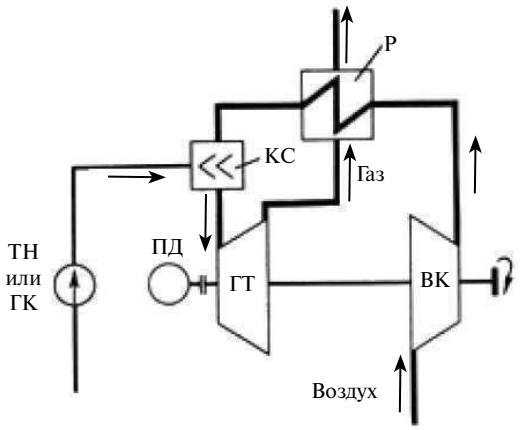


Рис. 1 Тепловая схема одновального МГТУ с регенерацией:

Р — рекуператор; ВК — воздушный компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ПД — пусковой двигатель (генератор); ТН — топливный насос; ГК — газовый компрессор

При проведении расчетов тепловых схем МГТУ необходимо найти оптимальную величину степени повышения давления в копрессоре π_k. Обычно этот диапазон π_k включает в себя оптимальную степень повышения давления как по полезной работе, так и по КПД МГТУ. Выбор диапазона изменения степени повышения π_k зависит от схемы МГТУ.

На рис. 2 показана зависимость эффективного КПД цикла идеального МГТУ от π_k. Эта зависимость характеризуют максимальные значения КПД в идеальном МГТУ. В одновальных МГТУ π_k, приходящаяся на одну ступень,

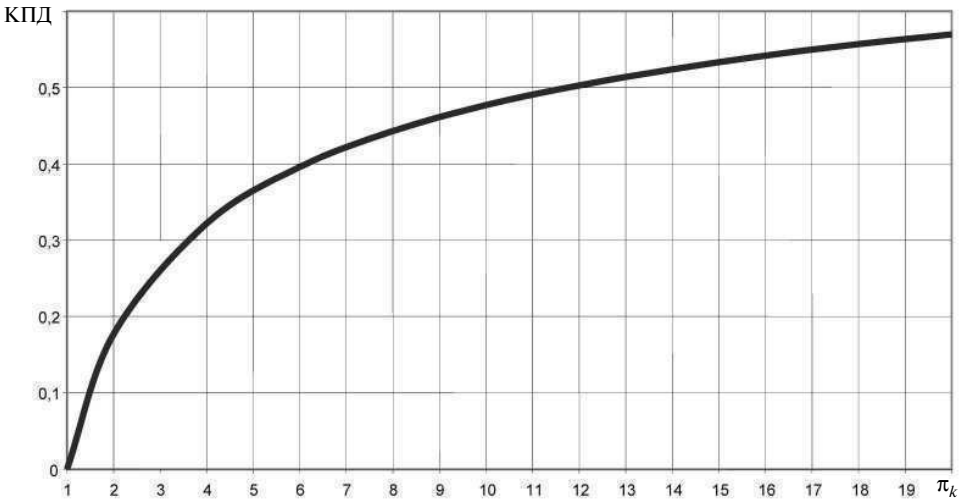


Рис. 2. Зависимость КПД идеальной ГТУ от степени π_k повышения давления в компрессоре

обычно не превышает 6–7. Теплоемкость и другие свойства рабочего тела приняты одинаковыми во всей области расчета и не зависящими от температуры рабочего тела.

В одновальных установках все элементы МГТУ — компрессор, турбина и генератор — находятся на одном валу и, естественно, имеют одну и туже частоту вращения. Это приводит к тому, что в случае изменения характеристик одновальной МГТУ при снижении частоты вращения турбина быстрее теряет мощность, чем снижается мощность, потребляемая компрессором, а степень повышения давления в компрессоре π_k резко падает (см. рис. 1). Таким образом, одновальная МГТУ может обеспечить режим работы компрессора только в ограниченном диапазоне изменения частоты вращения вала, что значительно снижает возможности применения данных МГТУ в условиях с колеблющимся потреблением электроэнергии. С учетом особенности малогабаритных газотурбинных установок — высокой частоты и диапазона вращения ротора 20 000–80 000 об/мин — этот фактор становится ключевым [2, 3].

На рис. 3 и в таблице приведены зависимости эффективного КПД ($\eta \cdot 10^{-3}$) цикла МГТУ от степени π_k повышения давления в компрессоре при степени регенерации $\mu = 0{,}9$ и разных температурах T_3^* газа перед турбиной.

В известной схеме двухвальной МГТУ, когда турбина высокого давления приводит в действие компрессор, а турбина низкого давления — нагрузку, регулирование МГТУусложнено .

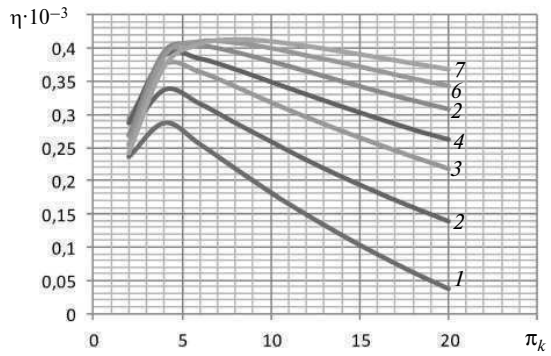


Рис. 3. График зависимости эффективного КПД от степени π_k повышения давления в компрессоре при $\mu = 0{,}9$ степени регенарации и температурах газа перед турбиной 900 (*1*), 1000 (*2*), 1100 (*3*), 1200 (*4*), 1300 (*5*), 1400 (*6*) и 1500 (*7*) K

Вал компрессора в МГТУ с независимыми валами, не будучи механически связанным с валом силовой турбины, может иметь практически любую частоту вращения. Поэтому есть возможность отдельной оптимизации турбины и компрессора, где основным граничным условием будет выступать массовый расход воздуха.

В предлагаемой схеме привод компрессора развязан по газовому тракту, что позволяет оптимизировать параметры как компрессора, так и турбины (см. рис. 3).

На основании параметров тепловой схемы МГТУ определяются характеристические числа U/c_0 в зависимости от частоты вращения ротора n и среднего диаметра турбины $D_{\text{ср}}$.

Оптимальные значения U/c_0 выбираются на основании опыта проектирования подобных турбин и лежат в пределах 0,68–0,72, а средний диаметр турбины — исходя из соотношения $L_1 = \dfrac{l_1}{D_{\text{ср}}} = 0{,}06–0{,}12$ [5, 7]. Учитывая, что частота вращения турбины из прочностных соображений не может превышать 80000 об/мин., средний диаметр турбины может находиться в пределах 0,191–0,229 м. Точные значения этих диаметров будут определены на этапе проектирования при детальном расчете радиально-осевой турбины. Размеры рабочего колеса компрессора выбираются также в этих пределах исходя из опыта проектирования подобных МГТУ [3, 4].

Для МГТУ с независимыми валами необходимо выполнить ряд условий:

КПД электрических машин для турбины и компрессора должен быть не менее 0,9;

габаритные размеры таких МГТУ не должны превышать одновальные аналоги более чем в 1,2 раза.

В качестве электрических машин предлагается использовать высокоскоростную синхронную электрическую машину с возбуждением постоянными магнитами. Данный тип электрической машины обладает наивысшими значениями КПД и удельной генерируемой мощности, а также высокой скоростью вращения ротора. Высокоскоростной синхронный стартер-генератор обеспечивает пуск и выработку электроэнергии от турбины МГТУ. Высокоскоростной синхронный стартер-двигатель обеспечивает пуск и вращение компрессора МГТУ

Зависимости эффективного КПД ($\eta \cdot 10^{-3}$) от степени π_k повышения давления в компрессоре (для варианта $\mu = 0{,}9$, $T_{ст} = 1100$ К, $КПД_{кс} = 0{,}98$) [6, 9]

Температура T_3, К	КПД $\eta \cdot 10^{-3}$ при указанных значениях π_k									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
900	0,236	0,287	0,255	0,218	0,182	0,149	0,118	0,089	0,062	0,037
1000	0,269	0,337	0,316	0,287	0,259	0,231	0,206	0,182	0,16	0,139
1100	0,294	0,375	0,364	0,342	0,318	0,296	0,275	0,255	0,236	0,218
1200	0,287	0,388	0,384	0,368	0,349	0,33	0,312	0,294	0,277	0,262
1300	0,268	0,395	0,403	0,394	0,38	0,365	0,35	0,335	0,321	0,308
1400	0,254	0,388	0,41	0,408	0,4	0,389	0,378	0,366	0,354	0,343
1500	0,242	0,373	0,406	0,413	0,41	0,403	0,395	0,386	0,377	0,368

Для снижения габаритных размеров МГТУ с независимыми валами идут на отказ от опорных элементов с масляной смазкой и охлаждением. Для полного отказа от масляной системы необходимо также исключить все зубчатые передачи приводов агрегатов, что может быть реализовано, если применить интегрированный электрический стартер-генератор с ротором, закрепленным непосредственно на валу турбины, электроприводный двигатель, у которого ротор закреплен непосредственно на валу компрессора, и электроприводный топливный насос. В мировом и отечественном газотурбостроении большую популярность получили газодинамические подшипники (ГП). Это обусловлено простотой конструкции, малыми массогабаритными и стоимостными показателями, а также — благодаря отсутствию изнашивающихся механических частей под нагрузкой — большим ресурсом, надежностью и отсутствием необходимости в техобслуживании при длительной работе без останова. [2, 8].

Снижение КПД в результате использования раздельных электрических машин для турбины и компрессора, а также электроприводного топливного насоса и потери от использования газодинамических опор компенсируются следующими достоинствами МГТУ с независимыми валами:

повышением КПД компрессора за счет выбора оптимального числа оборотов;

повышением КПД турбины за счет выбора оптимального числа оборотов;

упрощением конструкции ротора (замена одного длинного гибкого ротора двумя короткими жесткими; уменьшение перепада температур по длине ротора; работа ротора компрессора в зоне низких — меньше 300 °С — тем- пературах);

возможностью оптимизации компоновки турбогенератора за счет уменьшения длин воздуховодов и газоходов, что снижает потери в тракте;

упрощение ремонта турбогенератора благодаря тому, что можно отдельно менять компрессор и турбину или ротор компрессора и ротор турбины;

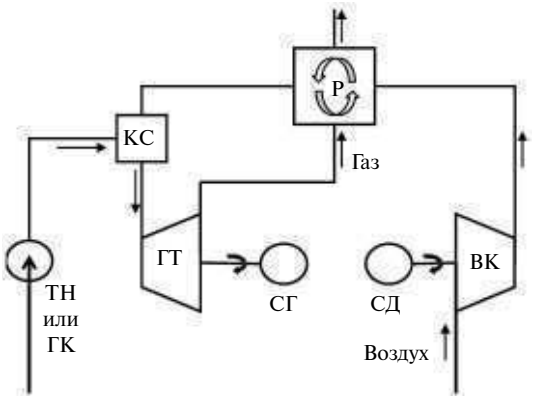


Рис. 4. Предлагаемая тепловая схема двухвального МГТУ с регенерацией:
Р — рекуператор; ВК — воздушный компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; СГ — стартер-генератор; СД — стартер-двигатель; ТН — топливный насос; ГК — газовый компрессор

упрощением конструкции и снижением металлоемкости за счет исключения общего силового корпуса;

использованием оптимальных металлов для корпусов по температуре и прочности.

Таким образом, установки МГТУ двухвальной схемы имеют следующие преимущества:

повышенный КПД во всем диапазоне вырабатываемой полезной мощности;

уменьшенные габариты (за счет оптимальной компоновки);

уменьшенные потери в патрубках вследствие уменьшения их длин и поворотов;

возможность применения модульной конструкции.

Применив при проектировании МГТУ перечисленные решения, можно достигнуть КПД МГТУ на уровне 0,33–0,35, оптимизировать конструкцию и упростить ее изготовление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беседин, С.Н.** Микротурбинный генератор электрической мощности 100 кВт (МТГ 100) [Текст] / С.Н. Беседин, Е.И. Окунев, В.А. Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 3(106).— С. 57–61.

2. **Беседин, С.Н.** Научно-техническое обоснование и практическая реализация создания микротурбинного генератора мощностью 100 кВт на основе современных расчетно-экспериментальных методов [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Беседин Сергей Николаевич / Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.— 2011.

3. **Рассохин, В.А.** Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом [Текст] / В.А. Рассохин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4(135).— С. 41–51.

4. **Кириллов, И.И.** Теория турбомашин [Текст] / И.И. Кириллов.— 2-е изд, перераб. и доп.— Л.: Машиностроение, 1972.— 533 с.

5. **Соколов, Н.П.** Энергетические машины: Определение величины погрешности при экспериментальных исследованиях [Текст]: Учебное пособие / Н.П. Соколов [и др.] / Под ред. В.А. Рассохина, В.Г. Полищука.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — В надзаг.: Приоритетный национальный проект «Образование». Инновационная образовательная программа Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

6. **Галёркин, Ю.Б.** Турбокомпрессоры [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.Б. Галёркин, Л.И. Козаченко / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.— СПб., 2008.— Электрон. текстовые данные.— ⟨URL:http://dl.unilib.neva.ru/dl/1544.pdf⟩.

7. **Андреев, К.Д.** Энергетические машины. Теплообмен в системах охлаждения газовых турбин [Текст]: Учеб. пособие для вузов по направлению подгот. «Технолог. машины и оборудование» / К.Д. Андреев [и др.] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет / Под ред. В.А. Рассохина, В.Г. Полищука.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 294 с.— В надзаг.: Приоритетный национальный проект «Образование». Инновационная образовательная программа Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

8. **Сипенков, И.Е.** Прецизионные газовые подшипники [Текст] / И.Е. Сипенков, А.Ю.Филиппов, Ю.Я. Болдырев [и др.] / Под ред. А.Ю. Филиппова и И.Е. Сипенкова / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор».— СПб., 2007.— 504 с.

9. **Беседин, С.Н.** Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильноразвитой системой регенерации тепла [Текст] / С.Н. Беседин [и др.] // Инновационная политика и изобретатели («Россия — начало XXI века): матер. Межрегион. научно-техн. конф. изобретателей. Каталог Городской выставки изобретений 28–29 апреля 2009 года / Творческий союз изобретателей Санкт-Петербурга; Санкт-Петербургского государственного политехнического университета / Под ред. Ю.Г. Попова, А.Г. Семёнова.— СПб., 2010.— С. 58–61.

10. Рекламные буклеты компаний: Elliot, Capstone, Turbec.; [Электрон. ресурс]: ⟨URL:http://www.bpcgroup.ru/press-center/publiCATION/⟩.

REFERENCES

1. **Besedin S.N.** Mikroturbinnyi generator elektricheskoi moshchnosti 100 kVt (MTG 100) [Tekst] / S.N.Besedin, E.I. Okunev, V.A. Rassokhin // Nauchnotekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. № 3(106).— S. 57–61. (rus.)

2. **Besedin S.N.** Scientific and technical justification and practical implementation of creating a microturbine generator power of 100 kW based on advanced computational and experimental methods [Tekst]: Dis. ... Candidate. tehn. Sciences: 05.04.12 / Besedin Sergey /

Saint-Petersburg State Polytechnic University.— St. Petersburg., 2011.— 298 p. (rus.)

3. **Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveyev Yu.V.** Osnovnie napravleniya razvitiya mikroturbinnykh tekhnologiy v Rossii i za rubezhom [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2011. № 4(135).— S. 41–51. (rus.)

4. **Kirillov I.I.** Teoria turbomashin [Tekst] / 2-e izd, pererab. i dop.— L.: Mashinostroenie, 1972.— 533 s. (rus.)

5. **Sokolov N.P. [et all.].** The energy machine: Determination of error in experimental studies: a tutorial, St. Petersburg State Polytechnic University, [ed. V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk].— St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2008. (rus.)

6. **Galerkin Yu.B., Kozachenko L.I.** Turbokompressory [Elektronnyi resurs]: ucheb. posobie [Tekst] / Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet.—SPb., 2008.—[Elektron. tekstovye dan].—⟨URL:http//dl.unilib.neva.ru/dl⟩ 1544. (rus.)

7. **Andreev K.D. [and other].** Energy machine. Heat transfer in the cooling systems of gas turbines: studies. manual for high schools in the direction of Prep. «Technolog. Machinery and equipment» [Tekst] / St. Petersburg State Polytechnic University Ed. V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk.— St. Petersburg. Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2008.— 294 p. (rus.)

8. **Sipenkov I.E., Filippov A.U., Boldyrev Yu.Ia. [et all.].** Pretsizionnye gazovye podshipniki [Tekst] / Pod red. A.Yu. Filippova i I.E.Sipenkova / GNTs RF TsNII «Elektropribor».— SPb., 2007.— 504 s. (rus.)

9. **Besedin S.N. [and other].** Development and the creation of autonomous power systems based on low-power gas turbine simple cycle schemes with highly — developed system of heat recovery [Tekst] / Innovation Policy and inventors (Russia — the beginning of XXI century): Proc. of the Intereg. Scientific Conf. of Inventors and Inventions exhibition catalog Urban 28–29 April 2009 / Creative Union of Inventors of St. Petersburg, St. Petersburg State Polytechnic University / Ed. G. Popov, A.G. Semenov.— St. Petersburg., 2010.— S. 58–61. (rus.)

10. Reklamnye buklety kompanii: Elliot, Capstone, Turbec [Elektron. resurs].—⟨URL:http://www.bpcgroup.ru/press-center/publiCATION/⟩

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БАРСКОВ Виктор Валентинович — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: viktorbarskov@ntcmtt.ru

AUTHORS

BARSKOV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: viktorbarskov@ntcmtt.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 629.1.032.001

Р.В. Русинов, В.В. Румянцев, Р.Ю. Добрецов

К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЕРЦИОННО-РЕЗОНАНСНОГО НАДДУВА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

R.V. Rusinov, V.V. Rumiantsev, R.Yu. Dobretsov

TO THE ISSUE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE INERTIAL SUPERCHARGING EFFECTIVENESS

Приведена математическая модель оценки эффективности инерционно-резонансного наддува. Теоретические выкладки проиллюстрированы примером расчета для дизельного двигателя транспортной машины и одной секции судового дизеля. Для оценки адекватности модели использованы результаты экспериментальных исследований.

ДВИГАТЕЛЬ. ДИЗЕЛЬ. ИНЕРЦИОННО-РЕЗОНАНСНЫЙ НАДДУВ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Proposed a mathematical model for evaluation of inertial supercharging effectiveness. Theoretical groundwork is illustrated by the example of calculations for transport vehicle diesel engine and for one section of marine engine. To estimate the model adequacy used the experimental data.

ENGINE. DIESEL. INERTIAL SUPERCHARGER. WORK CYCLE. EFFICIENCY.

Сравнительно давно было установлено, что возникающие во впускных трубопроводах поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) пульсации рабочего тела могут быть использованы для повышения мощности самих двигателей путем дозарядки их цилиндров [1, 2].

В частности, в свое время подобный эффект повышения мощности был установлен при проведении научно-исследовательских работ в ЦНИИМФ применительно к тихоходным судовым дизелям типа 6Ч29/34 с числом оборотов коленчатого вала $n = 350$ мин$^{-1}$, на Рижском дизелестроительном заводе (Ч8,5/11, $n = 1500$ мин$^{-1}$) и др.

В настоящее время подобный метод форсирования силовых агрегатов, называемый инерционно-резонансным наддувом, используют уже многие производители автомобилей даже при том, что эффект от него реально имеет место только для единичного режима работы двигателя, сообразно настройке системы впуска ДВС [3, 4]. Эффект инерционно-резонансного наддува дополняется наддувом за счет использования нагнетателей различных типов [1–4].

Последнее обстоятельство связано с необходимостью обеспечения резонанса колебательного процесса столба воздуха (горючей смеси) во всасывающем трубопроводе на частоте вращения коленчатого вала самого ДВС.

Этот резонанс достигается подбором индивидуальных для каждого цилиндра длины и диаметра всасывающего трубопровода, которые должны, помимо резонанса, обеспечить и минимальные аэродинамические потери кинетической энергии колеблющегося в нем потока

В результате проведенных в области инерционно-резонансного наддува научно-исследовательских работ (МВТУ, СПбГПУ и др.) были получены расчетные зависимости для определения геометрических размеров впускных трубопроводов двигателей [5], однако аналитическая оценка получаемого при этом эффекта до сих пор, по существу, не предложена, что связано с исключительной сложностью анализа протекающих в цилиндрах ДВС процессов газообмена.

Достаточно, к примеру, заметить, что завершение процесса выпуска из цилиндров широко отработавших газов, в частности для быстроход-

ных наиболее используемых четырехтактных двигателей, затягивается до 30° угла поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки (ВМТ) положения поршня, а впускные клапаны при этом открываются за 30° до ВМТ, и период одновременных процессов всасывания и выпуска составляет до 60° п.кол. в. [5].

Для более продуктивного использования скоростного напора столба рабочего тела во впускном трубопроводе практически оказывается необходимым смещение фаз закрытия впускного клапана после нижней мертвой точки (НМТ) положения поршня в сторону большего запаздывания против их исходного значения.

Видимо, степень этого запаздывания в оптимальном случае должна определяться моментом достижения равенства динамического напора инерционного потока во всасывающем трубопроводе и давления в цилиндрах двигателя в конце их наполнения.

В нашей статье делается попытка оценить возможный комплексный эффект от использования инерционно-резонансного наддува, касающийся не только мощности, но и экономичности двигателей, исходя из условия дозарядки цилиндров инерционным потоком рабочего тела за период запаздывания закрытия впускных клапанов. Методические основы для проведения такой оценки были опубликованы в статьях [6–10].

В качестве первого примера такой оценки, рассмотрим вариант с упомянутым выше шестицилиндровым четырехтактным дизелем 6Ч29/34 мощностью N_e = 350 л.с. (267,4 кВт).

Для одноцилиндрового отсека подобного двигателя мощностью N_e = 58,3 л.с. (42,9 кВт) и с числом оборотов коленчатого вала n = = 350 мин$^{-1}$ среднее эффективное давление рабочего цикла — p_e = 6,68 кг/см^2 (0,65 МПа), степень сжатия — ε = 13; средняя скорость поршня — c_m = 3,97 м/с; диаметр цилиндра — D = = 290 мм, ход поршня — S = 340 мм, коэффициент наполнения цилиндра в конце процесса всасывания — η_v = 0,84.

По данным натурных испытаний для номинального режима работы этого дизеля длина и диаметр всасывающего трубопровода, обеспечивающие инерционно-резонансный наддув, равны соответственно l_s = 6,2 м, d_s = = 100 мм.

Рабочий объем цилиндра:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S = \frac{3{,}14 \cdot 29^2}{4} \cdot 34 = 22446{,}3 \text{ см}^3.$$

Полный объем цилиндра: $V_a = V_h + V_c$, где объем камеры сгорания $V_c = V_a/\varepsilon$, откуда V_a = $= V_h + V_a/\varepsilon$, или

$$V_a = \frac{\varepsilon V_h}{\varepsilon - 1} = \frac{13 \cdot 22446{,}3}{13 - 1} = 24316{,}8 \text{ см}^3.$$

Воздушный заряд цилиндра:

$$V_\text{в} = \eta_v V_a = 0{,}84 \cdot 24316{,}8 = 20426{,}1 \text{ см}^3.$$

Весовое количество воздуха $G_\text{в}$ в цилиндре в безнаддувном варианте двигателя по уравнению состояния газа $pV = GRT$: $G_\text{в} = \frac{p_a V_a}{R_\text{в} T_a}$, где p_a — давление в цилиндре в конце процесса всасывания; $R_\text{в}$ = 0,287 кДж/кг·град — газовая постоянная воздуха; температура воздуха с учетом его начального подогрева в цилиндре — T_a = = 273+40 = 313 К.

Поскольку при окончательном заполнении цилиндра давление в нем по отношению к внешнему p_0 = 0,098 МПа пропорционально коэффициенту наполнения η_v, то $p_a = \eta_v p_0$, и весовое количество воздуха в цилиндре равно

$$G_\text{в} = \frac{\eta_v p_0 V_a}{R_\text{в} T_a} =$$

$$= \frac{0{,}84 \cdot 0{,}098 \cdot 10^6 \cdot 20426{,}1 \cdot 10^{-3}}{0{,}287 \cdot 10^3 \cdot 313} = 18{,}7 \text{ г.}$$

Полагая в случае инерционно-резонансного наддува численное значение фазы закрытия впускного клапана после НМТ против его изначального значения (примерно 25° п.кол.в.) равным $\varphi = 45°$ п.кол., находим время возможной дозарядки цилиндра инерционным потоком воздуха

$$t_\text{з} = \frac{\varphi}{6n} = \frac{45}{6 \cdot 350} = 0{,}021 \text{ с.}$$

При этом средняя скорость заполнения цилиндра инерционным потоком, равная средней скорости потока во впускном трубопроводе в процессе всасывания, пропорциональна средней скорости поршня $\frac{Sn}{30}$ и отношению квадратов диаметров поршня (цилиндра) и трубопровода:

$$c_m = \frac{Sn}{30}\left(\frac{D}{d_s}\right)^2 = \frac{0{,}34 \cdot 350}{30}\left(\frac{0{,}29}{0{,}10}\right)^2 = 33{,}4 \text{ м/с}.$$

При диаметре впускного клапана d_k = = 100 мм и максимальном подъеме порядка 25 мм его подъем к моменту прихода поршня к НМТ, когда, собственно, кончается процесс самовсасывания и начинается инерционный наддув, составляет примерно h_k = 12 мм.

К моменту полного закрытия клапана, т. е. за период заполнения цилиндра инерционным потоком, его осредненное проходное сечение, естественно, составляет лишь половину от начального считая от положения клапана в момент нахождения поршня в нижней мертвой точке.

Таким образом, среднее проходное сечение клапана за период наддува с учетом угла наклона уплотнительной фаски клапана, равного 45°, в данном случае составит

$$f_k = 0{,}5\pi d_k h_k \sin 45° =$$

$$= 0{,}5 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}707 = 13{,}3 \text{ см}^2.$$

За указанное время в цилиндр поступит дополнительный объем воздуха

$$V_д = f_k c_m t_з = 13{,}3 \cdot 33{,}4 \cdot 10^2 \cdot 0{,}021 = 932{,}9 \text{ см}^3.$$

Удельная плотность воздуха, поступающего из трубопровода в цилиндр, с учетом состояния рабочего тела в самом трубопроводе составляет

$$\rho_д = \frac{p_0}{R_в T_a} =$$

$$= \frac{0{,}098 \cdot 10^6}{0{,}287 \cdot 10^3 \cdot 293} = 1{,}17 \text{ кг/м}^3 = 1{,}17 \text{ г/л}.$$

Масса дополнительного воздуха в цилиндре двигателя:

$$G_д = \rho_д V_д = 1{,}17 \cdot 932{,}9 \cdot 10^{-3} = 1{,}09 \text{ г}.$$

При очевидном увеличении мощности двигателя пропорционально увеличению в его цилиндре количества воздуха $G_д$ коэффициент прироста мощности равен

$$\lambda_н = \frac{G_в + G_д}{G_в} = \frac{18{,}7 + 1{,}09}{18{,}7} = 1{,}058.$$

Таким образом, сам прирост мощности дизеля за счет инерционно-резонансного наддува в данном случае составляет около 6 %.

В качестве второго примера оценки эффективности инерционно-резонансного наддува рассмотрим вариант четырехклапанного быстроходного бензинового автомобильного двигателя типа 4Ч8/6,6.

Его исходная мощность (без наддува) — N_e = 70 л.с. (51,5 кВт); n = 6000 мин$^{-1}$; ε = 10,5; c_m = 13,2 м/с; η_v = 0,84; среднее эффективное давление цикла p_e = 0,78 МПа; механический КПД — $\eta_м$ = 0,85; эффективный КПД — η_e = = 0,32; удельный расход бензина g_e = 0,261 кг/кВт·ч; D = 80 мм; S = 66 мм.

Для расчета форсирования двигателя принимаем данные всасывающего трубопровода (индивидуально для каждого из четырех цилиндров) [5, 10]: l_s = 0,425 м; d_s = 46 мм.

По аналогии с предыдущим

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S = \frac{3{,}14 \cdot 8^2}{4} \cdot 6{,}6 = 331{,}6 \text{ см}^3;$$

$$V_a = \frac{\varepsilon V_h}{\varepsilon - 1} = \frac{10{,}5 \cdot 331{,}6}{10{,}5 - 1} = 366{,}5 \text{ см}^3;$$

$$V_в = \eta_v V_a = 0{,}84 \cdot 366{,}5 = 307{,}9 \text{ см}^3.$$

При давлении в цилиндре к моменту начала процесса сжатия $p_a = \eta_v p_0$ (где p_0 = 0,098 МПа, p_a = 0,84·0,098 = 0,082 МПа и T_a = 300) исходный весовой воздушный заряд цилиндра равен

$$G_в = \frac{p_a V_в}{R_в T_a} = \frac{0{,}082 \cdot 10^6 \cdot 307{,}9 \cdot 10^{-3}}{0{,}287 \cdot 10^3 \cdot 300} = 0{,}29 \text{ г}.$$

При существенном «серийном» запаздывании закрытия впускных клапанов после НМТ (по фактическим данным для неформированного двигателя φ = 70° п.кол.в. [5]) ограничимся при наддуве фазовым «приростом» в десять градусов и примем φ = 80° п. кол. в.

Тогда $t_з = \frac{\varphi}{6n} = \frac{80}{6 \cdot 6000} = 2{,}22 \cdot 10^{-3}$ с.

Средняя скорость воздуха во впускном трубопроводе составит

$$c_m = \frac{Sn}{30}\left(\frac{D}{d_s}\right)^2 = \frac{0{,}066 \cdot 6000}{30}\left(\frac{8}{4{,}6}\right)^2 = 39{,}9 \text{ м/с}.$$

При диаметре двух выпускных клапанов d_k = 30 мм и подъеме их на момент прихода поршня в НМТ h = 3 мм их суммарное среднее проходное сечение $f_k = 0{,}5 \cdot 2\pi d_k h \sin 45° = 0{,}5 \cdot 2 \times$ $\times 3{,}14 \cdot 3 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}707 = 2{,}0 \text{ см}^2$.

Объем рабочего тела в результате инерционно-резонансного наддува составит

$$V_{\text{в}} = f_k \cdot c_m \cdot t_{\text{з}} = 2{,}0 \cdot 39{,}9 \cdot 10^2 \cdot 2{,}22 \cdot 10^{-3} = 17{,}7 \text{ см}^3.$$

Весовой заряд воздуха в цилиндре с учетом относительного разрежения во всасывающем трубопроводе, обусловленного гидравлическим сопротивлением воздушного фильтра двигателя $\Delta p = 50$ мм водяного столба (0,05 кгс/см^2, или 0,0049 МПа), рассчитываем так:

$$p_m = p_0 - \Delta p = 0{,}098 - 0{,}0049 = 0{,}0931 \text{ МПа};$$

$$G_{\text{д}} = \frac{p_m V_{\text{д}}}{R_{\text{в}} T_m} = \frac{0{,}0931 \cdot 10^6 \cdot 17{,}7 \cdot 10^{-3}}{0{,}287 \cdot 10^3 \cdot 290} = 0{,}02 \text{ г}.$$

Коэффициент прироста мощности двигателя:

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{G_{\text{в}} + G_{\text{д}}}{G_{\text{в}}} = \frac{0{,}29 + 0{,}02}{0{,}29} = 1{,}069.$$

Мощность двигателя 4Ч8/6,6 при инерционно-резонансном наддуве:

$$N_e^{\text{н}} = \lambda_{\text{н}} N = 1{,}069 \cdot 51{,}5 = 55{,}1 \text{ кВт}.$$

По известному выражению $N_e = 13{,}1 \cdot D^2 S p_e n i / m$, где p_e — среднее эффективное давление теплового цикла, i — число цилиндров, m — коэффициент тактности (для четырехтактного двигателя $m = 2$) имеем

$$p_e^{\text{н}} = \frac{N_e^{\text{н}} m}{13{,}1 \cdot D^2 S n i} =$$

$$= \frac{55{,}1 \cdot 2}{13{,}1 \cdot 0{,}08^2 \cdot 0{,}066 \cdot 6000 \cdot 4} = 0{,}83 \text{ МПа}.$$

Это значение давления заметно превышает исходное, равное 0,78 МПа.

Механический КПД форсированного двигателя, растущий по мере увеличения его мощности, оценивается по выражению [6, 10]

$$\eta_{\text{м}}^{\text{н}} = \frac{N_t^{\text{н}}}{N_e^{\text{н}} + N_e \dfrac{1 - \eta_{\text{м}}}{\eta_{\text{м}}}},$$

где N_e и η_e — исходные данные для неформированного двигателя.

Итак,

$$\eta_{\text{м}}^{\text{н}} = \eta_e \frac{N_e^{\text{н}}}{N_e} = \frac{55{,}1}{55{,}1 + 51{,}5 \dfrac{1 - 0{,}85}{0{,}85}} = 0{,}858.$$

Эффективный КПД форсированного двигателя (при равенстве индикаторных КПД сопоставляемых двигателей):

$$\eta_e^{\text{н}} = \eta_{\text{м}}^{\text{н}} \eta_i = \eta_{\text{м}}^{\text{н}} \eta_e / \eta_{\text{м}} = 0{,}858 \cdot 0{,}32 / 0{,}85 = 0{,}323.$$

При этом удельный расход топлива при низшей теплотворной способности для бензина $Q_m^{\text{н}} = 10300$ ккал/кг = 43100 кДж/кг составляет $g_e^{\text{н}} = \dfrac{3600}{Q_T^{\text{н}} \eta_e^{\text{н}}} = \dfrac{3600}{43100 \cdot 0{,}323} = 0{,}259$ кг/кВт·ч, что менее исходного значения 0,261 кг/кВт·ч для неформированного двигателя.

В общей оценке возможностей инерционно-резонансного наддува, видимо, следует исходить из того, что предельное значение давления в колебательном процессе столба рабочего тела во всасывающем трубопроводе достаточно близко к атмосферному p_0.

Так, в частности, даже при нереальном полном торможении потока в трубопроводе, вообще исключающем наполнение цилиндра, его статический напор при скорости потока, 33,4 м/с составляет всего $5{,}35 \cdot 10^{-4}$ МПа.

Следовательно, теоретически возможный предельный прирост мощности, к примеру при изначальном наполнении цилиндра $\eta_v = 0{,}84$, видимо, мог бы составить $\lambda_{\text{н}} = p_0 / \eta_v = 0{,}098 / 0{,}84 = 0{,}116$, т. е. величину до 11–12 %.

Предлагаемый метод допускает предварительную оценку возможного эффекта от использования инерционно-резонансного наддува ДВС. Однако вполне очевидна и необходимость в дополнительных экспериментальных и расчетных исследованиях для его уточнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяченко, Н.Х.** Теория двигателей внутреннего сгорания: рабочие процессы [Текст]: Учеб. для вузов по спец. «Двигатели внутреннего сгорания» / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Б.П. Пугачев [и др.]; под ред. Н.Х. Дьяченко.— Изд. 2-е, доп. и перераб.— Л.: Машиностроение, 1974.— 551 с.

2. **Алексеев, В.П.** Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбиниро-

ванных двигателей [Текст]: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / [В.П. Алексеев [и др.]]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1990.— 283 с.

3. Системы управления дизельными двигателями [Текст] / Пер. с нем.— Москва: Изд-во ЗАО «КЖИ «За рулем»», 2004.— 480 с.

4. **Русинов, Р.В.** Агрегаты наддува двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие [Текст] / Р.В. Русинов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 101 с.

5. **Русинов, Р.В.** Тепловые двигатели. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст]: учебное пособие / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

6. **Русинов, Р.В.** Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1 (142).— С. 182–187.

7. **Русинов, Р.В.** Эффективность теплового процесса быстроходного дизеля с предельно высокой степенью сжатия [Текст] / Р.В. Русинов, В.Б. Шеломов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №3(106).— С. 92–96.

8. **Русинов, Р.В.** Эффективность теплового цикла «адиабатного» двигателя внутреннего сгорания с газотурбинным наддувом [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. №2-2(147). С. 121–127.

9. **Русинов, Р.В.** Сравнительный анализ эффективности работы дизелей с газотурбинным и механическим наддувом [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4(110).— С. 111–115.

10. **Русинов, Р.В.** Поршневые двигатели внутреннего сгорания: тепловые циклы и их параметры: монография [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.— 79 с.

REFERENCES

1. **D'iachenko N.Kh., Kostin A.K., Pugachev B.P. [i dr.].** Teoriia dvigatelei vnutrennego sgoraniia: rabochie protsessy [Tekst]: ucheb. dlia vuzov po spets. «Dvigateli vnutrennego sgoraniia» / pod red. N.Kh. D'iachenko.— Izd. 2-e, dop. i pererab.— Leningrad: Mashinostroenie, 1974.— 551 s. (rus.)

2. **Alekseyev V.P. [i dr.].** Dvigateli vnutrennego sgoraniya: ustroystvo i rabota porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley: uchebnik dlya vuzov po spetsialnosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» [Tekst] / pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova.— 4-ye izd., pererab. i dop.— Moskva: Mashinostroyeniye, 1990.— 283 s. (rus.).

3. Sistemy upravleniya dizelnymi dvigatelyami [Tekst] / Per. s nem.— Moskva: «ZAO «KZhI «Za rulem»».— 2004.— 480 s. (rus.).

4. **Rusinov R.V.** Agregaty nadduva dvigateley vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobiye [Tekst] / SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006.— 101 s. (rus.).

5. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Teplovye dvigateli. Dvigateli avtomobilei i traktorov [Tekst]: uchebnoe posobie.— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. (rus.)

6. **Rusino v R.V., Dobretsov R.Yu.** Matematicheskaia model' teplovogo tsikla porshnevykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia / // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2012. № 1 (142)— S. 182–187. (rus.)

7. **Rusinov R.V., Shelomov V.B., Yu.R. Dobretsov** Effektivnost teplovogo protsessa bystrokhodnogo dizelya s predelno vysokoy stepenyu szhatiya [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2010. №3(106).— S. 92–96. (rus.)

8. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Effektivnost teplovogo tsikla «adiabatnogo» dvigatelya vnutrennego sgoraniya s gazoturbinnym nadduvom [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2012. №2-2(147).— S. 121–127 (rus.).

9. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Sravnitelnyy analiz effektivnosti raboty dizeley s gazoturbinnym i mekhanicheskim nadduvom / // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— SPb.— 2010. № 4(110).— S. 111–115. (rus.)

10. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Porshnevyye dvigateli vnutrennego sgoraniya: teplovyye tsikly i ikh parametry [Tekst]: monografiya.— SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013.— 79 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУСИНОВ Ростислав Викторович — доктор технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kgm-spb@list.ru

РУМЯНЦЕВ Виктор Валентинович — кандидат технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: engine@pef.spbstu.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук профессор кафедры двигателей, автомобилей и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственого политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kgm-spb@list.ru

AUTHORS

RUSINOV Rostislav V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kgm-spb@list.ru

RUMIANTSEV Victor V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: engine@pef.spbstu.ru

DOBRETSOV Roman Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kgm-spb@list.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621

С.В. Орлов, А.С. Хрущев

ЛИНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

S.V. Orlov, A.S. Khrushev

LINE OF THE AUTOMATED ACCOUNT OF METAL PRODUCTS OF MASS PRODUCTION

В статье даны представления о системе «Цербер», разработанной для автоматизированного счета металлических изделий массового производства. Изложен принцип работы системы с конвейерным способом подачи изделий.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО СЧЕТА. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИМПУЛЬСЫ. КОНВЕЙЕР. ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК.

In the article the system «Cerberus» developed for the automated account of metal products of mass production is presented. The principle of work of system with conveyor way of feeding is stated.

METAL PRODUCTS. AUTOMATED ACCOUNT SYSTEM. ELECTRONIC IMPULSES. CONVEYOR. OPTICAL SENSOR.

При изготовлении изделий массового производства необходимо устройство для счета продукции. Система «Цербер» была специально разработана для автоматического счета металлических изделий при их массовом производстве.

Представление о работе линии автоматизированного счета «Цербер» в статье дается на примере изготовления жетонов Петербургского метрополитена. Поскольку жетоны представляют собой материальную ценность (средство платежа), то их производство, учет и транспортировка требуют создания определенных условий: транспортировка и хранение жетонов осуществляется в специализированных мешках, каждый мешок содержит определенное количество жетонов.

Если процесс упаковки продукции в мешки полностью автоматизирован, то передача мешков с жетонами от изготовителя заказчику в основном осуществляется вручную. При этом обязательно применяется так называемый «ручной» счет, когда грузчики перекладывают мешки с жетонами, а ответственные за отгрузку сотрудники монетного двора пересчитывают их в присутствии представителей заказчика, сотрудников службы безопасности и охраны. Большую роль при таком счете мешков имел «человеческий фактор», который приводил к пересчету и недочету продукции.

С целью обеспечения надежности (объективности) счета продукции [1], уменьшения ручного труда, сокращения количества людей, занятых в схеме контроля, была разработана с применением автоматизированного проектирования и изготовлена линия для отгрузки жетонов и прочей монетовидной продукции, где установлена специальная программа учета данной продукции.

Система автоматизированного счета монетовидной продукции «Цербер» (рис. 1) предназначена для электронного учета штучных грузов при конвейерном способе их подачи [4].

Работа системы «Цербер» основана на электронном подсчете импульсов, вырабатываемых оптическими датчиками при пересечении оптического луча непрозрачными предметами. Каждый оптический датчик содержит излучающую головку и приемник. В системе предусмотрены два оптических датчика: один установлен в начале конвейера, а второй — в его конце (рис. 2) [2].

Импульсы, вырабатываемые датчиками, по экранированному кабелю марки ССС-4G-

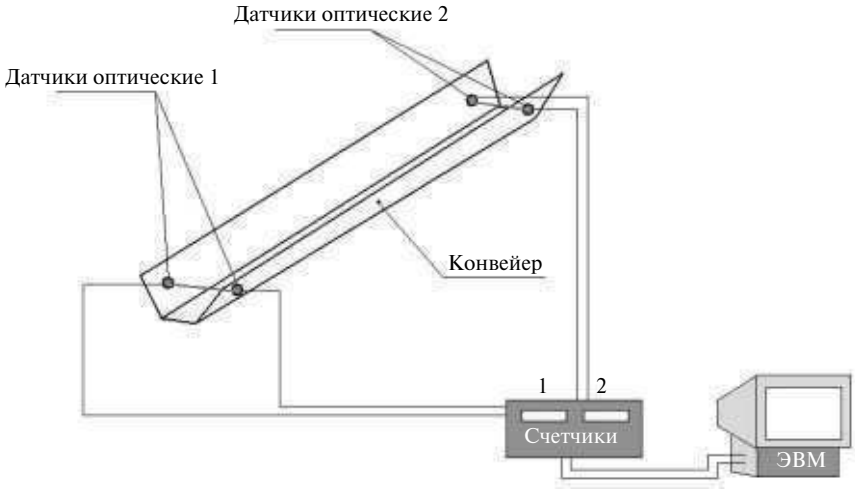


Рис. 1. Общая компоновка системы счета «Цербер»

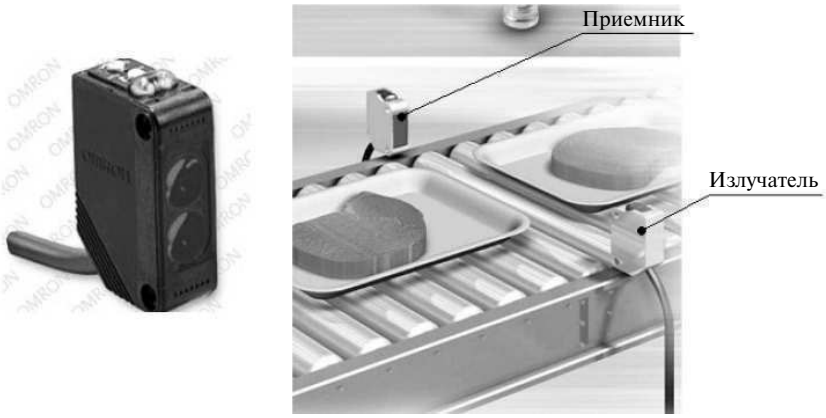


Рис. 2. Использование лазерных датчиков в системах счета продукции

28AWG поступают в системный блок персонального компьютера на плату PCI 1723, для которой установлено специальное программное обеспечение [3]. Специализированная программа учета монетовидной продукции установлена на персональном компьютере и согласована с платой PCI 1723, что позволяет отображать на мониторе, вести автоматический учет, сохранять в архивных файлах и распечатывать (при условии подключения принтера) результаты счета такой продукции (рис. 3) [8, 9].

При создании системы автоматизированного счета нам пришлось столкнуться с помехами от матерчатых бирок, прикрепляемых к мешкам, согласно ГОСТ. Все это приводило к сбоям в работе системы и поэтому нуждалось в технических решениях. Иллюстрация импульсных помех от бирок на мешках приведена на рис. 4, *а*. Было принято решение для защиты от помех применить в системе программируемые таймеры типа H5CX японской фирмы «Omron» [5], которые бы блокировали прохождение сигналов от оптических датчиков к системе счета на некоторое время задержки после фиксации первого импульса от проходящего по конвейеру мешка. Принцип блокировки помех состоит в программно устанавливаемой задержке восприятия новых сигналов системой счета после фиксации первого импульса от проходящего по конвейеру мешка. Таймер H5CX позволяет устанавливать как длительность импульса счета, так и задержку до следующего воспринимаемого импульса.

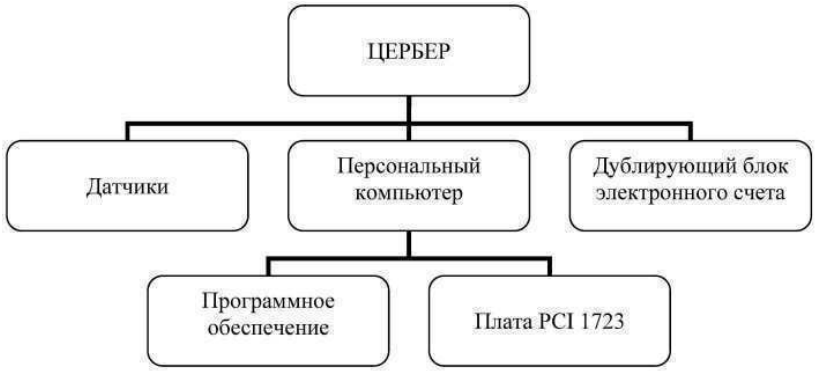


Рис. 3. Структура системы автоматизированного счета онетной продукции «Цербер»

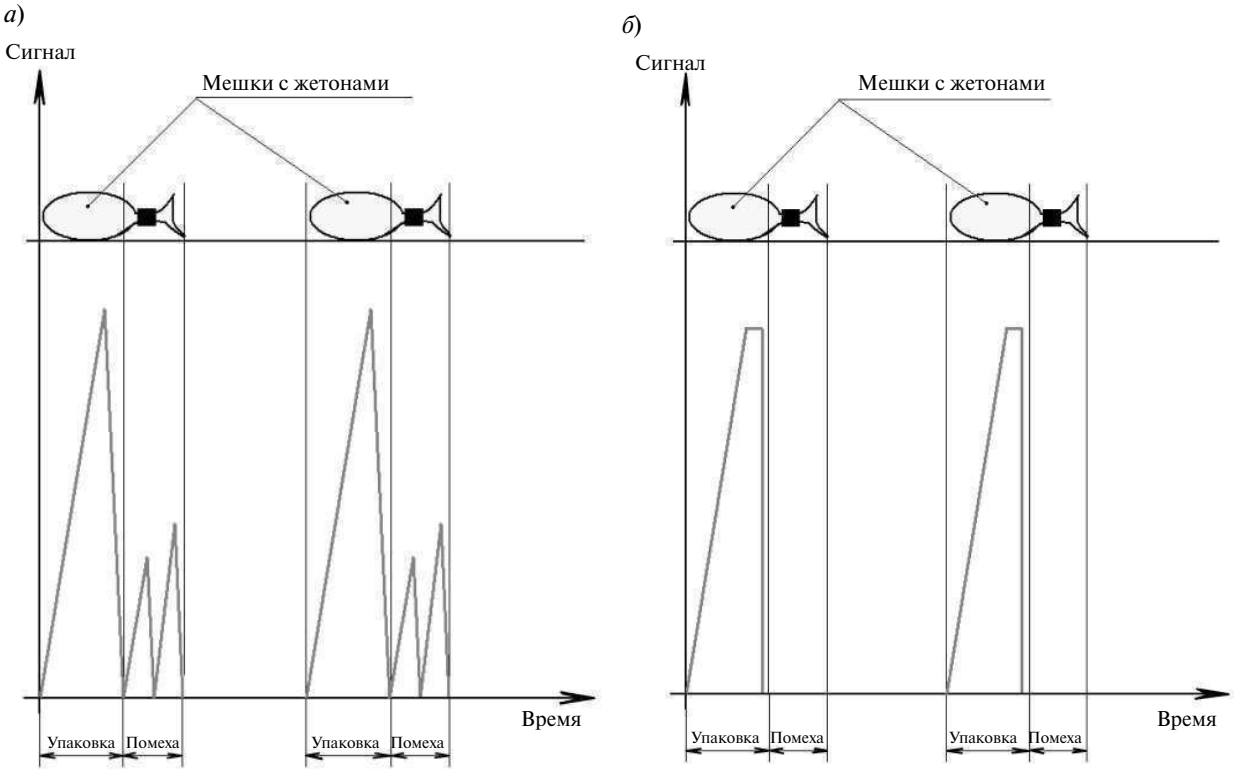


Рис. 4. Генерация ложных импульсов лазерными датчиками системы счета при упаковке жетонов в мешки неправильной геометрической формы (*а*) и отфильтрованные помехи (*б*)

Благодаря этому удалось успешно справиться с проблемой помех на конвейере [10].

Иллюстрация итоговых импульсов счета после фильтрации сигнала таймерами H5CX приведена на рис. 4, *б*.

Программа учета готовой продукции состоит из двух компонентов: программы учета продукции, работающей в операционной системе MS-DOS, и программы для анализа и распечатки результатов счета (в Windows 2000) [6, 7].

Программа счета продукции

Программа учета продукции запускается автоматически при загрузке компьютера со специального диска или дискеты. На экране отображаются три пункта меню, позволяющие выбрать режим работы программы:

пункт 1 — «Начать сеанс счета» — позволяет перейти к режиму счета продукции;

пункт 2 — «Просмотреть сохраненные результаты» — позволяет перейти к просмотру результатов предыдущего счета;

пункт 0 — «Выход» — позволяет выйти из программы.

Выбор пунктов меню осуществляется нажатием клавиш «вверх» и «вниз», а выбор режима — путем нажатия на клавишу «ввод» (Enter).

Режим учета продукции

При выборе пункта меню «Начать сеанс счета» на экране будет отображено меню режима счета продукции:

пункт меню «Запустить счетчик» осуществляет запуск режима учета продукции;

пункт меню «Сохранить результаты счета в файл» позволяет поместить результаты учета в файл, а также указать номинал монеты, кладовщика, контроллера ОРЭИБ и номер машины в которую проводилась погрузка;

пункт «Завершить сеанс» производит сброс счета и возврат в меню выбора режима.

Выбор пунктов меню здесь также осуществляется клавишами «вверх» и «вниз», а переход в указанный пункт — путем нажатия клавиши «ввод».

Режим счета продукции

После перехода в меню «Запустить счетчик» датчики учета продукции будут включены, а на экране отобразится окно счета продукции. В этом окне отображается количество учтенных мешков по первому и второму датчикам. Для того чтобы остановить учет продукции (например, при окончании счета), необходимо набрать слово «Стоп» на клавиатуре. Введенные символы отображаются в поле ввода в центре экрана. После ввода слова «Стоп» на экран будет выведено меню режима счета.

После окончания процесса счета можно сохранить его результаты в файле. Для этого в меню счета необходимо выбрать пункт «Сохранить результаты счета в файле». После выбора этого пункта меню на экране будет отображено окно ввода номинала монеты. Для сохранения результата необходимо ввести номинал монеты, после чего нажать клавишу «Ввод»; в случае ввода неверного символа его можно стереть клавишей «Backspace». Если вы не введете номинал монеты, программа сообщит об этом и предложит повторить ввод.

Аналогичным образом необходимо ввести номер машины, имя кладовщика, имя сотрудника ОРЭИБ, после чего программа сообщит вам о результатах сохранения.

Выход из режима счета

Чтобы выйти из режима счета, необходимо в меню счета выбрать пункт «Завершить сеанс»; после этого на экран будет выведено уведомление о том, что если вы покинете счет, то программа сбросит счетчики продукции в нуль. В случае, если значение датчиков отлично от нуля и выбран выход из режима счета, программа напомнит о необходимости сохранить результаты счета, и при утвердительном ответе система вернется в меню счета для сохранения результатов.

Режим просмотра результатов

Для того чтобы посмотреть предыдущие результаты счета, необходимо в главном меню выбрать пункт «Просмотреть сохраненные результаты»; на экране отобразится таблица результатов счета, в которой выводится дата выполнения учета, имя кладовщика и сотрудника ОРЭИБ, номинал монеты и номер машины. Для просмотра подробной информации по каждой операции учета достаточно выделить эту запись, передвинув курсор нажатием клавиш «Вверх» и «Вниз», и нажать клавишу «Ввод». На экране будет отображено окно результатов учета, в котором приводится информация из таблицы, а также значения счета по первому и второму счетчику.

Выход из программы

При выборе пункта «Выход» в главном меню программы она завершит свою работу и выведет на экран напоминание о перезагрузке компьютера в операционную систему Windows 2000.

Разработанная система позволяет исключить субъективный (человеческий) фактор при счете мешков с жетонами для метрополитена.

Система благодаря своей надежности исключает из процесса двух-трех человек.

Система дает возможность наладить электронную архивацию процесса передачи больших материальных ценностей.

Система позволяет использовать результаты отчетов непосредственно в бухгалтерских системах учета (1С).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войнов К.Н.** Обеспечение надежности счета монетной продукции [Текст] / К.Н. Войнов, А.С. Хрущев, В.Г. Шалимов, С.В. Орлов, В.А. Луценко, П.О. Никитин, В.А. Павлов // Трибология и надежность: Сб.научных трудов IX Международной конференции (8–10 октября 2009 г.).— СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2009.— С. 257–265.

2. **Водовозов, А.М.** Цифровые элементы систем автоматики [Текст]: Учебное пособие / А.М. Водовозов.— М.: Академия, 2006.— 244 с.

3. **Музылева, И.** Элементная база для построения цифровых систем управления [Текст] / И. Музылева.— М.: Техносфера, 2006.— 144 с.

4. **Ослэндер, Д.М.** Управляющие программы для механических систем: объектно-ориентированное проектирование систем реального времени [Текст] / Д.М. Ослэндер.— М.: Бином, 2004.— 416 с.

5. **Промышленная автоматика** [Текст]: Каталог продукции OMRON. 2008 г.

6. **Громов Ю.Ю.** Программирование на языке СИ [Текст]: Учебное пособие / Ю.Ю. Громов, С.И. Татаренко.— Тамбов, 1995.— 169 с.

7. **Подбельский В.В.** Программирование на языке СИ [Текст]: Учебное пособие / В.В. Подбельский, С.С. Фомин.— Москва, 2004.— 600 с.

8. **Павловская Т.А.** С++. Объектно-ориентированное программирование. Практикум [Текст] / Т.А. Павловская, Ю.А. Щупак.— СПб.: «Питер», 2005.

9. **Моли, Б.** Unix/Linux. Теория и практика программирования [Текст] Б. Молли.— «Кудиц-образ», 2004.

10. **Крис Х. Паппас, Уильям Х. Мюррей** III. Отладка в С++. Руководство для разработчиков [Текст]— Бином, McGraw-Hill Companies, 2001.

REFERENCES

1. **Voinov K.N., Khrushev A.S., Shalimov V.G., Orlov S.V., Lutsenko V.A., Nikitin P.O., Pavlov V.A.** Obespechenie nadezhnosti scheta monetnoj produktsii [Tekst] // Tribologija i nadezhnost: Proceedings of Petersburg State Transport University.— Petersburg, 2009.— P. 257–265. (rus.)

2. **Vodovozov A.M.** Tsifrovye elementy system avtomatiki [Tekst]: Uchebnoe posobie.— M.: Akademia, 2006.— 244 p. (rus.)

3. **Muzyleva I.** Elementarnaya baza dlya postroeniya tsifrovykh system upravleniya [Tekst].— M.: Tehnosfera, 2006.— 144 p. (rus.)

4. **Oslender D.M.** Upravlayushchie programmy dlya mekhanicheskikh system: ob'ektno-orientirovannoe proektirovaniye system real'nogo vremeni [Tekst].— M.: Binom, 2004.— 416 p. (rus.)

5. **Promyshlennaya avtomatika** [Tekst]: Katalog produktsii OMRON.— 2008.

6. **Gromov Yu.Yu., Tatarenko S.I.** Prorammirovanie na yazyke SI [Tekst]: Uchebnoe posobie.— Tambov, 1995.— 169 p. (rus.)

7. **Podbelskiy V.V., Fomin S.S.** Prorammirovanie na yazyke SI [Tekst]: Uchebnoe posobie.— M., 2004.— 600 p. (rus.)

8. **Pavlovskaya T.A., Shchupak Yu.A.** C++. Ob'ektno-orientirovannoe programmirovanie. Praktikum [Tekst].— SPb.: Piter, 2005. (rus.)

9. **Brus Moli.** Unix/Linux. Teoriya I praktika programmirovaniya [Tekst].— Kudits-obraz, 2004. (rus.)

10. **Kris X.Puppus, William X. Murrey** III. Otladka v C++. Rukovodstvo dlya razrabotchikov [Tekst].— Binom, McGraw-Hill Companies, 2001. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОРЛОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизированного проектирования Петербургского государственного университета путей сообщения, директор Санкт-Петербургского монетного двора Гознака,; 190031, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: sor.kr@mail.ru

ХРУЩЕВ Антон Сергеевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизированного проектирования Петербургского государственного университета путей сообщения; 190031, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ktmrs@pgups.edu

AUTHORS

ORLOV Sergey V. — Petersburg State Transport University; 190031, 9 Moskovsky pr, Saint Petersburg; e-mail: sor.kr@mail.ru

KHRUSHEV Anton S. — Petersburg State Transport University; 190031, 9 Moskovsky pr, Saint Petersburg; e-mail: ktmrs@pgups.edu

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 625.032

К.В. Елисеев, Ю.Г. Исполов, А.М. Орлова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ КОНТАКТЕ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ С РЕЛЬСАМИ

K.V. Eliseev, Yu.G. Ispolov, A.M. Orlova

CONTACT FORCES BETWEEN WHEELSET AND RAILS DETERMINING

Для определения сил, действующих в контакте колеса и рельса во время движения подвижного состава, используются системы, включающие в себя измерительные колесные пары и алгоритмы обработки измеряемых величин. Предложен новый метод, позволяющий получать значения всех компонент сил и координаты точек контакта.

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОНТАКТНЫЕ СИЛЫ. ПСЕВДООБРАТНАЯ МАТРИЦА. ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ.

Systems that contain instrumented wheelsets and algorithms of measurements evaluations are used to obtain contact forces between wheels and railway while car is moving. The new method of evaluations was developed. It allows evaluation of all contact forces components and contact points coordinates.

STRUCTURAL MECHANICS. STRAIN MEASUREMENT. INVERSE PROBLEM. SIMULATION. CONTACT FORCES. RAILWAY TECHNOLOGY.

Силы, возникающие между колесами и рельсовым путем, — важнейшие параметры, характеризующие движение подвижного состава. Задача нахождения основной вертикальной компоненты вектора силы стоит на первом месте, хотя и другие две компоненты, а также координаты точек контакта существенны.

Непосредственное измерение сил затруднено, поэтому используются измерения других величин, обычно измерения деформаций с помощью тензометрических датчиков [4], и последующее применение алгоритмов обработки результатов. Получили распространение две основные схемы расположения датчиков — на рельсовом пути и на колесной паре [5, 7–10].

Первая схема отличается простотой реализации, но ее основной недостаток — ограниченность области измерений.

Вторая схема оказывается существенно более сложной. Датчики устанавливаются на вращающихся элементах (колеса, оси), что требуют применения аппаратуры беспроводной передачи измерений. Преобразование деформаций в силы также является нетривиальной процедурой, однако возможность продолжительной записи во время движения делает такие схемы предпочтительными.

В статье изложены основы разработанной схемы и приведены некоторые результаты ее использования.

Схема измерений

При разработке схемы измерений необходимо увязать в единое целое следующие компоненты: колесную пару, геометрия колес которой определяет возможность установки тензометров и их расположение; измерительную аппаратуру с ограниченным числом каналов; калибровочный стенд; алгоритм вычислений сил и координат точек контакта.

Рассматривается колесная пара типа РВ2Ш-957-Г, оборудованная колесами с криволинейным диском. Сечение колеса представлено на рис. 1. Колея — 1520 мм, диаметр по кругу катания — 957 мм. Колесо цельное, состоит из трех частей — ступицы, диска и обода. В качестве измерительного и регистрирующего устройства используется радиотелеметрический комплекс, имеющий 64 канала.

Основа алгоритма состоит в следующем. Рассматривается отдельная колесная пара, установ-

ленная в подшипниках (рис. 2). Принята следующая схема крепления: перемещения — $u_{xi} = 0$ и $u_{zi} = 0$; повороты — $\theta_{xi} = 0$; жесткости на перемещении вдоль пути и повороте вокруг вертикальной оси соответствуют жесткостям скобы крепления.

Принято допущение, что контакт точечный, все три компоненты сил R_x, R_y и R_z прикладываются к колесу в одной точке. Моменты, возникающие при распределенном контакте, не учитываются.

Задаются силы, действующие со стороны рельсов на колеса. Проводятся измерения деформаций на поверхностях дисков колес. Далее используются обозначения: вектор-столбец измеряемых деформаций $\varepsilon = [\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n]^T$; вектор-столбец сил, действующих в местах контакта колес *1*, *2* и координат точек контакта x_i, $R = \left[R_{x1}, R_{y1}, R_{z1}, R_{x2}, R_{y2}, R_{z2}, x_1, x_2 \right]^T$.

Проводится базовый расчет при заданных силах и координатах точек контакта R_0. В результате расчета получаются значения деформаций ε_0. Проведя серию экспериментов, задавая приращение одной из компонент сил или смещение точки контакта, можно получить систему линейных алгебраических уравнений, которые связывают приращения измеряемых деформаций и приращения приложенных сил (а также координат точек контакта):

$$\Delta\varepsilon = \mathrm{A}\Delta R. \qquad (1)$$

Здесь A — матрица Якоби размера $n \times m$:

$$\mathrm{A} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial R} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial R_1} \cdots \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial R_m} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \frac{\partial \varepsilon_n}{\partial R_1} \cdots \frac{\partial \varepsilon_n}{\partial R_m} \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

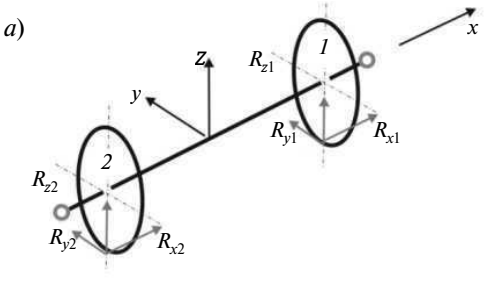


Рис. 2. Схема (*а*) и модель (*б*) колесной пары

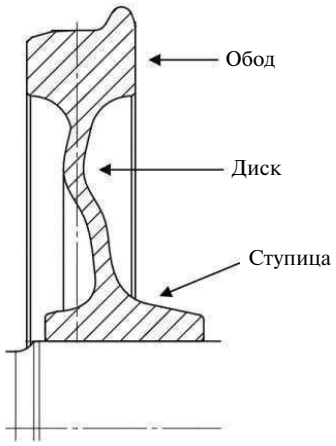


Рис. 1. Сечение колеса

Поскольку здесь число уравнений $n = 64$ больше числа неизвестных $m = 8$, система уравнений, как правило, не имеет точного решения. В этом случае будем находить так называемое «псевдорешение» [1, 3], которое дает вектор-столбец ΔR, минимизирующий евклидову норму ошибки $\left\| A\Delta R - \Delta\varepsilon \right\|$:

$$\Delta R = \left(\mathrm{A}^T \mathrm{A} \right)^{-1} A^T \Delta\varepsilon, \qquad (3)$$

или, если обозначить $\mathrm{C} = \left(\mathrm{A}^T \mathrm{A} \right)^{-1} \mathrm{A}^T$,

$$\Delta R = \mathrm{C}\Delta\varepsilon. \qquad (4)$$

Силы $\tilde{R}$, действующие в местах контакта колес и рельсов во время эксперимента, можно найти по измеренным значениям деформаций $\tilde{\varepsilon}$ согласно формуле

$$\tilde{R} = R_0 + \Delta R = R_0 + C\left(\varepsilon - \varepsilon_0 \right). \qquad (5)$$

Матрицы A и C могут быть получены разными способами: с использованием подходящей математической модели колесной пары, на калибровочном стенде или совместно.

Создана конечно-элементная модель колесной пары, реализованная в программе Ansys (рис. 2). Колеса моделируются объемными элементами. В области диска, где предполагается установка датчиков, элементы имеют квадратичную аппроксимацию перемещений. Ось моделируется балочными элементами. Материал — упругий.

Расстановка тензометрических датчиков

Предварительный анализ показал, что возможные схемы расстановки тензометров должны включать серии из 16 датчиков, равномерно расставленных на двух окружностях с шагом 22,5° на внутренней поверхности колеса (учитывается количество каналов — 32 на колесо, необходимость использования цикличности по окружности, необходимость проводной связи с передающим устройством, установленным на валу). Использование же, например, восьми датчиков на окружности дает большую ошибку в определении угла поворота колеса при вращении.

Здравый смысл подсказывает, что датчики надо ставить там, где деформации большие и сильнее изменяются при изменении сил, приложенных к колесной паре.

Можно получить и некоторые формализованные оценки. Будем считать, что деформации, полученные в результате эксперимента, измерены с некоторыми погрешностями $\delta\varepsilon$, т. е. вместо истинных значений деформаций $\tilde{\varepsilon}$ имеем фактически измеренные деформации

$$\hat{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon} + \delta\varepsilon. \qquad (6)$$

Погрешность в вычислении приращений сил находится по формуле

$$\delta(\Delta R) = C\delta\varepsilon. \qquad (7)$$

Будем считать, что компоненты вектора-столбца $\delta\varepsilon$ представляют собой случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и с известным среднеквадратическим отклонением σ_ε.

Дисперсия величин $\delta(\Delta R_i)$ определяется формулой

$$D(\delta(\Delta R_i)) = \sigma_\varepsilon^2 \sum_{j=1}^{n} C_{ij}^2, \quad i = 1, \ldots, m, \qquad (8)$$

откуда находится среднеквадратическое отклонение величин $\delta(\Delta R_i)$, равное

$$\sigma(\delta(\Delta R_i)) = \sigma_\varepsilon \sqrt{\sum_{j=1}^{n} C_{ij}^2}, \quad i = 1, \ldots, m. \qquad (9)$$

Предположим, что вместо матрицы A имеется другая матрица $A_\gamma = \gamma A$. Погрешность в вычислении сил находится теперь по формуле

$$\delta_\gamma(R) = C_\gamma \delta\varepsilon = \gamma^{-1}\delta(R).$$

Это означает, что если датчики деформаций установить там, где деформации сильнее изменяются при изменении приложенных сил, так, чтобы элементы матрицы A пропорционально увеличились в γ раз, то это приведет к уменьшению погрешности в вычислении сил, действующих на рельсы, в γ раз.

Проведены расчеты, показывающие распределения приращений деформации при изменении условий контакта. Типичные распределения приведены на рис. 3. Существенные деформации наблюдаются вблизи перегибов профиля диска, где и следует располагать тензометрические датчики измерения радиальных деформаций (рис. 4).

Анализ коэффициентов матрицы A показал, что она имеет блочную структуру для всех рассмотренных комбинаций приложенных сил и точек контакта (табл. 1). Физический смысл такой структуры — независимость деформирования колес. Фактически задача расщепляется на две независимые. Силы, приложенные к одному из колес, и точка приложения этих сил могут быть восстановлены по деформациям, измеренным на этом же колесе.

Учет координат точек контакта. Примеры расчетов

При фиксированных координатах точек контакта изменения деформаций конечно же пропорциональны изменениям приложенных сил, а коэффициенты матрицы A постоянны, так как задача линейна. При изменении координат точек контакта коэффициенты матриц A, C изменяются (рис. 5). Коэффициенты, соответствующие силам, изменяются практически линейно. Коэффициенты, соответствующие координатам точек контакта, изменяются сложным образом.

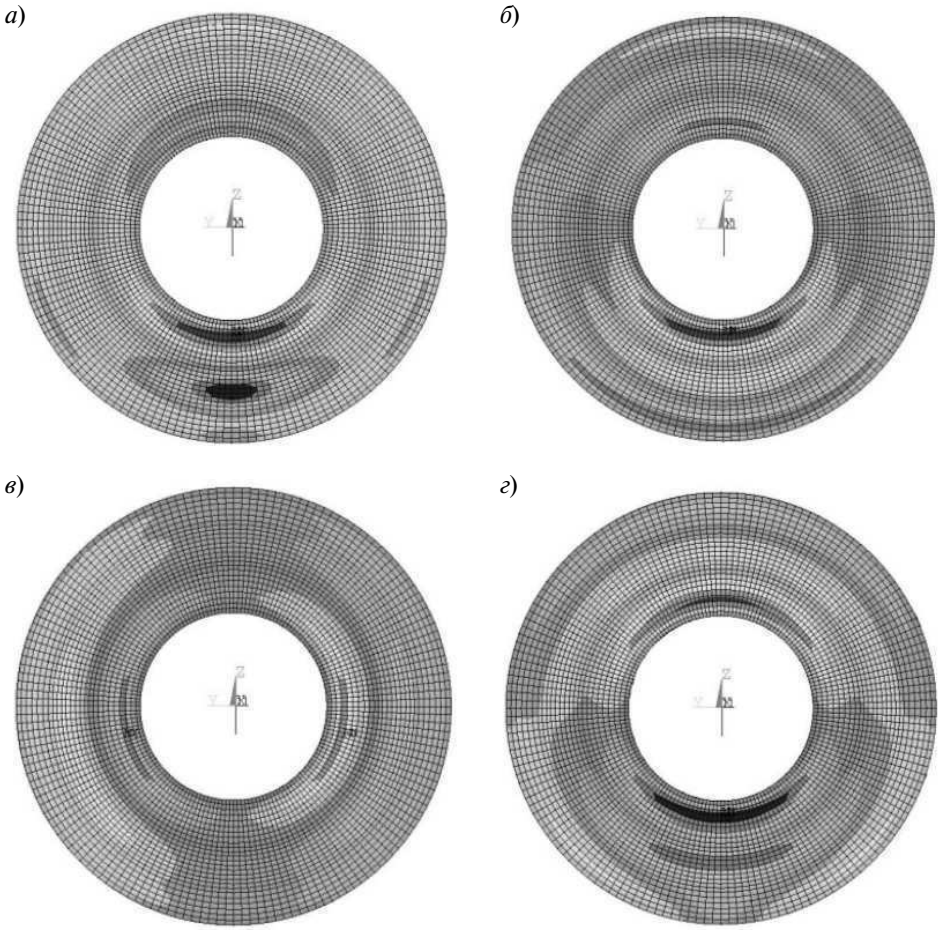


Рис. 3. Типичные картины (вид на диск изнутри колеса) распределения радиальных деформаций при изменении действующих со стороны рельса сил R_x (*а*), R_y (*б*), R_z (*в*) и координаты точки контакта (*г*). Темный цвет соответствует наибольшим изменениям деформаций

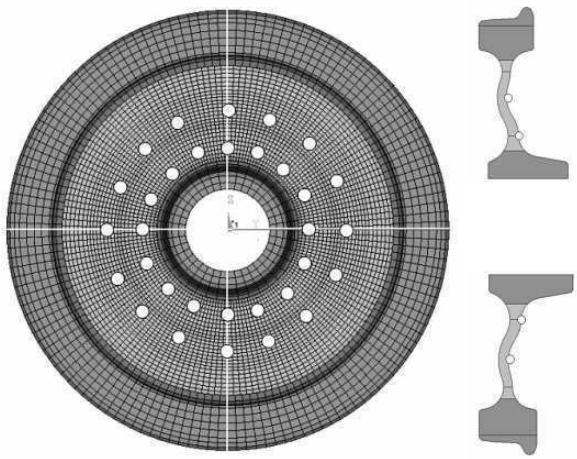


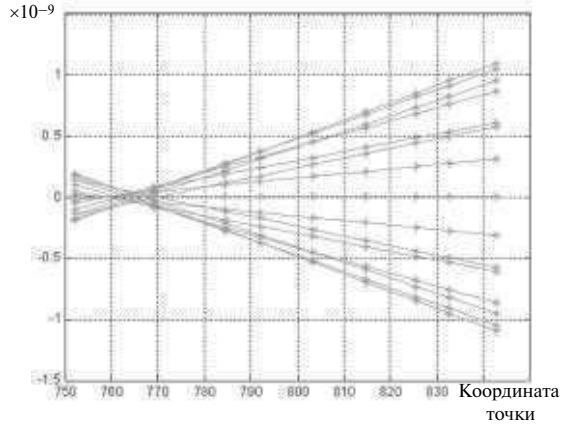
Рис. 4. Расположение тензометрических датчиков на внутренней поверхности колеса

Таблица 1

Блочная структура матрицы А

Место деформации	Силы на колесе *1*	Силы на колесе *2*	Координаты точки контакта на колесе *1*	Координаты точки контакта на колесе *2*
На колесе *1*	–	0	–	0
На колесе *2*	0	–	0	–

а)



б)

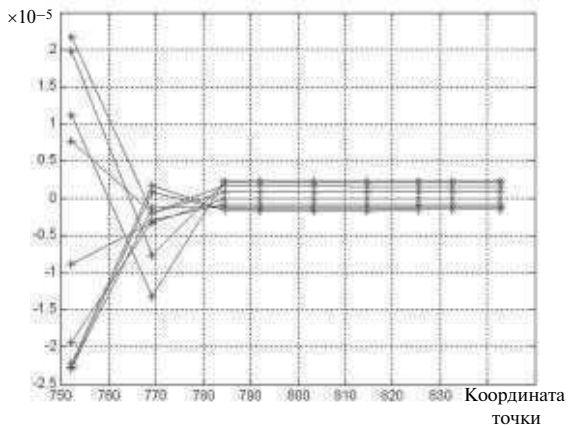


Рис. 5. Зависимости элементов столбцов матрицы А от координат точки контакта на колесе *1*: *а* — элементы 2-го столбца (сила R_{y1}); *б* — элементы 7-го столбца (координата x_1)

Для учета блочной структуры матриц и для учета нелинейной зависимости деформаций от координат точек контакта предложен следующий модифицированный алгоритм расчета. Вычисления производятся для колес *1* и *2* независимо с использованием малых матриц A_1, A_2, составленных из соответствующих блоков исходной матрицы А. Пусть известны матрицы A_k, $k = 1, ..., 4$ для четырех возможных точек контакта. С помощью матриц по известным измерениям деформаций ε_1 можно получить четыре варианта компонент сил и координат точек контакта для колеса *1*. Далее проводится анализ нормы невязки величины $\|A_{1k}R_{1k} - \varepsilon_1\|$. Типичный график соответствующего интерполяционного сплайна представлен на рис. 6.

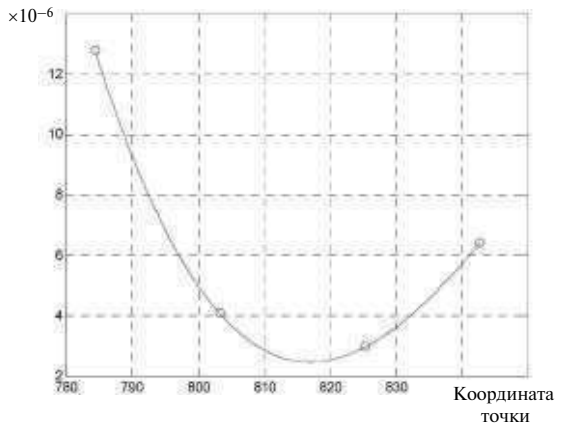


Рис. 6. Интерполяционный сплайн для невязки $\|A_{1k}R_{1k} - \varepsilon_1\|$

Точка минимума дает оценку координаты точки контакта. Зная точку приложения сил, можно воспользоваться интерполяционными сплайнами для получения элементов матриц С по четырем известным C_{1k}. После этого можно получить значения сил по новой матрице. Типичные примеры результатов расчета представлены в табл. 2 и 3.

Восстановление угла поворота

Одна из задач, возникающих при реализации предложенного алгоритма, — определение текущего угла поворота колесной пары. Предлагается использовать выявленные особенности рас-

пределения радиальных деформаций на окружностях установки датчиков (рис. 7).

Локальные экстремумы можно использовать для оценки текущих направлений вверх и вниз. По 16 измеренным значениям деформаций можно построить интерполяционный сплайн, причем для учета погрешностей измерений используется сглаживающий сплайн [2, 6]. На рис. 8 показаны распределения радиальных деформаций на окружности установки датчиков в некотором варианте нагружения при угле поворота колеса 12°.

Проведены численные эксперименты, в которых на значения деформаций накладываются случайные возмущения, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и с заданным среднеквадратическим отклонением $\sigma \cdot 10^{-6}$, равным 1 % от характерного уровня деформации в рассмотренном примере. Полученные с помощью сглаживающих сплайнов результаты позволяют использовать точки экстремумов для определения актуальных направлений вверх и вниз.

Калибровочный стенд

Проведенные численные эксперименты показали, что для восстановления сил можно использовать результаты, полученные на математической модели. Однако при этом не будут учтены особенности реальной колесной пары, а именно: ее размеры после плановой обточки профиля, свойства материала, погрешности наклейки тензометров. Для учета этих факторов может быть использован калибровочный стенд. На нем производятся натурные нагружения с целью уточнения коэффициентов матриц A.

Таблица 2

Результаты восстановления сил и координат точек контакта. Тест для R_{y1}

Параметр, ед. измерен.	Точное значение	Вариант точки контакта для A_k				На базе невязки
		1	2	3	4	
Силы, 10^5 Н:						
R_{x1}	0,0000	–0,0005	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
R_{y1}	0,1000	0,0667	0,0855	0,1138	0,1099	0,0978
R_{z1}	1,3500	1,3535	1,3505	1,3501	1,3494	1,3500
Точки контакта $x1$, мм	814,5	814,3	814,5	814,5	814,5	814,5
$\|A_k R_k - \varepsilon\|$	–	$6{,}39 \cdot 10^{-5}$	$2{,}95 \cdot 10^{-5}$	$4{,}07 \cdot 10^{-5}$	$1{,}27 \cdot 10^{-5}$	–

Таблица 3

Результаты восстановления сил и координат точек контакта. Тест для x_1

Параметр, ед. измерен.	Точное значение	Вариант точки контакта для A_k				На базе невязки
		1	2	3	4	
Силы, 10^5 Н:	0,0000	–0,0006	–0,0001	0,0000	0,0001	0,0000
R_{x1}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
R_{y1}	1,3500	1,3545	1,3509	1,3500	1,3494	1,3500
R_{z1}						
Точки контакта $x1$, мм	810,8	810,5	810,7	810,7	810,7	810,8
$\|A_k R_k - \varepsilon\|$	–	$2{,}09 \cdot 10^{-7}$	$3{,}32 \cdot 10^{-7}$	$1{,}01 \cdot 10^{-7}$	$7{,}52 \cdot 10^{-7}$	–

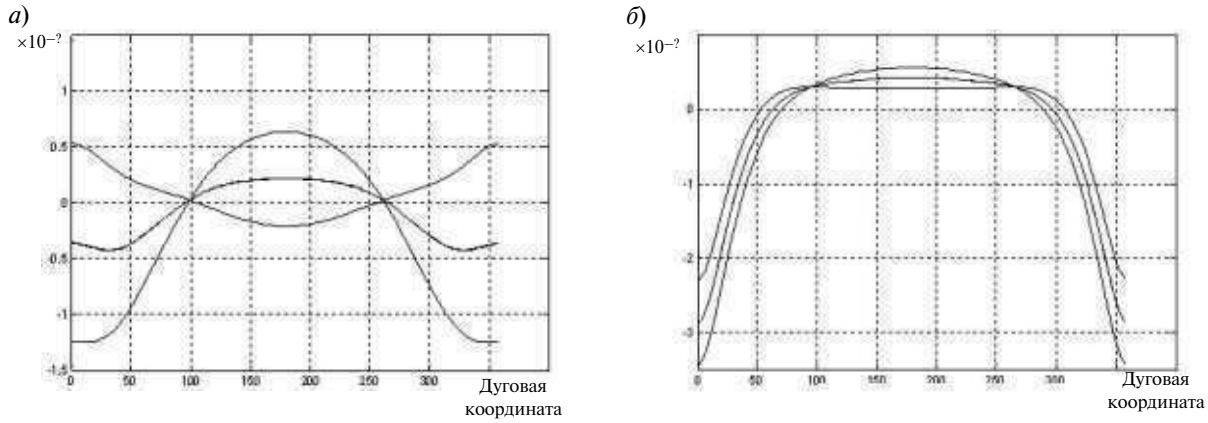


Рис. 7. Распределение радиальных деформаций на двух окружностях для различных сочетаний нагрузок

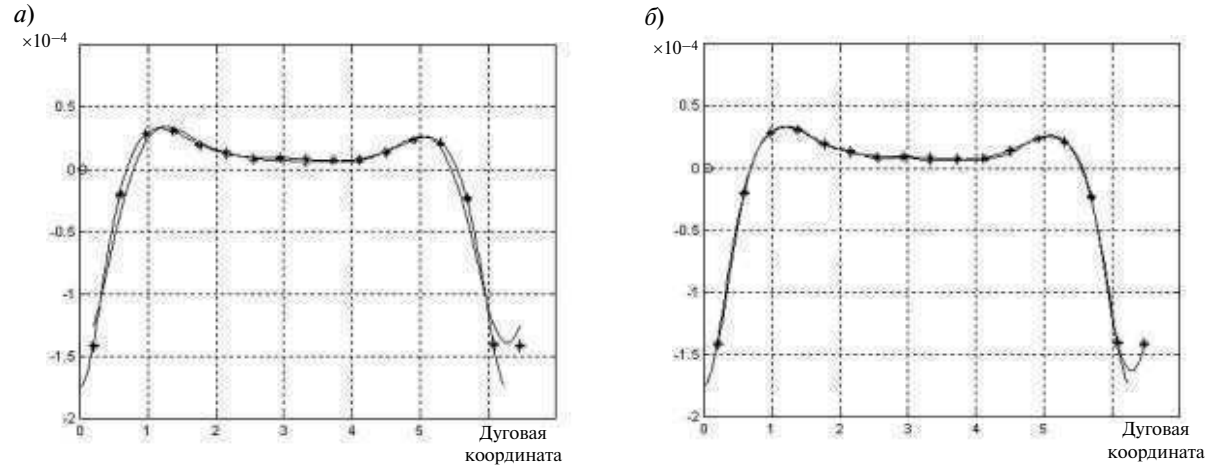


Рис. 8. Сглаживающий сплайн — для радиальных деформаций; кривая — истинные деформации в модели (*а*, *б* — при разных параметрах сглаживания)

Разработана новая методика оценки сил, действующих в контакте между колесом и рельсом, по данным измерений деформаций. Она позволяет получать с достаточной точностью не только все компоненты сил, но и координаты точек контакта. Решена задача определения текущего угла поворота колесной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алберт, А.** Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание [Текст] / А. Алберт.— Пер. с англ.— М.: Наука, 1977.

2. **Завьялов, Ю.С.** Методы сплайн-функций [Текст] / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко.— М.: Наука, 1980.

3. **Канатников, А.Н.** Линейная алгебра [Текст] / А.Н. Канатников, А.П. Крищенко.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

4. **Макаров, Р.А.** Тензометрия в машиностроении [Текст] / Р.А. Макаров, А.Б. Ренский, Г.Х. Боркунский, М.И. Этингоф.— М.: Машиностроение, 1975.

5. **Орлова, А.** Стенд градуировки измерительных колесных пар [Текст] / А. Орлова, А. Мигров, К. Елисеев // Матер. конф. «Transport Problems 2012». Silesian University. Technology Faculty of Transport.— 2012— P. 474–479.

6. **Стечкин, С.Б.** Сплайны в вычислительной математике [Текст] / С.Б. Стечкин, Ю.Н. Субботин.— М.: Наука, 1976.

7. **Auciello, J.** Dynamic simulation of railway vehicles: wheel/rail contact analysis [Text] / J. Auciello, E. Meli,

S. Falomi, M. Malvezzi // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility.— 2009. Vol. 47, Issue 7.— P. 867–899.

8. **Gomez, E.** Railway Dynamometric Wheelsets: A Comparison of Existing Solutions and a Proposal for the Reduction of Measurement Errors [Text] / E. Gomez, A. Alonso, J.G. Gimenez, J. Vinolas, //Proc. of the 1st Intern. Workshop: High-speed and intercity railways.— 2012, Vol. 2, Lnee 148.— P. 261–284.

9. **Ronasi, H.** Identification of Wheel-Rail Contact Forces Based on Strain Measurement and Finite Element Model of the Rolling Wheel [Text] / H. Ronasi, H. Johansson, F. Larsson // Topics in Modal Analysis II: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series.— 2012.— Vol. 6.— P. 169–177.

10. **Ronasi, H.** Inverse identification of wheel–rail contact forces based on observation of wheel disc strains: an evaluation of three numerical algorithms [Text] / H. Ronasi, J. Nielsen // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility.—2013. Vol. 51, № 1.— P. 74–90.

REFERENCES

1. **Albert A.** Regressiya, psevdoinversiya i rekurrentnoye otsenivaniye. perev. s angl [Tekst].— M.: Nauka, 1977. (rus.)

2. **Zavyalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L.** Metody splayn-funktsiy [Tekst].— M.: Nauka, 1980. (rus.)

3. **Kanatnikov A.N., Krishchenko A.P.** Lineynaya algebra [Tekst].— M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. (rus.)

4. **Makarov R.A., Renskiy A.B., Borkunskiy G.Kh., Etingof M.I.** Tenzometriya v mashinostroyenii [Tekst].— M.: Mashinostroyeniye, 1975.

5. **Orlova A., Migrov A., Eliseyev K.** Stend graduirovki izmeritelnykh kolesnykh par [Tekst] // Materialy konferentsii: Transport problems. 2012.— Silesian University of Technology Faculty of Transport.— P. 474–479. (rus.)

6. **Stechkin S.B., Subbotin Yu.N.** Splayny v vychislitelnoy matematike [Tekst].— M.: Nauka, 1976. (rus.)

7. **Auciello J., Meli E., Falomi S., Malvezzi M.** Dynamic simulation of railway vehicles: wheel/rail contact analysis [Text] // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2009. Vol. 47, Issue 7.— P. 867–899.

8. **Gomez E., Alonso A., Gimenez J.G., Vinolas, J.** Railway Dynamometric Wheelsets: A Comparison of Existing Solutions and a Proposal for the Reduction of Measurement Errors [Text] //Proc. of the 1st International Workshop: High-speed and intercity railways.— 2012. Vol. 2, LNEE 148.— P. 261–284. Springer , Heidelberg, 2012.

9. **Ronasi H., Johansson H., Larsson F.,** Identification of Wheel-Rail Contact Forces Based on Strain Measurement and Finite Element Model of the Rolling Wheel [Text] // Topics in Modal Analysis II: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series.— 2012. Vol. 6.— P. 169–177.

10. **Ronasi H., Nielsen J.** Inverse identification of wheel–rail contact forces based on observation of wheel disc strains: an evaluation of three numerical algorithms [Text] // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Vol. 51, No. 1, January 2013.— P. 74–90.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЕЛИСЕЕВ Кирилл Валентинович — ассистент кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kir.eliseev@gmail.ru

ИСПОЛОВ Юрий Григорьевич – доктор физико-математических наук профессор кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: isplolov@mail.ru

ОРЛОВА Анна Михайловна — доктор технических наук профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства Петербургского государственного университета путей сообщения; 190031, Московский пр. 9 Санкт-Петербург, Россия; e-mail: a-orlova@yandex.ru

AUTHORS

ELISEEV Kirill V. – St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kir.eliseev@gmail.ru

ORLOVA Anna M. – Petersburg State Transport University; 190031, 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, Russia; e-mail: a-orlova@yandex.ru

ISPOLOV Iurii G. – St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: isplolov@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.312.8

А.И. Федотов, С.К. Лисин

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

A.I. Fedotov, S.K. Lisin

SYNTHESIS OF THE NONLINEARITY PARAMETER MODE MEASURING SYSTEMS

Рассматриваются вопросы синтеза нелинейных режимов измерительных систем, применяемых для контроля параметров и механических свойств различных изделий технического назначения. Исследованы математические модели, используемые для оценки и синтеза параметров нелинейных режимов (в том числе перемещений и отклонений длин) объектов. При этом оцениваемые параметры являются параметрами численно решаемой системы уравнений, устанавливающих связь между амплитудой, смещением центра колебаний и фазовым параметром измерительной системы.

МОДЕЛИ. НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ.

The problems of the synthesis of non-linear modes of measurement systems used to control the parameters and mechanical properties of different products. A mathematical model used to estimate the parameters of nonlinear modes (including motion and abnormalities of the lengths) of objects. In this case, the estimated parameters are parameters of the numerical solution of equations relating the amplitude, offset, and phase fluctuations parameter measurement system.

MODELS. NONLINEAR MODES. NUMERICAL METHODS. MEASURING OFF SYSTEMS. CONTROL OF PARAMETERS.

Для повышения эффективности контроля геометрических параметров и свойств неподвижных и движущихся изделий актуально использовать средства измерений, реализующие режимы периодического взаимодействия динамической системы с исследуемым объектом. Соответственно появилась необходимость исследования и прогнозирования динамических режимов [1, 2], способствующих повышению эффективности измерительных подвижных и других систем.

Использование средств измерений контактного типа целесообразно для контроля неподвижных или движущихся со сравнительно невысокой скоростью изделий. Процесс измерения в подобных случаях происходит при непосредственном контакте измерительного наконечника с поверхностью объекта контроля. При этом образование интенсивных режимов в измерительных цепях таких механизмов приводит к появлению зазоров, к преждевременной потере метрологической точности и снижению ресурса средств измерений.

Создание более эффективных средств контактного контроля связано с необходимостью проведения синтеза элементной структуры на основе адекватного моделирования режимов подвижных систем. Расчетные процедуры, направленные на повышение точности и обеспе-

чение защиты элементов механизмов, сводятся к динамическому анализу и синтезу измерительных механизмов.

Исследования, связанные с разработкой и освоением различных по своей физической природе нелинейных измерительных систем, оказывают непосредственное влияние на развитие и совершенствование техники измерения [3] процессов нелинейных колебаний. В большинстве случаев практическое освоение вибрационных процессов становилось возможным лишь после их детального изучения и теоретического описания. Использование подвижных систем, подвергнутых динамическому анализу и синтезу оптимальных параметров, позволяет существенным образом расширить области применения подобных средств измерений.

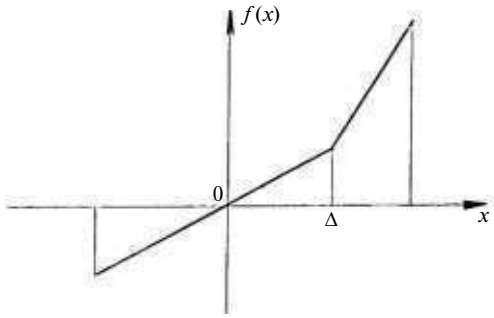
Виброконтактные измерительные устройства реализуют периодические режимы с низкими частотами механических колебаний и могут использоваться для контроля геометрических параметров неподвижных и движущихся изделий [4, 5]. Одномерный виброконтактный преобразователь содержит измерительный наконечник, мультивибратор и высокочувствительную генераторную систему [5]. Динамическая характеристика подвижной системы виброконтактного генераторного преобразователя — нелинейна в силу существенного различия жесткости упругого подвеса измерительного органа в зоне и вне зоны его контакта с поверхностью контролируемого изделия.

Построение математической модели — наиболее ответственная часть исследования нелинейного колебательного процесса, так как включает в себя выбор базового метода решения и в ряде случаев обоснование целесообразности его применения. При этом к вопросам предварительного анализа математической модели относятся анализ свойств функции (непрерывность, нечетность, четность, симметричность), выражающей динамическую характеристику самого процесса, и сопоставление ее с функцией решения выбираемого метода.

Уравнение вынужденных колебаний виброконтактной подвижной системы с односторонней упругой характеристикой имеет вид

$$\ddot{\varsigma} + f(\varsigma) = \eta \cos \xi\tau , \qquad (1)$$

где η, ξ, τ — соответственно амплитуда возбуждения колебаний, частота возмущающей силы (коэффициент расстройки), безразмерное время.



Билинейная характеристика

При этом выражение несимметричной упругой характеристики (см. рис.) при односторонней упругой связи имеет вид

$$f(\varsigma) = \begin{cases} \varsigma & \text{при} \quad \varsigma \le 1; \\ 1 + \chi^2(\varsigma - 1) & \text{при} \quad \varsigma \ge 1, \end{cases} \qquad (2)$$

где ς — безразмерная координата перемещения измерительного стержня; χ — относительная жесткость, $\chi^2 = \dfrac{C_1 + C_2}{C_1}$; x — координата, отсчитываемая от положения равновесия; m — масса измерительного стержня; C_1, C_2 — жесткости упругого подвеса и измеряемого тела; Δ — зазор между измеряемой поверхностью и равновесным положением измерительного стержня.

В соответствии с методом гармонического баланса решение уравнения (1) записывается в виде

$$\varsigma = s_0 + s \cos \psi , \qquad (3)$$

где s_0 и s — смещение центра и амплитуда колебаний вибрационной подвижной системы; $\psi = \xi\tau$ при $0 \le \psi \le \pi$.

Выбор метода решения поставленной задачи должен осуществляться с учетом свойств функции упругой связи и возбуждения подвижной системы. В результате подстановки выражения (3) и значений коэффициентов линеаризации упругой характеристики $f(\varsigma)$ в (1) получим соотношения

$$f_0 = 0 ; \qquad (4)$$

$$\eta = f_1 - \alpha\xi^2 . \qquad (5)$$

Уравнение $\varsigma(\psi_1) = 1$, соответствующее положению узловой точки кусочно-линейной характеристики, принимает вид

$$s_0 + s \cos \psi_1 = 1 . \qquad (6)$$

Система трансцендентных уравнений для определения искомых переменных s_0, s и ψ_1 методом гармонического баланса — следующая:

$$s_0 = \frac{1}{1-\pi/(\chi^2-1)(\mathrm{tg}\,\psi_1-\psi_1)}; \quad (7)$$

$$s = \eta / \left|1+(\chi^2-1)(\psi_1-0{,}5\sin 2\psi_1)/\pi-\xi^2\right|; \quad (8)$$

$$s\cos\psi_1 = 1-s_0\,. \quad (9)$$

Уравнение (9) характеризует амплитуду колебаний s и представляет ее значение, соответствующее координате узловой точки билинейной характеристики, обеспечивая тем самым замкнутость математической модели. В рассматриваемом случае нелинейная система (7)–(9) устанавливает аналитическую зависимость $\alpha(\xi)$. Данная расчетная модель может применяться для исследования процессов взаимодействия измерительного наконечника с упругими и пористыми изделиями, которые описываются динамическими характеристиками ограниченной жесткости [6].

Выразим параметр жесткости в виде функционала

$$\chi^2 = \left(\frac{\eta}{s}-c_1\right)\frac{1}{c_2(\psi_1)}+1\,, \quad (10)$$

где

$$c_1 = 1-\xi^2;\ c_2(\psi_1) = \frac{\psi_1-0{,}5\sin 2\psi_1}{\pi};$$

ψ_1 — соответствует безразмерному времени контактирования измерительного наконечника с поверхностью объекта контроля.

Для обоснования и установления метода виброконтактного измерения жесткости необходимо получить прямую зависимость жесткости от параметра s_0, который характеризует изменение амплитуды выходного сигнала преобразователя при изменении физико-механических свойств контролируемых объектов. При фиксированных значениях η и ξ искомой является функция $\chi(s_0)$.

В общем случае жесткость χ — это функция величин η, ξ, ψ_1, α_0. Среди них параметр α_0 непосредственно находят по показаниям преобразователя. Следовательно, неопределенность этого параметра носит характер статистической погрешности и определяется через среднее квадратическое отклонение [7]. В процессе анализа результата измерений может возникнуть необходимость учета имеющих место погрешностей. По определению погрешность есть разность между результатом измерений и истинным (действительным) значением величины.

При проведении повторяемых опытов апостериорная информация характеризуется статистической составляющей погрешности в виде стандартного отклонения. С учетом того, что повторяемые опыты могут содержать случайную и систематическую погрешности [8, 9], необходимо рассмотреть их статистические эквиваленты — неопределенности. Форма представления неопределенности типа среднеквадратического отклонения (СКО) обусловлена правилами анализа случайных величин, в данном случае правилами анализа результатов повторяемых измерений. Результаты многократных измерений используют, чтобы определить закон распределения вероятностей измерений. В качестве меры неопределенности типа СКО выбирают ее оценку — стандартное отклонение измеряемой величины.

Параметры η, ξ устанавливаются, а их неопределенности носят характер систематической погрешности. Неопределенность фазового параметра ψ_1 контролируется специальными средствами. Общая неопределенность искомого значения χ получается по правилу получения неопределенности косвенных измерений.

Модель среднего квадратического отклонения s_χ при независимой статистической связи переменных и функций рассматриваемой математической модели имеет вид

$$s_\chi = \sqrt{\left(\frac{\partial\chi}{\partial\xi}s_\xi\right)^2+\left(\frac{\partial\chi}{\partial\eta}s_\eta\right)^2+\ldots+\left(\frac{\partial\chi}{\partial\alpha_0}s_{\alpha_0}\right)^2}\,. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет установить неопределенность оценки жесткости χ, являющейся параметром численно решаемой нелинейной системы. Совокупность, включающая (7–10), служит аналитической основой измерений жесткости в режимах периодического виброконтакта измерительного наконечника с исследуемым объектом. Так как параметры η, ξ устанавливаются, то неопределенности точности их установки носят характер систематических погрешностей этих измеряемых величин. Неопределенность фазового параметра ψ_1, контролируемого специальными средствами, вычисляется так же, как для случая однократного измерения по градуированной шкале с учетом класса точности прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боголюбов, Н.Н.** Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Текст] / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский.— М.: Наука, 1974.— 504 с.

2. Вибрации в технике. Защита от вибраций и ударов [Текст]: Справочник. Т.6, / Под ред. К.В.Фролова.— М.: Машиностроение, 1981.— 456 с.

3. **Козлов, В.Н.** Децентрализованная стабилизация параметрических возмущенных крупномасштабных систем [Текст] / В.Н. Козлов, В.Н. Шашихин // Научно-технические ведомости СПбГТУ.— 1996. № 1.— С. 62–65.

4. **Федотов, А.И.** Теория измерений [Текст] / А.И. Федотов, С.К. Лисин, Г.С. Морокина.— СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013.— 325 с.

5. **Патент РФ Ru– 2016374 c1.** Виброконтактный преобразователь для линейных измерений [Текст] / Б.А. Глаговский [и др.].— Опубл. 15.07.94.— Бюлл. 1994. № 13.

6. **Лисин, С.К.** Использование теории переноса ошибок при оценке параметров нелинейных систем [Текст] / С.К. Лисин, А.И. Федотов// Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 3(84).— С. 184–187.

7. **Лисин, С.К.** Технические измерения [Текст]: Учебное пособие / С.К. Лисин, А.И. Федотов.— СПб.: Изд-во НМСУ «Горный», 2012.— 66 с.

8. **Солопченко, Г.Н.** Метрология, стандартизация, сертификация. Основы законодательной и прикладной метрологии [Текст]: учебное пособие /Г.Н. Солопченко.— СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012.— 203 с.

9. **Шишкин, И.Ф.** Теоретическая метрология. Ч.1. Общая теория измерений [Текст]: учеб-метод. комплекс. Учебное пособие / И.Ф. Шишкин— 3-е изд., перераб. и доп.— СПб.: Изд–во СЗТУ, 2008.— 189 с.

REFERENCES

1. **Bogoliubov N.N., Mitropol'skii Yu.A.** Asimptoticheskie metody v teorii nelineinykh kolebanii [Tekst].— M.: Nauka, 1974.— 504 s. (rus.)

2. Vibratsii v tekhnike. Zashchita ot vibratsii i udarov [Tekst]: Spravochnik T.6, / Pod red. K.V.Frolova.— M.: Mashinostroenie, 1981.— 456 s. (rus.)

3. **Kozlov V.N., Shashikhin V.N.** Detsentralizovannaia stabilizatsiia parametricheskikh vozmushchennykh krupnomasshtabnykh system [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU.— 1996. № 1.— S. 62–65. (rus.)

4. **Fedotov A.I., Lisin S.K., Morokina G.S.** Teoriia izmerenii [Tekst] .— SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013.— 325 s. (rus.)

5. **Patent RF Ru– 2016374 s1.** Vibrokontaktnyi preobrazovatel' dlia lineinykh izmerenii [Tekst] / B.A. Glagovskii [i dr.].— Opubl. 15.07.94.— Biull. 1994. № 13. (rus.)

6. **Lisin S.K., Fedotov A.I.** Ispol'zovanie teorii perenosa oshibok pri otsenke parametrov nelineinykh system [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2009. № 3(84).— S. 181–184. (rus.)

7. **Lisin S.K., Fedotov A.I.** Tekhnicheskie izmereniia: uchebnoe posobie [Tekst].— SPb.: Izd-vo NMSU «Gornyi», 2012.— 66 s. (rus.)

8. **Solopchenko G.N.** Metrologiia, standartizatsiia, sertifikatsiia. Osnovy zakonodatel'noi i prikladnoi metrologii: uchebnoe posobie [Tekst] / G.N. Solopchenko.— SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012.— 203 s. (rus.)

9. **Shishkin I.F.** Teoreticheskaia metrologiia. Ch.1. Obshchaia teoriia izmerenii: ucheb-metod. kompleks: uchebnoe posobie [Tekst]/— 3-e izd., pererab. i dop.— SPb.: Izd–vo SZTU, 2008.— 189 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДОТОВ Алексей Иванович — доктор технических наук профессор заместитель председателя попечительского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; президент Санкт-Петербургской инженерной академии; 195251, ул. Политехническая д.29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ps@spbstu.ru

ЛИСИН Сергей Кузьмич — кандидат технических наук доцент НМСУ «Горный»; 199106, Васильевский остров, 21 линия, дом 2, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: lisinsk1@mail.ru

AUTHORS

FEDOTOV Aleksei I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ps@spbstu.ru

LISIN Sergei K. — National mineral resources university; 199106, Vasil'evskii ostrov, 21 liniya, 2, St. Petersburg, St. Petersburg, Russia; lisinsk1@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 536–12:539.372

Д.А. Китаева, Я.И. Рудаев

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

D.A. Kitaeva, Ya.I. Rudaev

SYNERGETIC CONCEPTIONS IN MECHANICS OF DYNAMIC SUPERPLASTICITY

Рассмотрено соответствие представлений о сверхпластичности динамического типа положениям теории самоорганизации диссипативных структур. Предложен подход к моделированию деформационных процессов при сверхпластическом течении промышленных алюминиевых сплавов с учетом наличия пограничных областей. Уравнение состояния записано в форме минимума потенциала катастрофы сборки и дополнено эволюционными уравнениями для управляющего параметра и внутренних параметров состояния. Приведен пример сопоставления теоретических и опытных данных.

СИНЕРГЕТИКА. ДИНАМИЧЕСКАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ. ПРОМЫШЛЕННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ.

Conformity of dynamic type superplasticity conceptions to the theory of self-organization of dissipative structures basis is considered. Approach to modeling of deformation processes is offered at a superplastic current of industrial aluminum alloys taking into account existence of boundary regions. The condition equation is written down in the form of a minimum of potential of assemblage catastrophe and added with the evolutionary equations for the operating parameter and internal parameters of a condition. The example of comparison of theoretical and experimental data is given.

SYNERGETICS. DYNAMIC SUPERPLASTICITY. PHASE TRANSITIONS. INDUSTRIAL ALUMINUM ALLOYS.

Синергетичность процессов сверхпластического течения

Сверхпластичность неорганических материалов внешне проявляется в форме аномального квазиоднородного удлинения при малых значениях напряжений пластического течения. Начиная с классической работы К. Пирсона [1] сверхпластическую деформацию связывают с превалированием механизма зернограничного проскальзывания со сменой соседей зерен [2, 3] над другими формами массопереноса. Не ставя сказанное под сомнение, отметим, что реализация такого механизма облегчается формированием ультрамелкозернистой структуры на предварительном этапе (микрозеренная или структурная сверхпластичность) или в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность). Поскольку сверхпластичность проявляется не всегда, а лишь в определенных термомеханических режимах, то можно считать, что наличие ультрамелкого зерна — необходимое, но недостаточное условие развития эффекта. К мелкозернистости следует добавить требование равноосности и несклонности к росту зерна при нагреве и деформации. Важным структурным элементом считаются также границы зерен.

При динамической сверхпластичности, как известно [4, 5], формирование мелкого зерна происходит в процессе нагрева и деформации. Последнее, естественно, связано с сильнейшей структурной перестройкой в условиях, при которых имеют место аллотропические превращения различной природы. В частности, в алюминиевых сплавах таким структурным переходом является динамическая рекристаллизация.

Таким образом, при анализе на макроуровне эффектов, характеризующих динамическую сверхпластичность, полезным инструментом

может оказаться использование представлений о неравновесных фазовых переходах. Очевидно, что подобные переходы размыты во времени. Поэтому логично привлечь динамические модели для осмысления природы сверхпластичности.

Использование квазистационарного подхода к описанию динамических процессов приводит к тому, что развитие любой сложной системы можно рассматривать как смену одного устойчивого состояния другим с кратким периодом переходного процесса между ними. Это позволяет в соответствии с принципом локального равновесия характеризовать состояние незамкнутой неравновесной системы локальными термодинамическими потенциалами, зависимость которых от времени выражается через термодинамические параметры, причем для них всех выполняются уравнения классической термодинамики. Иначе говоря, последнее утверждение не противоречит положениям рациональной механики сплошных сред.

Однако анализ реальной деформационной динамики показывает, что период неравновесного состояния может оказаться слишком длительным, чтобы им можно было пренебречь. Более того, иногда требуется поддерживать систему в указанном неравновесном состоянии, управляя им. Поэтому квазистационарный подход эффективен до того момента, когда в силу некоторых причин характер стационарного состояния изменится кардинальным образом. Подобные изменения, называемые бифуркациями, принадлежат уже к области приложений методов нелинейного динамического анализа. Методология анализа нелинейных динамических систем уже оформилась в научное направление, называемое синергетикой, которое нацелено на выявление общих принципов эволюции и самоорганизации сложных систем различной природы на основе построения изучения нелинейных математических моделей.

Обсудим некоторые представления, приводящие к соответствию особенностей сверхпластичности положениям синергетики.

В современной трактовке принято считать [6], что синергетика изучает возникновение упорядоченных (диссипативных) структур в открытых системах за счет взаимодействия с внешней средой.

В рамках приведенного определения образцы из деформируемого конструкционного материала будем рассматривать как пространственную незамкнутую систему, состоящую из большого числа элементов, структура которых не задается извне. Процессы, приводящие к такому возникновению структур, называются, как известно, самоорганизацией [7].

Самоорганизация может быть вызвана различными способами [7]. Но в конкретных случаях одновременно нагрева и статического нагружения металлических материалов можно считать, что реализуется медленное однородное изменение воздействия окружающей среды, при котором сложная система в некоторых критических точках переходит в новые состояния, отличающиеся более высоким порядком и структурой. В соответствии с [7] такой способ относится к самоорганизации через изменение управляющих параметров. Иными словами, процесс самоорганизации осуществляется как последовательность неравновесных фазовых переходов. Переходы возникают при изменении одного или нескольких управляющих — бифуркационных — параметров.

Взаимодействие элементов сложной системы неизбежно переносится на внешние макроэффекты, порождаемые структурными изменениями. Указанные эффекты принято называть синергетическими [7]. Основной особенностью синергетических эффектов следует считать упорядоченность, целенаправленность поведения сложной системы при относительной хаотичности поведения отдельных элементов или подсистем.

Укажем, что идея связать синергетические эффекты со сверхпластичностью впервые была высказана в [8, 9]. В большом обзоре [10] подробно изложены основные представления о синергетике, в том числе применительно к сверхпластичности. Однако убедительные доказательства связи сверхпластичности с неравновесными фазовыми переходами в [10] отсутствуют. Другие исследования в этом направлении не известны. Более того, в большинстве оригинальных работ сверхпластичность рассматривается отдельно, вне связи с предшествующими состояниями. Определенную негативную роль при этом играет оценка сверхпластичности по величине коэффициента скоростной чувстви-

тельности, который физически необоснован, а также недостаточное количество систематических экспериментальных данных. Другими словами, остаются неизученными условия наступления и окончания эффекта.

Обобщая изложенное, отметим следующие принципиальные моменты [7], связанные с термодинамическим подходом. Как известно, равновесная термодинамика применима к системам, находящимся в тепловом равновесии. Линейная термодинамика необратимых процессов действует вблизи теплового равновесия. Синергетические системы находятся далеко от теплового равновесия. Хотя термодинамическое понятие параметра порядка используется и в синергетике, однако указанные параметры имеют несколько другой смысл, чем в термодинамике. Неравновесные фазовые переходы синергетических систем, естественно, более разнообразны, чем фазовые переходы систем, находящихся в состоянии теплового равновесия. Так, в синергетике первостепенное значение придается понятию управления. При этом изменение управляющих параметров может производиться более или менее произвольным образом, и, как следствие, изучается самоорганизация системы, т. е. различные состояния, в которые она переходит при изменении управляющих параметров. Используя асимптотический метод [7], можно анализировать структурные состояния нелинейных систем, выделяя в них некоторые предельные состояния, качественный анализ которых приводит к количественной оценке процессов самоорганизации.

Теперь становится очевидным, что гипотеза о физической природе сверхпластичности, сформулированная в [11], имеет синергетическую природу. В соответствии с указанной гипотезой сверхпластичность есть суперпозиция деформации и одного или нескольких превращений. В таком случае естественно предположить существование критических температурных точек перехода материала в сверхпластическое состояние. Последнее не противоречит общему постулату изотропии А.А. Ильюшина или, в несколько другой форме, принципу детерминизма. Наложение деформаций приводит к появлению вблизи критических точек ограниченной области температур, соответствующих процессу перехода из одного структурно устойчивого состояния в другое. Материалы, имеющие полиморфные превращения, в указанной области (в некотором подлежащем определению интервале скоростей деформаций) проявляют сверхпластические свойства, которые в [5] объясняются состоянием предпревращения.

Сплавы с исходным ультрамелкозернистым строением на зернограничное проскальзывание со сменой соседей зерен реагируют сильным изменением термодинамических функций отклика. Так, эксперименты на мелкозернистом сплаве Zn — 22 %Al показали резкое возрастание удельной теплоемкости c_p [12]. Кроме того, для упомянутого сплава показано, что сверхпластичности соответствует неравновесное структурное состояние, наблюдаемое в процессе эвтектоидного превращения.

Для большинства промышленных титановых сплавов сверхпластичность проявляется в области полиморфных превращений или обусловлена динамической рекристаллизацией [2, 11].

Вывод из приведенных рассуждений вполне однозначен: природа сверхпластической деформации связана с температурно-скоростными режимами структурной неустойчивости деформируемого материала [13]. По существу, к этому же сводится и концепция «оптимизации гетерогенности» [10].

Остановимся еще на одном моменте. В [10] на основе анализа многочисленных данных отмечено, что сверхпластичность независимо от типа сплава реализуется при сосуществовании кристаллической и квазиаморфной (аморфной) фаз. Последнее подтверждается теорией структурных превращений, в соответствии с которой при сверхпластичности имеет место неустойчивое состояние границ. При этом возникает «жидкоподобное» или аморфное состояние границ, играющее, на наш взгляд, роль своеобразной смазки, стимулирующей зернограничное проскальзывание. Эта точка зрения соответствует интерпретация сверхпластичности как явления, происходящего в условиях неравновесной (возбужденной) динамической структуры.

Таким образом, можно утверждать, что сверхпластичность реализуется как некоторое особое состояние деформируемого материала в иерархии состояний при меняющихся температурных и кинематических условиях. При этом напряжение как функция температуры, степени

и скорости деформации должно удовлетворять переходным условиям, которые, например для алюминиевых сплавов, сформулированы в [13].

Очевидно, что математическая модель, описывающая закономерности высокотемпературной деформации в широком скоростном диапазоне, должна отражать динамику процесса. Поэтому логично отождествлять деформируемый материал с автономной динамической системой, подчиняющейся кинетическому уравнению [14]

$$\frac{d\eta}{dt} = F(\eta,\beta), \qquad (1)$$

где $F(\eta,\beta)$ — силовой фактор; β определяет семейство управляющих параметров; η — обобщенная координата (параметр порядка), задающая положение системы в пространстве температурных и кинематических переменных.

Известно [7], что флуктуирующие силы могут вывести динамическую систему из аттрактивного состояния, соответствующего минимуму термодинамического потенциала. Однако второе начало термодинамики вынуждает систему вернуться в начальное состояние. Это означает, что существование термодинамического потенциала делает систему нечувствительной к структурной изменчивости. Иными словами, подход, основанный на методах линейной необратимой термодинамики, оказывается неприемлемым для анализа сильно неравновесных систем. К ним относится материал, определенным этапом деформирования которого является сверхпластичность. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является существенное упрощение уравнения (1). Указанное упрощение достигается, если внешние силы принять консервативными, а ответственность за флуктуации возложить на управляющие параметры. Тогда вместо (1) можно записать

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\partial\Phi(\eta,\beta)}{\partial\eta} = F(\eta,\beta). \qquad (2)$$

Здесь $\Phi(\eta,\beta)$ — «потенциальная» функция, а материал рассматривается как градиентная динамическая система.

Вдали от равновесия градиентная динамическая система эволюционирует к некоторому стационарному состоянию, устанавливаемому из условия

$$\frac{\partial\Phi(\eta,\beta)}{\partial\eta} = 0. \qquad (3)$$

В стационарных условиях смена состояний осуществляется за счет изменения управляющего параметра. Математически подобные смены описывает элементарная теория катастроф [14]. На целесообразность привлечения теории катастроф в качестве основы для формулировки определяющих соотношений впервые указано в [13], а реализовано в [4, 5].

Сверхпластичность алюминиевых сплавов

Установлено [15], что сверхпластичность промышленных алюминиевых сплавов объясняется происходящим при нагреве и деформации структурным фазовым переходом — динамической рекристаллизацией. Происходящие при этом структурные изменения заключаются [15] в возникновении равноосной микроструктуры с очень мелким зерном, примерно совпадающим по размерам с субзернами. Так создается структурная ситуация, способствующая реализации механизма зернограничного проскальзывания и, естественно, проявлению сверхпластических свойств. Указанная ситуация соответствует промежуточным структурным состояниям между исходным деформированным и крупнозернистым рекристаллизованным, включая метастабильные состояния. Следовательно, наличие нагрева и деформации в определенном сочетании при неизменном химическом составе изменяет структурное состояние материалов.

В связи со сказанным актуальнейшей становится задача установления термомеханических условий реализации явления сверхпластичности. При этом выделяются две проблемы:

1. Пусть имеется массив экспериментальных данных по деформированию материала в широких температурно-скоростных диапазонах. Требуется выработать достаточно эффективные критерии оценки выборки опытных данных, отвечающих проявлению сверхпластических свойств.

2. Условия перехода в сверхпластическое состояние должны иметь аналитическую формулировку механического типа. Очевидно, что деформационный процесс, одним из этапов которого является сверхпластичность, не может

заменяться моделью только нелинейно-вязкой среды, преобладающей в теориях сверхпластичности [2, 3, 10]. Кроме того, при постановке и решении задач объемного формоизменения на базе управляемой сверхпластической деформации к уравнениям состояния предъявляются требования пригодности последних для описания не только процессов сверхпластического течения, но и пограничных со сверхпластичностью областей термопластичности и высокотемпературной ползучести.

Впервые задача определения условий перехода промышленных алюминиевых сплавов в сверхпластическое состояние рассмотрена в [13], хотя попытка решения ее предпринималась и ранее. Постановка указанной задачи основана на большом количестве экспериментальных данных, обобщенных в [4, 5] и относящихся к сплавам АМг5, 1561, Д18Т, 1980, В95, АК4, АК6, АК8.

Для формулировки аналитических условий реализации эффекта сверхпластичности принято уравнение состояния вида

$$\sigma = \sigma\left(\theta, \bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}\right), \qquad (4)$$

где σ — действительное напряжение; θ — абсолютная температура; $\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}$ — соответственно степень и скорость деформации.

Таким образом, ставится задача определения условий, которым должно удовлетворять напряжение как функция температуры степени и скорости деформации, ограничивающая термические и кинематические условия сверхпластичности.

На рис. 1, *а* схематично дано качественное представление накопленных экспериментальных данных по зависимостям напряжения от температуры и скорости деформации. Выявлено существование термических и скоростных диапазонов, в которых изотермы «напряжение — скорость деформации» отклоняются от монотонного характера с появлением точек бифуркации. Ниспадающие ветви указанных изотерм принимаются соответствующими проявлению сверхпластических свойств. Характерные признаки сверхпластичности — низкий уровень напряжений и высокая деформационная способность при растяжении отмечаются в упомянутых диапазонах. Установленная неустойчивость напряжения по отношению к скорости деформации имеет место в температурном интервале $\theta \in \left]\theta_c^m, \theta_c^v\right[$, причем θ_c^m, θ_c^v названы соответственно нижней и верхней критическими температурами.

Далее полагаем, что изотермы $\sigma \sim \dot{\varepsilon}$ описываются гладкими функциями, имеющими точки перегиба, в которых, естественно, выполняются равенства

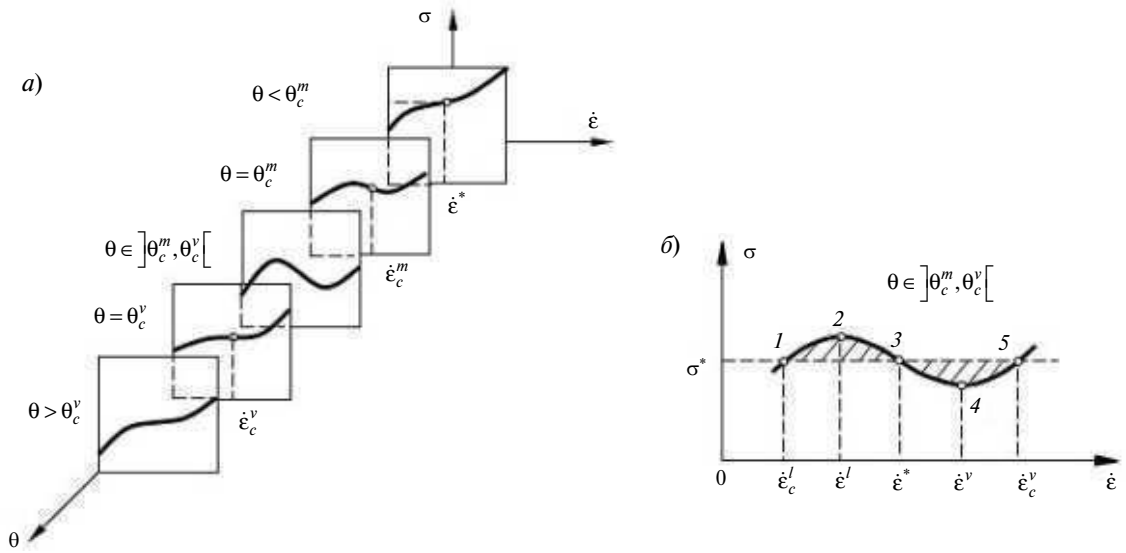


Рис. 1. Качественное представление экспериментальных зависимостей «напряжение — скорость деформации» в различных температурных диапазонах (*а*); условия перехода материала в сверхпластическое состояние (*б*)

$$\left.\frac{\partial^2\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}^2}\right|_{\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}^*}=0. \qquad (5)$$

Здесь скорости деформации $\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}^*(\theta)$ ставится в соответствие напряжение $\sigma^*=\sigma^*(\theta)$ (см. рис. 1, *а*).

Уравнение состояния (4) при критических температурах должно удовлетворять условиям

$$\left.\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\right|_{\theta_c^m,\dot{\varepsilon}^m}=0;\quad \left.\frac{\partial^2\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}^2}\right|_{\theta_c^m,\dot{\varepsilon}^m}=0;$$

$$\left.\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\right|_{\theta_c^v,\dot{\varepsilon}^v}=0;\quad \left.\frac{\partial^2\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}^2}\right|_{\theta_c^v,\dot{\varepsilon}^v}=0\ , \qquad (6)$$

где $\dot{\varepsilon}_c^m,\dot{\varepsilon}_c^v$ – абсциссы точек перегиба изотерм $\sigma\sim\dot{\varepsilon}$ соответственно при θ_c^m,θ_c^v.

Скоростной диапазон структурных превращений при конкретных температурах $\theta\in\left]\theta_c^m,\theta_c^v\right[$ установим, придерживаясь принципа Максвелла [14]. В соответствии с указанным принципом фазовые переходы имеют место при пересечении кривой равновесия компоненты максвелловского множества (рис. 1, *б*). График $\sigma\sim\dot{\varepsilon}$ (рис. 1, *б*) можно рассматривать как фрагмент фазовой диаграммы при $\theta\in\left]\theta_c^m,\theta_c^v\right[$. При этом восходящие ветви участка немонотонности (*1–2–3–4–5*) будем считать соответствующими измельчению исходной деформированной (*1–2*) и формированию крупнозернистой рекристаллизованной (*4–5*) структур. Между ними лежит зона неустойчивости (*2–3–4*), отвечающая проявлению сверхпластических свойств. Скоростной интервал сверхпластичности ограничен точками бифуркации (*2*, *4*), в которых имеют место равенства

$$\left.\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\right|_{\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}^l}=0;\quad \left.\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\right|_{\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}^r}=0\ , \qquad (7)$$

где $\dot{\varepsilon}^l$, $\dot{\varepsilon}^r$ — скорости деформации, ограничивающие диапазоны проявления сверхпластических свойств.

Аналитически принципу Максвелла для определения скоростных диапазонов структурных превращений соответствует интеграл

$$\int_{\dot{\varepsilon}_c^l}^{\dot{\varepsilon}_c^r}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}\right)_\theta\dot{\varepsilon}\,d\dot{\varepsilon}=0, \qquad (8)$$

причем $\dot{\varepsilon}^l$, $\dot{\varepsilon}^r$ — скорости деформаций, определяющие диапазон структурных превращений.

Далее полагаем, что структурная термостабильность горячедеформированных алюминиевых сплавов не зависит от степени деформации, а обусловлена лишь скоростными ограничениями. Поэтому допустимо предположить существование деформационных условий, в которых при неизменной температуре и скорости деформации форма и размеры измельченных зерен сохраняют стабильность. Следовательно, можно утверждать, что

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\bar{\varepsilon}}=0. \qquad (9)$$

Итак, реализация эффекта сверхпластичности промышленных алюминиевых сплавов обусловлена факторами температуры, степени и скорости деформации, удовлетворяющими соотношениям (6)–(9). При этом начальным пунктом является выявление экспериментальным путем неустойчивых изотерм $\sigma\sim\dot{\varepsilon}$ и, как следствие, критических температур θ_c^m,θ_c^v. Скоростной диапазон структурных превращений не следует отождествлять со скоростным интервалом сверхпластичности, поскольку при $\dot{\varepsilon}\in\left]\dot{\varepsilon}_c^l,\dot{\varepsilon}^l\right[$ и $\dot{\varepsilon}\in\left]\dot{\varepsilon}^r,\dot{\varepsilon}_c^r\right[$ имеют место метастабильные состояния.

Термомеханические режимы сверхпластичности исследованных алюминиевых сплавов приведены в таблице.

Теперь понятно, что сверхпластичность может быть интерпретирована как явление, которое происходит в условиях неравновесной (возбужденной) динамической структуры с возникновениям аморфного состояния границ, стимулирующего зернограничное проскальзывание. Макропроявление структурной неравновесности заключается в возникновении неоднозначности напряжения течения по отношению к скорости деформации и температуре и, естественно, в появлении особых точек, соответствующих границам устойчивости. Напомним, что структурные изменения носят необратимый характер.

Классическое описание фазовых переходов в рамках детерминированного подхода предусматривает введение семейства потенциальных функций $\Phi(\eta,\beta)$, зависящих от параметров η

Термомеханические параметры сверхпластических промышленных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Исходное состояние	Параметры деформации					
		Растяжение			Сжатие		
		θ, K	$\dot{\varepsilon}$, c^{-1}	Состояние после воздействия	θ, K	$\dot{\varepsilon}$, c^{-1}	Состояние после воздействия
АМг5	Деформированный	743–783	10^{-3}	СП	743–783	10^{-2}–10^{-1}	СП
1561 (АМг61)	Деформированный	743–783	10^{-3}	СП	–	–	нет
1561 (АМг61)	Литой	–	–	нет	753–793	10^{-2}	СП
Д18Т	Деформированный	783–833	10^{-3}	СП	783–833	10^{-2}	СП
В48	Деформированный	–	–	нет	813–853	10^{-2}	СП
В95	Деформированный	–	–	нет	733–793	10^{-2}	СП
АК4	Деформированный	753–793	10^{-3}	СП	753–793	10^{-2}	СП
АК6	Деформированный	–	–	нет	723–763	10^{-2}	СП
АК8	Деформированный	723–763	10^{-3}	СП	723–763	10^{-2}	СП

В колонке $\dot{\varepsilon}$, c^{-1} приведены порядки скоростей деформаций по модулю; символ «СП» означает наличие сверхпластического состояния материала.

(параметр порядка) и β (управляющий параметр). Из условия качественной идентичности экспериментальным данным выбираем потенциальную функцию в форме катастрофы сборки [14] с учетом влияния внешнего поля:

$$\Phi(\eta,\beta)=\frac{1}{4}m_0\eta^4+\frac{1}{2}\beta(\xi)\eta^2-q\eta\,. \qquad (10)$$

Здесь

$$q=\frac{\sigma}{\sigma^*}-1;\quad \eta=\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^*}-1;\quad \xi=\frac{\theta-\theta_c^m}{\theta_c^v-\theta_c^m}\,, \qquad (11)$$

где $m_0\sim\text{const}$, $\beta=\beta(\xi)$ — функция температуры.

Итак, стандартной редукцией (11) вводится связь описания процесса деформации с теорией катастроф. Поскольку $\eta=\eta(\dot{\varepsilon},\theta)$, то параметр порядка должен анализироваться как коллективная мода.

Из (11) следует, что $\sigma^*=\sigma^*(\theta)$, $\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}^*(\theta)$, отвечающие точкам перегиба изотерм $\sigma\sim\dot{\varepsilon}$ (см. рис. 1, *а*), могут рассматриваться как альтернативные внутренние параметры состояния. Укажем, что

$$\dot{\varepsilon}_c^m=\dot{\varepsilon}^*\left(\theta^m\right);\quad \dot{\varepsilon}_c^v=\dot{\varepsilon}^*\left(\theta^v\right). \qquad (12)$$

Состоянию равновесия отвечает уравнение, полученное минимизацией (10) по параметру порядка:

$$q=m_0\eta^3+\beta\eta\,. \qquad (13)$$

В рамках представлений о функции (10) как о морсовской [14] можно утверждать, что при $\beta>0$ $\left(\theta\notin\left]0,\,1\right[\right)$ изменения структурного характера в деформируемом материале не происходят. Условие $\beta<0$ $\left(\theta\in\left]0,\,1\right[\right)$ соответствует структурно неустойчивому состоянию среды. В переходных состояниях имеет место равенство $\beta=0$.

Качественная картина, отражающая влияние знака управляющего параметра β на характер кривых $q\sim\eta$, представлена на рис. 2.

Значения параметров порядка $\eta_{1,2}$ и, следовательно, скоростей деформаций, ограничивающих при $\theta\in\left]0,\,1\right[$ область структурных изменений, найдем из условия (8), которое заменой (11) трансформируется в равенство $q=0$. С учетом (11), (13) получим

$$\eta_{1,2}=\pm\left(-\frac{\beta}{m_0}\right)^{1/2};\quad \dot{\varepsilon}_c^{m,v}=\dot{\varepsilon}^*\left[1\pm\left(-\frac{\beta}{m_0}\right)^{1/2}\right]. \qquad (14)$$

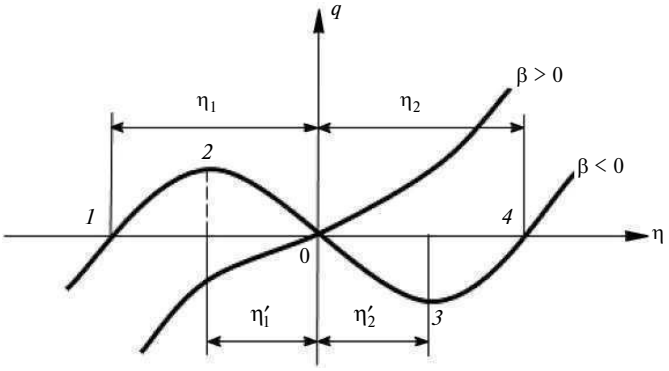


Рис. 2. Влияние знака управляющего параметра β на характер кривых $q \sim \eta$

Ограничения по параметрам порядка $\eta'_{1,2}$ и скоростям деформации на диапазон проявления сверхпластических свойств установим из (7), (11). Имеем

$$\eta'_{1,2} = \pm\left(-\frac{\beta}{3m_0}\right)^{1/2}; \quad \dot{\varepsilon}^{lr} = \dot{\varepsilon}^*\left[1 \pm \left(-\frac{\beta}{3m_0}\right)^{1/2}\right]. \quad (15)$$

Теперь очевидно, что при деформации реализуется процесс самоорганизации через изменение управляющих параметров [7]. Действительно, алюминиевые сплавы переходят из исходного состояния в рекристаллизованное через сильные структурные флуктуации, ответственность за описание которых возлагается на управляющий параметр β.

Отметим, что уравнение (13) отвечает условиям осуществления эффекта сверхпластичности (6).

Поскольку управляющий параметр β введен не зависящим от времени, то для описания его эволюции можно привлечь кинетическое уравнение вида

$$\frac{d\beta}{dt} = \dot{\xi} f(\beta), \quad (16)$$

где $\dot{\xi}$ — скорость изменения нормированной температуры.

Будем считать $f(\beta)$ функцией, характеризующей чувствительность материала к структурным превращениям. Вне интервала указанных превращений функция $f(\beta)$ меняется слабо, но резко возрастает при $\theta \in]0, 1[$. Кроме того, при $\theta \notin]0, 1[$ имеем $f'_t(\beta) < 0$ и $f'_t(\beta) > 0$ — при $\theta \in]0, 1[$. В критических точках $f'(\beta) = 0$. Далее полагаем, что $f(\beta)\big|_{\xi<\frac{1}{2}} < 0$; $f(\beta)\big|_{\xi=\frac{1}{2}} = 0$; $f(\beta)\big|_{\xi>\frac{1}{2}} > 0$, причем значение $\xi = 1/2$ соответствует середине температурного интервала сверхпластичности.

Пусть при некотором значении $\beta = \beta_0$ имеем $\sigma^* = \sigma^*(\beta_0)$. Допустим, что с ростом температуры управление β снижается на величину $d\beta$, а параметр σ^* откликается изменением на величину, пропорциональную σ^*. Поэтому положим

$$d\sigma^* = \sigma^* K(\beta - \beta_0) d\beta, \quad (17)$$

где $K(\beta - \beta_0)$ — ядро, убывающее с уменьшением разности $(\beta - \beta_0)$, причем $\beta_0 = \beta\big|_{\xi=1/2}$ — фиксированное минимальное значение, отвечающее середине термического диапазона сверхпластичности.

Решение уравнения (17) имеет вид

$$\sigma^* = \sigma^*(\beta_0) Q(\beta), \quad (18)$$

где

$$Q(\beta) = \exp \int_{\beta_0}^{\beta} K(\beta - \beta_0) d\beta. \quad (19)$$

Уравнение (18) с учетом (19) легко приводится к следующей форме:

$$\ln \frac{\sigma^*}{\sigma^*(\beta_0)} = \int_{\beta_0}^{\beta} K(\beta - \beta_0) d\beta. \quad (20)$$

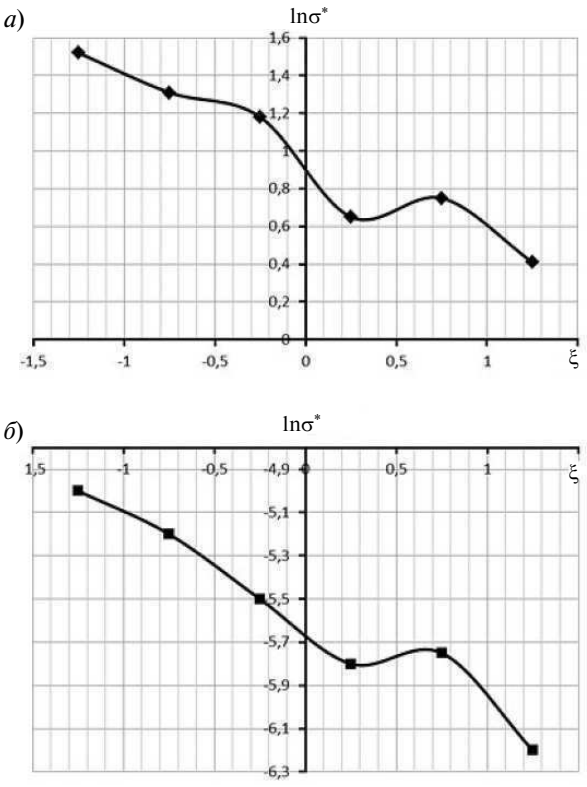


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $\ln\sigma^* \sim \xi$, $\ln\dot{\varepsilon}^* \sim \xi$ для алюминиевого сплава АМг5

В соответствии с экспериментальными данными (рис. 3, *а*) ядро оператора (20) может быть представлено выражением

$$K(\beta-\beta_0) = A\exp\left(n(\beta-\beta_0)\right), \qquad (21)$$

A, n — постоянные материала.

На рис. 3, *а*, 3, *б* представлены установленные из опытов зависимости $\ln\sigma^* \sim \xi$, $\ln\dot{\varepsilon}^* \sim \xi$ для алюминиевого сплава АМг5. Качественная картина поведения этих функций не изменится и для других исследованных сплавов.

Теперь на основании (20), (21) будем иметь

$$\ln\frac{\sigma^*}{\sigma^*(\beta_0)} = A_0\exp\left(n(\beta-\beta_0)\right), \qquad (22)$$

причем

$$A_0 = A/n. \qquad (23)$$

Продифференцировав (22) по времени, получим уравнение, отражающее эволюцию внутреннего параметра состояния σ^*:

$$\frac{d\ln\sigma^*}{dt} = A_0\exp\left(n(\beta-\beta_0)\right)\frac{d\beta}{dt}. \qquad (24)$$

По аналогии с (24) для функции $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}^*(\xi)$ (рис. 3, *б*) можем записать

$$\frac{d\ln\dot{\varepsilon}^*}{dt} = B_0\exp\left(k(\beta-\beta_0)\right)\frac{d\beta}{dt}. \qquad (25)$$

Здесь A_0, B_0, n, k — константы материала.

Таким образом, предложена модель, связывающая напряжение, температуру и кинематические переменные для случаев простого растяжения и сжатия, включая диапазоны сверхпластичности. При этом уравнение состояния записано в конечной форме (13), (11) и дополнено эволюционными уравнениями для управляющего параметра (16) и внутренних параметров состояния (24), (25). Указанные соотношения пригодны для описания закономерностей деформирования при наличии явного выражения функции чувствительности материала к структурным превращениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pearson, C.B.** The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bithmus-tin [Text] / C.B. Pearson // J. Inst. metals.— 1934. Vol. 54.— P. 111.

2. **Кайбышев, О.А.** Сверхпластичность промышленных сплавов [Текст] / О.А. Кайбышев.— М.: Металлургия, 1984.— 264 с.

3. **Новиков, И.И.** Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном [Текст] / И.И. Новиков, В.К. Портной— М.: Металлургия, 1981.— 230 с.

4. **Рудаев, Я.И.** Введение в механику динамической сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев.— Бишкек: КРСУ, 2003.— 134 с.

5. **Рудской, А.И.** Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов [Текст] / А.И. Рудской, Я.И. Рудаев.— СПб.: Наука, 2009.— 218 с.

6. **Хайтун, С.Д.** Механика и необратимость [Текст] / С.Д. Хайтун.— М.: Янус, 1996.— 448 с.

7. **Хакен, Г.** Синергетика: иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах [Текст] / С.Д. Хайтун.— М.: Мир, 1985.— 423 с.

8. **Громов, В.Г.** О макроскопическом описании явления сверхпластичности [Текст] / В.Г. Громов // Тез. докл. IV Всесоюзн. научно-технич. конф. «Сверхпластичность металлов». Ч. 1.— Уфа, 1989.— С. 20.

9. **Рудаев, Я.И.** К вопросу о математическом моделировании сверхпластического одноосного растяжения [Текст] / Я.И. Рудаев, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность. Сер.: материаловедение.— 1989. Вып. 12.— С. 41–48.

10. **Иванова, В.С.** Механические свойства металлов и сплавов с позиций синергетики [Текст] / В.С. Иванова, Г.В. Встовский // Итоги науки и техники, материаловедение и термическая обработка.— М.:ВИНИТИ, 1990. –Т. 24.— С. 43–98.

11. **Пресняков, А.А.** О природе сверхпластического течения [Текст] / А.А. Пресняков // Тез. докл. III Всесоюзн. научн.-технич. конф. «Сверхпластичность металлов». Ч. 1.— Тула, 1986.— С. 4–5.

12. **Кувшинов, Г.А.** Об оптимальной температуре сверхпластичности [Текст] / Г.А. Кувшинов, И.И. Новиков // Теплофизика конденсированных сред.— М.: Наука, 1985.— С. 41–43.

13. **Рудаев, Я.И.** О фазовых переходах в сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев // Проблемы прочности.— 1990. №10.— С. 50–54.

14. **Гилмор, Р.** Прикладная теория катастроф [Текст] / Р. Гилмор.— М.: Мир, 1984. Ч.1.— 285 с.

15. **Вайнблат, Ю.М.** Динамическая рекристаллизация алюминиевых сплавов [Текст] / Ю.М. Вайнблат, Н.А. Шаршагин // Цветные металлы.— 1984. №2.— С. 67–70.

REFERENCES

1. **Pearson C.B.** The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bithmus-tin [Text] // J.Inst. metals.— 1934. Vol. 54.— P. 111.

2. **Kaibyshev O.A.** Superplasticity of industrial alloys [Tekst].— Moscow: Metallurgy, 1984.— 264 p. (rus.)

3. **Novikov I.I., Portnoiy V.R.** Superplasticity of alloys with an ultrafine grain [Tekst].— Moscow: Metallurgy, 1981.— 230 p. (rus.)

4. **Rudaev Ya.I.** Introduction in mechanics of dynamic superplasticity [Tekst].— Bishkek: KRSU, 2003.— 134 p. (rus.)

5. **Rudskoy A.I., Rudaev Ya.I.** Mechanics of dynamic superplasticity of aluminum alloys [Tekst].— St.Petersburg: Nauka, 2009.— 218 p. (rus.)

6. **Haytun S.D.** Mechanics and irreversibility [Tekst].— Moscow: Janus, 1996.— 448 p. (rus.)

7. **Haken G.** Synergetrics: hierarchy of not stability in self-organizing systems and structures [Tekst].— Moscow: Mir, 1985.— 423 p. (rus.)

8. **Gromov V.G.** About the macroscopic description of the phenomenon of superplasticity [Tekst] // Proc. of IV all-Union scientific and technical conference «Superplasticity of metals».— Ufa, 1989.— Vol. 1.— P. 20. (rus.)

9. **Rudaev Ya.I., Chashnikov D.I.** To a question of mathematical modeling of superplastic monoaxial tension [Tekst] // Ship-building industry: Materials science.— 1989. Vol. 12.— P. 41–48. (rus.)

10. **Ivanova V.S., Vstovsky G.V** Mechanical properties of metals and alloys from positions of synergetrics [Tekst] // Results science and technology: Materials science and heat treatment.— 1990. Vol. 24.— P. 43–98. (rus.)

11. **Presnyakov A.A.** About the substance of superplasticity [Tekst] // Proc. of III all-Union scientific and technical conference «Superplasticity of metals».— Tula, 1986.— Vol. 1.— P. 4–5. (rus.)

12. **Kuvshinov G.A., Novikov I.I.** About the optimum temperature of superplasticity [Tekst] // Thermophysics of the condensed states.— 1985.— P. 41–43. (rus.)

13. **Rudaev Ya.I.** About phase transitions in superplasticity [Tekst] // Strenght Problems.— 1990. № 10.— P. 50–54. (rus.)

14. **Gilmore R.** The applied theory of catastrophe. Vol. 1 [Tekst].— Moscow: Mir, 1984.— 285 p. (rus.)

15. **Vaynblat Yu.M., Sharshagin N.A.** Dynamic recrystallization of aluminum alloys [Tekst] // Non-ferrous metals.— 1984. № 2.— P. 67–70. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КИТАЕВА Дарья Анатольевна — кандидат физико-математических наук доцент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: dkitaeva@mail.ru

РУДАЕВ Яков Исаакович — доктор физико-математических наук заведующий кафедрой механики Кыргызско-Российского Славянского университета; 720000, ул. Киевская, 44, Бишкек, Кыргызстан; e-mail: rudaev36@mail.ru

AUTHORS

KITAEVA Daria A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: dkitaeva@mail.ru

RUDAEV Yakov I. — Kyrgyz-Russian Slavic University; 720000, Kievskaya Str. 44, Bishkek, Kyrgyzstan; e-mail: rudaev36@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 517.929

А.Ф. Зубова, В.И. Зубов,
И.В. Зубов, С.А. Стрекопытов

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТЫХ КВАДРАТИЧНЫХ СИСТЕМ

A.F. Zubova, V.I. Zubov,
I.V. Zubov, S.A. Strecopitov

THE TECHNOLOGY OF BUILDING SIMPLE QUADRATE SYSTEMS

Рассмотрен способ приведения трехмерной системы дифференциальных уравнений к одному уравнению второго порядка. Проведено исследование простых по структуре дифференциальных уравнений. Разработана технология построения простых квадратичных систем, обладающих предельными свойствами, важными в задачах управления.

СИСТЕМА. МНОЖЕСТВО. УРАВНЕНИЕ. ПОРЯДОК. ФУНКЦИЯ. ПЕРИОД. РЕШЕНИЕ. УСТОЙЧИВОСТЬ. РЕЖИМ. ВЕКТОР.

In giving article is looks the way of bring third quadrate system of differential equations to one equation of second order. Is bring investigation simple on structure differential equation, is works technology of building simple quadrate systems, is possesses giving limiting measures, important in the tasks of controlling.

SYSTEM. MULTITUDE. EQUATION. ORDER. FUNCTION. PERIOD. SOLUTION. STABILITY. REGIME. VECTOR.

Системы дифференциальных уравнений — необходимый математический аппарат описания динамических процессов. Поэтому задачи современной автоматики, т. е. задачи создания новых эффективных систем управления различными технологическими комплексами и техническими объектами, обусловливают развитие методов исследования линейных и нелинейных систем дифференциальных уравнений — обыкновенных и в частных производных, которые описывают динамику функционирования систем автоматического управления. Задачи управления на протяжении последних десятилетий были основными «потребителями» достижений качественной теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости, теории нелинейных колебаний. Задача прогнозирования поведения моделируемых систем сводится в количественном плане к численному интегрированию уравнений динамики, а в качественном плане — к аналитическому исследованию структурных особенностей моделируемой системы (наличие инвариантных множеств, характер предельного поведения решений).

Постановка задачи

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y; \\ \dot{y} &= x + z + xz; \\ \dot{z} &= xy. \end{aligned} \qquad (1)$$

Эта система имеет семейство интегралов $z = \frac{1}{2}x^2 + C$, где $C = \text{const}$. В связи с этим систему (1) можно привести к одному уравнению второго порядка

$$\dot{x} = C + (1+C)x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}x^3. \qquad (2)$$

Умножим обе части (2) на $\dot{x}$ и проинтегрируем в пределах от 0 до t. Получим

$$\frac{1}{2}\dot{x}^2 = C_1 + Cx + \frac{1}{2}(1+C)x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{8}x^4 \quad (C_1 = \text{const}). \qquad (3)$$

Извлечем квадратный корень и проинтегрируем снова; получим

$$\int \frac{4}{\sqrt{2C_1 + 2Cx + (1+C)x^2 + x^3/3 + x^4/4}} = \\ = t + C_2, \qquad (4)$$

где $C_2 = \text{const}$.

Интеграл, стоящий в левой части (4), — гиперэллиптический [1]. Для гиперэллиптических функций, появляющихся при обращении этого интеграла, когда мы хотим явно выписать решение $x(t)$ системы (1), характерно наличие нескольких периодов, которые зависят от начальных данных. Рассмотрим еще одну систему:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y; \\ \dot{y} &= xz + a; \\ \dot{z} &= 4xy + 1. \end{aligned} \qquad (5)$$

Эта система имеет семейство интегралов $z = 2x^2 + t + c$, что позволяет привести (5) к уравнению второго порядка

$$\ddot{x} = 2x^3 + (t + C)x + a. \qquad (6)$$

С помощью подстановки $x = \lambda\eta(\xi)$, $\xi = \mu(t + C)$ это уравнение приводится к нормальному виду Пенлеве [2]:

$$\eta'' = 2\eta^3 + \xi\eta + \alpha. \qquad (7)$$

Пенлеве показал, что решения уравнения (7) описываются принципиально новыми трансцендентными функциями, которые не сводятся к ранее изученным; они получили название *трансцендентных функций Пенлеве* [3]. Ученик Пенлеве Ж. Шази (1882–1955) изучал, в частности, уравнение

$$y''' = 2yy'' - 3y'^2, \qquad (8)$$

к которому приводится квадратичная система

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = z, \quad \dot{z} = 2xz - 3y^2.$$

Шази установил, что интеграл столь простого по виду уравнения имеет весьма сложные особенности и связан с интегралами гипергеометрического уравнения и функциями Шварца. Приведенные примеры показывают, что решения систем дифференциальных уравнений простой структуры могут иметь чрезвычайно сложную аналитическую природу. «Простота» структуры квадратичных систем, описывающих системы со странными аттракторами, также указывает на это. В практических задачах построения уравнений управляемого движения наиболее важно требование их аналитической простоты. Это связано с возможностью их инженерной реализации. Поэтому необходима разработка технологии построения «простых» (например, квадратичных) систем, обладающих заданными предельными свойствами, существенными для задач управления. Важнейшим таким свойством является наличие автоколебания или совокупности автоколебаний (аттрактор), имеющих заданный или желаемый диаметр. Практически это означает, что построенная управляемая система будет иметь предельный режим с заданной геометрической характеристикой, т. е. фазовые переменные окажутся в желаемых пределах. Как осуществить такое построение? Основным методическим приемом в теории управляемых систем является решение обратной задачи механики, когда по заданным кинематическим элементам движения строятся уравнения динамики системы. Такими кинематическими элементами могут быть заданная траектория или заданная совокупность траекторий (инвариантное множество). Решение обратной задачи механики в полном объеме, по-видимому, впервые было осуществлено И. Ньютоном при открытии закона всемирного тяготения. Н.П. Еругин решил эту задачу в случае заданной интегральной кривой (заданного первого или частного интеграла).

Теорема 1. (Н.П. Еругин). Для того чтобы система дифференциальных уравнений

$$\dot{X} = F(X) \qquad (9)$$

имела частный интеграл $V(X) = 0$, необходимо и достаточно, чтобы правая часть системы (9) имела следующий вид:

$$F = \nabla V M(V, X) + N(X),$$

где $(\nabla V, N(X)) = 0$, $M(0, X) \equiv 0$. Причем, если поверхность $V(X) = 0$ не имеет точек покоя, то векторная функция $N(X)$ не должна обращаться в нуль-вектор на этой поверхности.

Можно задать желаемое предельное множество в виде замкнутой гладкой компактной поверхности и построить семейство дифференциальных уравнений, имеющих ее в качестве интегральной. Можно построить и такие системы, для которых данная интегральная поверхность будет асимптотически устойчивым

и устойчивым по Ляпунову инвариантным множеством. Другой вопрос состоит в том, насколько будут просты получаемые уравнения? Ведь даже задавая поверхность в виде эллипсоида, получаем уравнения, не являющиеся простыми. Кроме того, данный класс уравнений ограничен интегрируемым по определению случаем. Поэтому возникает желание использовать и неинтегрируемые системы для построения компактных, простых для инженерной реализации управляемых систем, которые будут иметь заданные геометрические характеристики предельного режима. Однако аналитическая природа решений такой системы может быть весьма сложной. Пусть $V(X), W(X)$ — положительно определенные функции, обладающие свойствами

$$V(X_1)=0,\quad W(X_2)=0,\quad V,W\to\infty$$

при $\|X\|\to\infty$. Пусть на решениях некоторой гипотетической системы дифференциальных уравнений, имеющей продолжаемые решения, а также нулевое решение

$$\dot{X}=F(X), \tag{10}$$

выполнено соотношение

$$\dot{V}=-W.$$

Тогда из теоремы Ляпунова об устойчивости следует, что система (10) имеет асимптотически устойчивое в целом положение равновесия $X=0$. Пусть V,W суть заданные функции с вышеупомянутыми свойствами. Рассмотрим уравнение

$$\nabla V\cdot F=W. \tag{12}$$

Это уравнение определяет класс систем (10), на решениях которых выполнено соотношение (11). Часть решений этого уравнения определяют системы с продолжаемыми решениями. Именно эти решения и интересны в практическом, инженерном смысле. Выбирая из этих решений системы в некотором смысле «простого» вида, мы получаем множество интересующих нас систем. Рассмотрим теперь следующее уравнение, выполненное на решениях гипотетической системы (10):

$$\dot{V}=-W+C, \tag{13}$$

где C = const.

Поскольку все решения (10) продолжаемы, то необходимо, чтобы выполнялось условие $C\ge 0$. Система (10) в этом случае равномерно диссипативна и будет иметь компактный предельный режим — автоколебание или совокупность автоколебаний (аттрактор). По уравнению (13) при заданных функциях V,W и контакте C можно построить все дифференциальные системы, на решениях которых выполняется это соотношение. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений 3-го порядка

$$\begin{aligned}\dot{x}&=f(x,y,z);\\ \dot{y}&=g(x,y,z);\\ \dot{z}&=h(x,y,z).\end{aligned} \tag{14}$$

Предположим, что у системы (14) существует стационарный интеграл

$$v(x,y,z)=c, \tag{15}$$

где c = const. Функция (15) удовлетворяет однородному линейному дифференциальному уравнению в частных производных

$$v_x f+v_y g+v_z h=0.$$

Иными словами, вектор $\operatorname{grad}(v)=(v_x,v_y,v_z)=\nabla v$ ортогонален вектору (f,g,h). Следовательно, вектор ∇v лежит в подпространстве, ортогональном вектору $f=(f,g,h)$. В качестве базиса этого подпространства можно взять, например, такие векторы:

$$g_1=(g-h,\ h-f,\ f-g);$$

$$g_2=(g(f-g)-h(h-f),\quad h(g-h)-f(f-g),$$

$$f(h-f)-g(g-h)).$$

Имеем

$$(f,g_1)=0;(f,g_2)=0;(g_1,g_2)=0;g_2=f\cdot g_1.$$

По нашему предположению имеем

$$\nabla v=\mu_1 g_1+\mu_2 g_2,$$

где μ_1,μ_2 — скалярные функции независимых переменных x, y, z. Если функция v представима в виде $v=v_1+v_2$, так что выполнено соотношение $\nabla v=\nabla v_1+\nabla v_2$, а векторы $\nabla v_1,\nabla v_2$ коллинеарны соответственно векторам g_1,g_2, то справедливы следующие рассуждения. По нашему предположению, функция (15) существует, следовательно, хотя бы при одном из $i=1,2$ имеет нетривиальное решение система уравнений

$$1\nabla v_i = \mu g_i, \qquad (16)$$

где $\mu = \mu(x, y, z)$ — некоторая скалярная функция. Выпишем условия интегрируемости уравнений (16) для $i = 1$:

$$\mu_y(g-h)+\mu(g_y-h_y)=\mu_x(h-f)+\mu(h_x-f_x),$$

$$\mu_z(g-h)+\mu(g_z-h_z)=\mu_x(f-g)+\mu(f_x-g_x),$$

$$\mu_z(h-f)+\mu(h_z-f_z)=\mu_y(f-g)+\mu(f_y-g_y).$$

Последнюю систему можно записать в матрично-векторной форме:

$$A_1\nabla\mu = \mu F_1. \qquad (17)$$

Матрица A_1 и вектор F_1 в выражениях (17) определены вполне:

$$A_1 = \begin{pmatrix} -(h-f) & g-h & 0 \\ -(f-g) & 0 & g-h \\ 0 & -(f-g) & h-f \end{pmatrix},$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} h_x - f_x - (g_y - h_y) \\ f_x - g_x - (g_z - h_z) \\ f_y - g_y - (h_z - f_z) \end{pmatrix}.$$

Заметим, что матрица A_1 в силу своей структуры является вырожденной при любых f, g, h. Отсюда следует, что нетривиальное решение уравнения (17) возможно лишь тогда, когда вектор F лежит в подпространстве, натянутом на столбцы матрицы A:

$$\operatorname{rank}(A) = \operatorname{rank}(A, F).$$

Нетривиальным решением для нас будет также ситуация, когда $F_1 = 0$, при этом получается $\mu(x, y, z) = \text{const}$ $\mu(x, y, z) = \text{const}$. При $i = 2$ получаем следующие значения для матрицы A и вектора F:

$$A_2 = \begin{pmatrix} -h(g-h)+f(f-g) & g(f-g)-h(h-f) & 0 \\ -f9h-f)+g(g-h) & 0 & g(f-g)-h(h-f) \\ 0 & -f(h-f)+g(g-h) & g(f-g)-f(f-g) \end{pmatrix};$$

$$F_2[1] = f_x(g-3f) - f_y(g+h) + g_x(h+f) -$$
$$-g_y(f-2g) + h_x(g-2h) + h_y(2h-f);$$

$$F_2[2] = f_x(h-2f) - f_z(g+h) + g_x(h-2g) +$$
$$+g_z(2g-f) + h_x(f+g) + h_z(2h-f);$$

$$F_3[3] = f_z(2f-g) + f_y(h-2f) - g_z(h+f) -$$
$$-g_y(2g-2h) + h_z(2h-g) + h_y(f+g).$$

Матрица A_2 также вырожденная, и решение возможно тоже не всегда. Таким образом, в невырожденных случаях система дифференциальных уравнений для функций μ_1, μ_2 выглядит следующим образом:

$$A_1\nabla\mu_1 + A_2\nabla\mu_2 = \mu_1 F_1 + \mu_2 F_2. \qquad (18)$$

Это — система трех линейных дифференциальных уравнений в частных производных для двух неизвестных функций. Для ее исследования заметим сначала, что, поскольку матрицы A_1, A_2 вырожденные, уравнения (18) не могут быть разрешены относительно всех трех производных μ_{1_x}, μ_{1_y}, μ_{1_z} или μ_{2_x}, μ_{2_y}, μ_{2_z}, но в общем случае система (18) может быть разрешена относительно двух производных, например по x, y:

$$\frac{\partial\mu_1}{\partial x} = a(x,y,z)\mu_1 + A(x,y,z,\mu_2,\mu_{2_x},\mu_{2_y},\mu_{2_z});$$

$$\frac{\partial\mu_1}{\partial y} = b(x,y,z)\mu_1 + B(x,y,z,\mu_2,\mu_{2_x},\mu_{2_y},\mu_{2_z}). \qquad (19)$$

Здесь A, B — линейные функции по μ_2, μ_{2_x}, μ_{2_y}, μ_{2_z}. Дифференцируя первое уравнение по y, а второе по x, получаем

$$(a_y - b_x)\mu_1 = L[\mu_2], \qquad (20)$$

где

$$L[\mu_2] = -\left(aB - bA + \frac{dA}{dx} - \frac{dB}{dy}\right)$$

— дифференциальный оператор второго порядка. Р. Курант [5] показал, что в аналитическом случае условие

$$a_y = b_x \qquad (21)$$

является необходимым и достаточным для разрешимости системы. Таким образом, справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Необходимым условием существования стационарного интеграла для системы (18) является выполнение условий (21).

В самом общем случае приведем систему (9) к следующему виду: члены, содержащие величины μ_2, μ_{2_x}, μ_{2_y}, μ_{2_z}, перенесем в правую часть, а содержащие величины μ_1, μ_{1_x}, μ_{1_y}, μ_{1_z} — в левую. Введем новые неизвестные величины: $\alpha_1(x, y, z)$; $\alpha_2(x, y, z)$; $\alpha_3(x, y, z)$. Получим соотношения

$$A_1[1,1]\mu_{1_x} + A_1[1,2]\mu_{1_y} + F_1[1]\mu_1 = \alpha_1;$$

$$A_1[2,1]\mu_{1_x} + A_1[2,3]\mu_{1_z} + F_1[2]\mu_1 = \alpha_2;$$

$$A_1[3,2]\mu_{1_y} + A_1[3,3]\mu_{1_z} + F_1[3]\mu_1 = \alpha_3;$$

$$A_2[1,1]\mu_{2_x} + A_2[1,2]\mu_{2_y} + F_2[1]\mu_2 = \alpha_1;$$

$$A_2[2,1]\mu_{2_x} + A_2[2,3]\mu_{2_z} + F_2[2]\mu_2 = \alpha_2;$$

$$A_2[3,2]\mu_{2_y} + A_1[3,3]\mu_{2_z} + F_1[3]\mu_2 = \alpha_3. \quad (22)$$

Мы получили две группы уравнений: первую — для неизвестной функции μ_1, вторую — от μ_2. В теории дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка такие уравнения называются *общими линейными* [4], или *линейными неоднородными* [3]. Не ограничивая общности, рассмотрим первые три уравнения (22):

$$X_1(\mu_1) = A_1[1,1]\mu_{1_x} + A_1[1,2]\mu_{1_y} + F_1[1]\mu_1 - \alpha_1 = 0;$$

$$X_2(\mu_1) = A_1[2,1]\mu_{1_x} + A_1[2,3]\mu_{1_z} + F_1[2]\mu_1 - \alpha_2 = 0;$$

$$X_3(\mu_1) = A_1[3,2]\mu_{1_y} + A_1[3,3]\mu_{1_z} + F_1[3]\mu_1 - \alpha_3 = 0. \quad (23)$$

Введем обозначения

$$\bar{X}_1(\mu_1) = A_1[1,1]\mu_{1_x} + A_1[1,2]\mu_{1_y};$$

$$\bar{X}_2(\mu_2) = A_1[2,1]\mu_{1_x} + A_1[2,3]\mu_{1_z};$$

$$\bar{X}_3(\mu_1) = A_1[3,2]\mu_{1_y} + A_1[3,3]\mu_{1_z}.$$

Поскольку матрица A_1 вырожденная, из системы (23) невозможно найти величины μ_{1_x}, μ_{1_y}, μ_{1_z}. Приведем систему (23) к замкнутой форме. В общем случае можно взять два линейно независимых по μ_{1_x}, μ_{1_y}, μ_{1_z} уравнения, например X_1, X_2, и составить скобку Якоби:

$$[X_1, X_2] = A_1[1,1]\left(\frac{\partial X_2}{\partial x} + \mu_{1_x} F_1[2]\right) -$$

$$-A_1[2,1]\left(\frac{\partial X_1}{\partial x} + \mu_1 F_1[1]\right) +$$

$$+A_1[1,2]\left(\frac{\partial X_2}{\partial y} + \mu_{1_y} F_1[2]\right) -$$

$$-A_1[2,3]\left(\frac{\partial X_1}{\partial z} + \mu_{1_z} F_1[2]\right).$$

Известно [1, 2], что $[X_1, X_2] = \bar{X}_1(X_2(\mu_1)) - -\bar{X}_2(X_1(\mu_1))$. Может оказаться так, что получившееся уравнение линейно независимо с уравнениями X_1, X_2, тогда получившуюся систему можно разрешить относительно μ_1.

Интуитивно очевидно, что системы с простой структурой легче реализуются в инженерном смысле. Конечно, понятие простоты весьма относительно, но, скажем, квадратичные системы вызовут предпочтение у любого конструктора перед системами, включающими более сложные нелинейности. Рассмотрение нелинейных систем с простой структурой, которые имеют несколько неустойчивых положений равновесия, но геометрически локализованное заданным образом ограниченное инвариантное множество, к тому же глобально асимптотически устойчивое, позволяет создавать весьма эффективные системы управления. По сути, это предельное множество является аналогом устойчивого положения равновесия для линейных и линеаризованных систем. Но в данном случае алгебраические критерии устойчивости, основанные на анализе собственных чисел матрицы линейного приближения, беспомощны. Это связано с тем, что аналитическая природа таких предельных множеств, как правило, весьма сложна. Для составления возмущенной системы требуется интегрирование уравнений движения, что в общем случае неосуществимо.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (пр. № 10–08–000624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеева, М.Б.** Последовательная локализация инвариантных множеств [Текст] / М.Б. Авдеева, С.В. Зубов, И.С. Стрекопытов.— Дифференциальные уравнения. Известия Российской академии наук.— Рязань: Изд-во Рязанского гос. университета, 2012.— Т. 17.— С. 9–12.

2. **Зубов, А.В.** Трехмерные квадратичные системы [Текст] / А.В. Зубов, К.А. Пешехонов, С.А. Стрекопытов, М.В. Стрекопытова // Диффенренциальные уравнения. Известия Российской академии наук.— Рязань: Изд-во Рязанского гос. университета, 2012. Т. 17.— С. 13–16.

3. **Зубов, И.В.** Уравнение для регулярного интеграла [Текст] / И.В. Зубов, А.Ф. Зубова, А.И. Иванов // Дифференциальные уравнения. Известия Российской академии наук.— Рязань. Изд-во Рязанского гос. университета.— 2012. Т. 17.— С. 17–20.

4. **Зубов, А.В.** Математические методы качественного анализа систем управления и устойчивость расчетных движений [Текст] / А.В. Зубов, С.В. Зубов.— АООТ «Мобильность-плюс».— СПб., 2012.— 357 с.

5. **Зубов, А.В.** Управление динамическими системами [Текст] / А.В. Зубов, О.А. Шабурова.— СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2005.— 83 с.

6. **Зубов, С.В.** Качественный анализ систем управления и устойчивость расчетных движений [Текст] / С.В. Зубов.— СПб: ВВМ, 2014.— 114 с.

7. **Зубов, И.В.** Анализ систем управления и способы представления программных управлений [Текст] / И.В. Зубов.— СПб.: ВВМ, 2014.— 150 с.

8. **Зубова, О.А.** Анализ равновесных движений и задача идентификации [Текст] / О.А. Зубова, М.В. Стрекопытова.— СПб.: СПбГУ, 2013.— 256 с.

REFERENCES

1. **Avdeeva M.B., Zubov S.V., Strekopytov I.S.** Posledovatel'naia lokalizatsiia invariantnykh mnozhestv [Tekst] // Differentsial'nye uravneniia. Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk.— Riazan', Riazanskii gos. universitet, 2012. T. 17.— S. 9–12. (rus.)

2. **Zubov A.V., Peshekhonov K.A., Strekopytov S.A., Strekopytova M.V.** Trekhmernye kvadratichnye sistemy [Tekst] // Diffenrentsial'nye uravneniia, Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk.— Riazan': Riazanskii gos. universitet, 2012. T. 17.— S. 13–16. (rus.)

3. **Zubov I.V., Zubova A.F., Ivanov A.I.** Uravnenie dlia reguliarnogo integrala [Tekst] // Differentsial'nye uravneniia. Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk.— Riazan': Riazanskii gos. universitet, 2012. T. 17.— S. 17–20. (rus.)

4. **Zubov A.V., Zubov S.V.** Matematicheskie metody kachestvennogo analiza sistem upravleniia i ustoichivost' raschetnykh dvizhenii [Tekst].— SPb.: AOOT «Mobil'nost'-plius».— 2012. (rus.)

5. **Zubov A.V., Shaburova O.A.** Upravlenie dinamicheskimi sistemami [Tekst].— SPb.: Izd-vo NII Khimii SPbGU, 2005.— 83 s. (rus.)

6. **Zubov S.V.** Kachestvennyi analiz sistem upravleniia i ustoichivost' raschetnykh dvizhenii [Tekst].— SPb: Izd-vo VVM, 2014.— 114 s. (rus.)

7. **Zubov I.V.** Analiz sistem upravleniia i sposoby predstavleniia programmnykh upravlenii [Tekst].— SPb.: Izd-vo VVM, 2014.— 150 s. (rus.)

8. **Zubova O.A., Strekopytova M.V.** Analiz ravnovesnykh dvizhenii i zadacha identifikatsii [Tekst].— SPb.: Izd-vo SPbGU, 2013.— 256 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЗУБОВА Александра Федоровна — доктор технических наук профессор кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22, кв. 4, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

ЗУБОВ Всеволод Иванович — аспирант кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22, кв. 4, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

ЗУБОВ Иван Владимирович — аспирант кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22, кв. 4, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

СТРЕКОПЫТОВ Сергей Александрович — аспирант кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления; Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22, кв. 4, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

AUTHORS

ZUBOVA Alexandra F. — St. Petersburg State University; 191024, Connay st., 22/5, f. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

ZUBOV Vsevolod I. — St. Petersburg State University; 191024, Connay st., 22/5, f. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

ZUBOV Ivan V. — St. Petersburg State University; 191024, Connay st., 22/5, f. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

STRECOPITOV Sergei A. — St. Petersburg State University; 191024, Connay st., 22/5, f. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.73.073:62–294.2

С.Н. Эйгенсон, Н.В. Корихин, А.И. Головин

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

S.N. Eigenson, N.V. Korikhin, A.I. Golovin

THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT STRENGTH ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ITS STRESSED STATE

Исследовано напряженное состояние нижней половины штампа окончательного перехода для штамповки турбинной лопатки. Экспериментальное исследование объемного напряженного состояния осуществлялось методом фотоупругости с использованием способа составных моделей. При моделировании процесса штамповки получено распределение напряжений в характерных сечениях штампа. Результаты исследования позволили оптимизировать размеры штамповых вставок и определить основные направления повышения стойкости штамповой оснастки.

ШТАМП. ШТАМПОВАЯ ОСНАСТКА. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ. МЕТОД ФОТОУПРУГОСТИ. СОСТАВНЫЕ МОДЕЛИ.

Stressed state of stamp's lower part of final crossing/transfer for turbine blade pressure forming was investigated. Experimental investigation of volume stressed state was carried out by photoelasticity method with usage of composite model method. When pressure forming process was modeled distribution of stresses in characteristic cross-sections of stamp was got. The results of investigation allowed to optimize the sizes of stamp insertions and to determine the main ways of stamp equipment resistance increasing.

STAMP. DIE TOOLING. STRESSED STATE. PHOTOELASTICITY METHOD. COMPOSITE MODELS.

Для решения важной технологической задачи повышения качества и точности штампованных заготовок турбинных лопаток необходима стойкая к износу штамповая оснастка.

Обоснованные рекомендации по повышению износостойкости штамповой оснастки базируются на знании объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) штампа. Эффективным методом изучения НДС штампа является метод фотоупругости [1], один из наиболее эффективных экспериментальных методов изучения напряженного состояния сложных деталей с учетом концентрации напряжений в них. В его основе лежит явление двойного лучепреломления под нагрузкой в некоторых прозрачных оптически чувствительных материалах — отвержденных эпоксидных компаундах. Параметры двулучепреломления зависят от напряженного состояния модели, их можно измерять при просвечивании модели в поляризованном свете.

Методика исследования

Для экспериментального исследования объемного напряженного состояния штампа использовался метод составных моделей [2]. Свинцовую заготовку лопатки деформировали двумя прозрачными пластмассовыми штампами в поле поляриметра. Нижний штамп (см. рис. 1) изготавливали из специального оптически неактивного оргстекла, а в исследуемые сечения перпендикулярно контактной поверхности вклеивали тонкую пластинку из оптически чувствительного материала — эпоксидной смолы

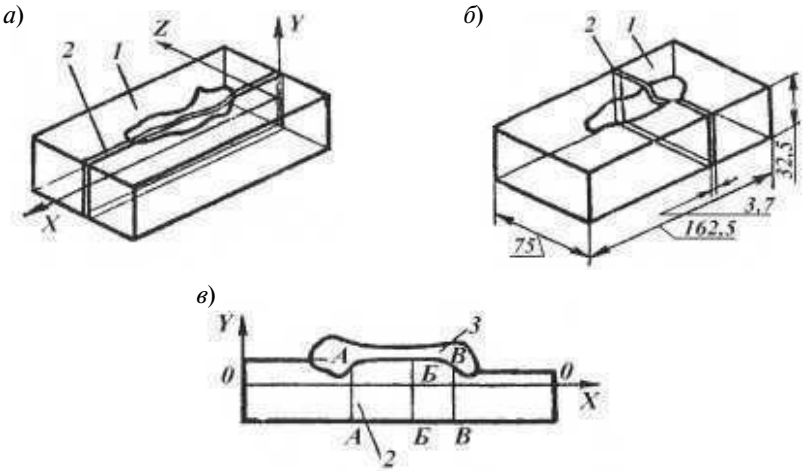


Рис.1. Экспериментальный нижний штамп *1* из оптически неактивного оргстекла с оптически активной вклейкой *2* и заготовкой лопатки *3*; *а* — вклейка в продольном направлении; *б* — вклейка в поперечном направлении; *в* — схема расположения сечений, для которых приведены графики напряжений

ЭД-16М. Пластины вклеивались вдоль оси заготовки и перпендикулярно ей. Модель верхнего штампа, в котором не определяли напряжения, изготавливали из обычного оргстекла. Объектом исследования был штамп для получения заготовки турбинной лопатки длиной 350 мм и сечением хвостовой части 91,5х55,5 мм. Модели были выполнены в масштабе 1:4. Исследовали нижнюю половину штампа окончательного перехода для штамповки заготовки турбинной лопатки на прессе КГШП усилием 6300 тс. Материал штампа — сталь 4Х5В2ФС (ЭИ 958).

При изготовлении моделей гравюра штампа вырезалась в склеенном блоке (нижний штамп) и в монолитном блоке (верхний штамп) на копировально-фрезерном станке с последующей ручной доводкой по металлическим шаблонам. Свинцовая модель лопатки изготавливалась вручную. Статическая нагрузка на модель создавалась ручным винтовым прессом. Оптическую картину в процессе формоизменения свинцовой заготовки наблюдали в полярископе. В момент, когда по картине полос (изохромы) в модели имели место наибольшие напряжения, останавливали нагружение и измеряли оптические параметры. В этот момент заканчивалась пластическая деформация заготовки — она принимала нужную форму. Таким образом, моделировался процесс штамповки турбинной лопатки.

Для оптических измерений использовали полярископ ППУ-7 и координатно-синхронный поляриметр КСП-7. На приборе ППУ-7 с параллельным пучком света диаметром 110 мм наблюдали и фотографировали картины изохром (в белом свете) и полос (в монохроматическом свете). Измеряли разность хода δ, определяли положение изохром первых порядков и направление увеличения порядка. Основные измерения осуществляли по точкам плоской вклеенной пластины прибором КСП-7: методом компенсации Сенармона определяли оптическую разность хода δ,

$$\delta = C_\sigma t(\sigma_1 - \sigma_2), \qquad (1)$$

и угол φ наклона алгебраически большего главного напряжения к плоскости поляризации.

Здесь δ — оптическая разность хода, C_σ — оптический коэффициент напряжений, t — толщина вклеенной пластины (у нас t = 3–4 мм), $(\sigma_1 - \sigma_2)$ — разность главных напряжений.

Непосредственно по данным измерений находили касательное напряжение в любой точке плоской пластины:

$$\tau_{xy} = \frac{\delta}{2C_\sigma t}\sin 2\varphi. \qquad (2)$$

Коэффициент C_σ, являющийся показателем оптической чувствительности материала, на-

ходили по результатам испытания эталонного образца — трехслойного диска, сжатого по диаметру двумя силами.

На плоских упругих моделях у свободных границ одно из главных напряжений равно нулю. Поэтому в соответствии с формулой (1) по данным измерений получали величину контурного напряжения. Для разделения главных напряжений использовали способ разности касательных напряжений [2, 3].

По данным оптических измерений получили компоненты напряженного состояния моделей. На натуру пересчитали по формуле

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{м}} \frac{m_p}{m_l^2}, \qquad (3)$$

где $m_p = P_{\text{н}} / P_{\text{м}}$ — масштаб нагрузки; $m_l = l_{\text{н}} / l_{\text{м}}$ — геометрический масштаб моделирования; индексом «н» обозначены величины, относящиеся к натуре, индексом «м» — к модели.

Нагрузку на штамп рассчитали по методике, изложенной в работе [4], получили $P_{\text{н}} = 40 \cdot 10^3$ кН. Нагрузку на модель измеряли эталонным динамометром в процессе нагружения модели и получили $P_{\text{м}} = 25$ кН. Можно уточнить данные эксперимента, если определить $P_{\text{н}}$ на натурном прессе методом электротензометрии.

Результаты исследования

Результаты исследования представлены в виде приведенных на рис. 2–4 графиков распределения напряжений в некоторых характерных сечениях штампа и по контакту с заготовкой. Обобщить эти результаты можно следующим образом:

В штампе имеет место сложный характер распределения напряжений. В большей части штампа нормальные напряжения — сжимающие. Наиболее нагруженной является поверхность штампа в средней части пера лопатки. В области хвостовика напряжения незначительны, у края пера они меняют знак — становятся растягивающими. По высоте от гравюры к основанию штампа нормальное напряжение σ_y убывает незначительно, а касательное τ_{xy} практически постоянно, σ_x в некоторых сечениях растягивающее.

Напряжения в штампе достигают значительных величин. Нормальные напряжения — $\sigma_y = -2800$ МПа, $\sigma_x = -2000$ МПа — на поверхности контакта штампа с заготовкой; касательные напряжения $\tau_{xy} = 400$ МПа. Растягивающие напряжения в районе технологических припусков: $\sigma_y = 400$ МПа, $\sigma_x = 600$ МПа. Наибольшие контактные напряжения примерно в 3,5 раза превышают предел текучести инструментальной стали ($\sigma_{0,2} = 825$ МПа при $t = 500$ °С). Отсутствие пластической деформации можно объяснить тем, что в этой области материал находится в условиях всестороннего сжатия.

Наличие растягивающих нормальных напряжений в зоне конца пера лопатки неблагоприятно сказывается на прочности штампа, так как в этих местах велика вероятность появления усталостных трещин и хрупкого разрушения.

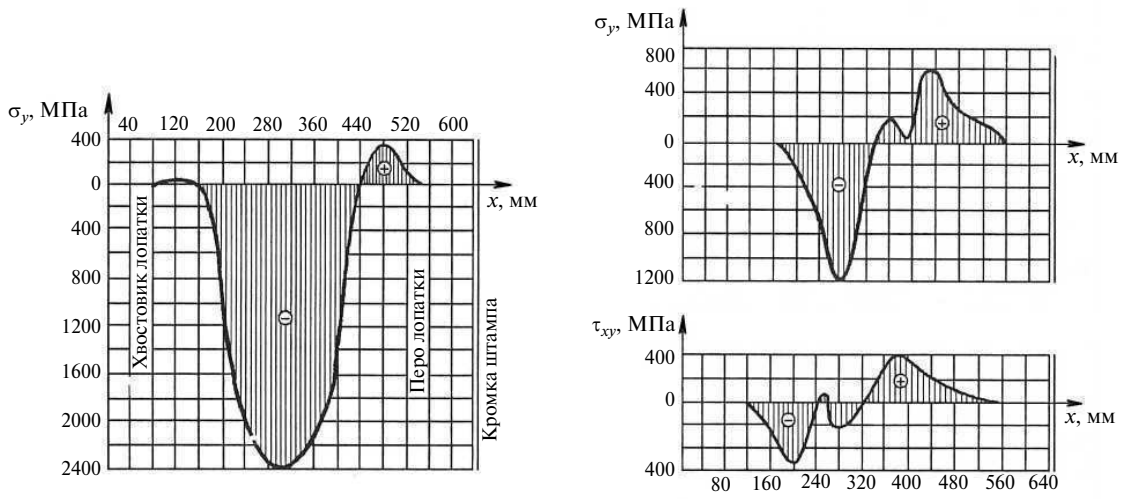


Рис. 2. Распределение напряжений в сечении О-О продольной вклейки (см. рис. 1)

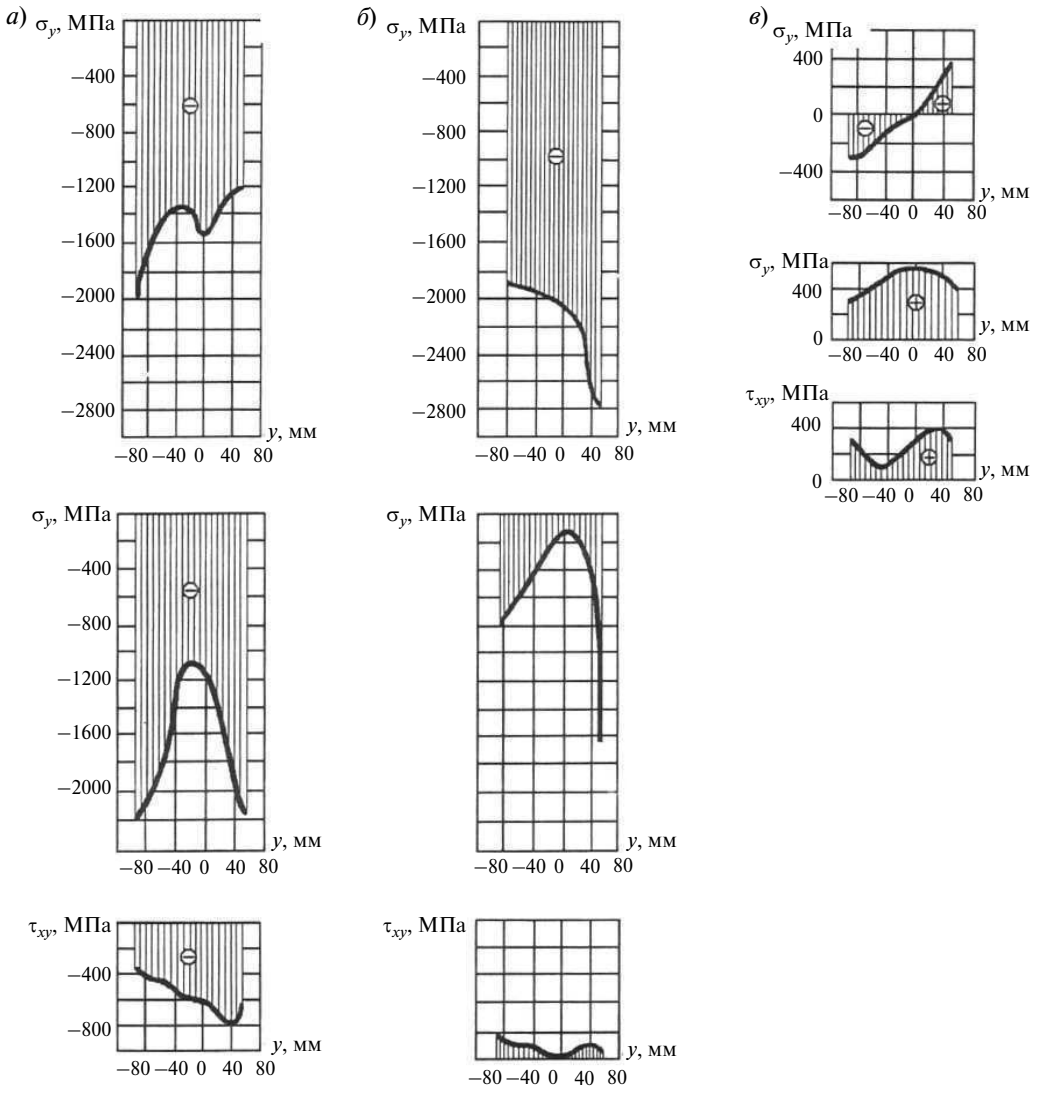


Рис. 3. Распределение напряжений по высоте штампа: *а* — в сечении А-А; *б* — в сечении Б-Б; *в* — в сечении В-В (см. рис. 1)

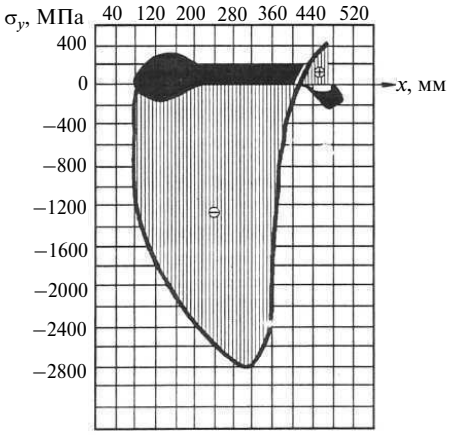


Рис. 4. Распределение напряжений по линии контакта штампа и заготовки

В хвостовике лопатки, где в гравюре штампа имеются острые углы, концентрации напряжений не наблюдается. Очевидно, что для получения более равномерного распределения напряжений в штампе необходимо стремиться к равномерному по длине формоизменению заготовки лопатки.

Результаты исследования совместно с данными по температурному режиму работы штампов, полученными в производственных условиях, позволили оптимизировать размеры штамповых вставок и определить основные направления повышения стойкости штамповой оснастки: применение новых штамповых сталей (4Х4ВМФС и др.) и электродов для наплавки рабочей поверхности инструмента, осуществление химико-термической обработки штампов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кошеленко, А.С.** Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении [Текст] / А.С. Кошеленко, Г.Г. Поздняк.— М.: Издательский дом «Граница», 2004.— 296с.

2. Напряжения и деформация в деталях и узлах машин [Текст] / Под ред. Н.Н. Пригоровского.— М.: Машгиз, 1961.— 563 с.

3. **Александров, А.Я.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела [Текст] / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов.— М.: Наука, 1973.— 576 с.

4. **Сторожев, М.В.** Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов.— М.: Машиностроение, 1971.— 422 с.

REFERENCES

1. **Koshelenko A.S., Pozdniak G.G.** Teoreticheskie osnovy i praktika fotomekhaniki v mashinostroenii [Tekst].— M.: Izdatel'skii dom «Granitsa», 2004.— 296 s. (rus.)

2. Napriazheniia i deformatsiia v detaliakh i uzlakh mashin [Tekst] / Pod red. N.N. Prigorovskogo.— M.: Mashgiz, 1961.— 563 s. (rus.)

3. **Aleksandrov A.Ya., Akhmetzianov M.Kh.** Poliarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tela [Tekst].— M.: Nauka, 1973.— 576 s. (rus.)

4. **Storozhev M.V., Popov E.A.** Teoriya obrabotki metallov davleniem [Tekst].— M.: Mashinostroenie, 1971.— 422 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЭЙГЕНСОН Сергей Николаевич — кандидат технических наук доцент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: eisergei@yandex.ru

КОРИХИН Николай Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: 6407629@mail.ru

ГОЛОВИН Александр Иванович — кандидат технических наук доцент кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: gai422@mail.ru

AUTHORS

EIGENSON Sergei N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: eisergei@yandex.ru

KORIKHIN Nikolai V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: 6407629@mail.ru

GOLOVIN Aleksandr I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: gai422@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 532

Д.В. Немова, В.Я. Ольшевский, Д.Н. Цейтин

ГИДРОСТАТИКА ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

D.V. Nemova, V.Ya. Olshevskyi, D.N. Tseytin

HYDROSTATICS OF HEAT-GRAVITATIONAL CONVECTION IN THE VERTICAL CHANNEL

Восходящее вверх свободно-конвективное движение подогреваемого воздуха вдоль горячей плоскости (стены) навесного фасада сопровождается фильтрацией холодного воздуха сквозь адиабатную поверхность экрана. Холодный и горячий потоки воздуха разнонаправлены, что способствует уменьшению потерь теплоты от горячей стены.

ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ. ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ВЕНТИЛИРУЕМЫЙ КАНАЛ. ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ПОДЪЕМНОЙ (АРХИМЕДОВОЙ) СИЛЫ. ОТРЫВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ. ЧИСЛА ПОДОБИЯ.

Free and convective flow of warmed-up air ascending up along the hot plane (wall) of a curtain wall systems is accompanied by a filtration of cold air through an adiabatic surface of the screen. Cold and hot streams of air are multidirectional that promotes reduction of losses of warmth from a hot wall.

HEAT-GRAVITATIONAL CONVECTION. THE VERTICAL VENTILATED CHANNEL. BOUNDARY LAYER OF UPTHRUST (ARCHIMEDEAN FORCE). SEPARATION OF THE BOUNDARY LAYER. SIMILARITY NUMBER.

Постановка задач

Рассматривается стилизованная схема вентилируемого зазора между «горячей» плоскостью $y = 0$ (с температурой T_h) и холодной адиабатной плоскостью $y = h$ (с температурой T_c). Высота щели равна L, причем $L \gg h$ (рис. 1).

Холодная адиабатная плоскость $y = h$ не герметична и допускает фильтрацию «холодного» воздуха извне и горячего воздуха из щели.

Возникают следующие задачи:

1. Найти условия, при которых возможна фильтрация холодного воздуха в щелевой зазор через негерметичности адиабатной плоскости $y = h$ и обратная фильтрация горячего воздуха из вентилируемого зазора.

2. Найти расход горячего и холодного воздуха в вентилируемом зазоре.

Первая задача (в связи с инфильтрацией воздуха сквозь ограждающие конструкции) рассматривалась в диссертации Д.В. Петросовой [1]. В этой работе утверждается, что при наличии градиента давления на ограждении происходит фильтрация воздуха из помещения наружу, на «подветренную» сторону, и внутрь, с «наветренной» стороны. При этом изотермическая фильтрация воздуха принципиально невозможна и, вообще говоря, изотермический закон Дарси (Дюпюи) выполняется, только если показатель n политропы в фильтрационном течении много больше единицы [2].

Вторая задача связана с расчетом расхода в горячей пристеночной струе при наличии спутного потока холодного воздуха. При отсутствии спут-

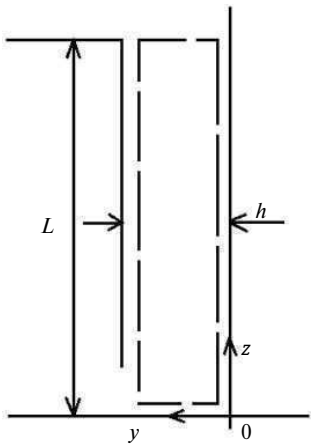


Рис. 1. Расчетная схема зазора

ного потока и инфильтрации воздуха из щели (непроницаемая адиабатная плоскость $y = h$) расход рассчитан в работе М.В. Петроченко [3] и уточнен с учетом переменности плотности по длине потока в [4]. Гидравлика термогравитационной конвекции с переменным по длине расходом, насколько известно, не изучалась [5–10].

Пьезометрическая линия для вертикальной щели

Пусть распределение давления по высоте щели — гидростатическое, газ (воздух) — баротропен, показатель политропы равен *s*. Тогда из решения уравнения гидростатического равновесия Эйлера следует

$$\pi_s(Z) = \left(1 - \frac{s-1}{s} Z\right)^{\frac{s}{s-1}} = 1 - Z + \frac{Z^2}{2s}, \qquad (1)$$

где $\pi := \dfrac{p}{p_0} \in \left[\dfrac{p_L}{p_0}, 1\right]$; $Z := \dfrac{gz}{RT_0} \in [0, \Lambda]$; $\Lambda := \dfrac{gL}{RT_0}$; p_0 — давление на отметке $z = 0$; p_L — давление на отметке $z = L$; $Z = \Lambda$.

В силу (1) $\pi_s(Z)$ — монотонно убывающая функция значка *s*. Например, при баротропном движении воздуха с подогревом показатель политропы *n* меньше показателя адиабаты *k*. Поэтому линия давления для политропного равновесия в координатах *p*, *z* (π, *Z*) проходит правее линии адиабатного равновесия (рис. 2).

Точно так же техническая работа в баротропном движении с $n < k$ больше технической работы при адиабатном движении с $n = k$ (рис. 3).

Профицит технической работы отображает превышение работы архимедовой подъемной силы над работой силы тяжести.

Возможны следующие конфигурации пьезометрической линии при баротропном движении воздуха в вертикальной щели:

1. Схема «равновесного» течения в условиях полного штиля (рис. 4).

На входе в щель преодолевается местное тепловое сопротивление, и падение давления в сечении $z = 0$ ($Z = 0$) составляет $\pi_n(\Lambda) - \pi_k(\Lambda)$. Пьезометрическая линия восходящего потока в щели описывается зависимостью

$$\pi(Z) = \pi_n(Z) - \pi_n(\Lambda) + \pi_k(\Lambda),$$

причем $\pi(\Lambda) - \pi_k(\Lambda) = 0$, т. е. давление на выходе из щели такое же, как и в атмосфере на отметке $z = L$. Перепад давления между атмосферным воздухом и вертикальной щелью распределяется по высоте щели так:

$$\Delta\pi(Z) := \pi_k(Z) - \pi(Z) =$$

$$= \pi_k(Z) - \pi_n(Z) + \pi_n(\Lambda) - \pi_k(\Lambda) =$$

$$= \frac{\Lambda^2 - Z^2}{2}\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{k}\right). \qquad (2)$$

2. В условиях п.1, т. е. равновесного движения, фасадный экран (адиабатная плоскость $y = h$) находится на наветренной стороне (рис. 5, *а*) или на подветренной стороне (рис. 5, *в*).

В первом случае величина перепада давления на экране увеличится за счет скоростной добавки $\pi_{v+} = \dfrac{\rho v_\infty^2}{2p_0}$, во втором случае — уменьшится на величину, пропорциональную скоростной добавке. Для построения эпюры избыточного

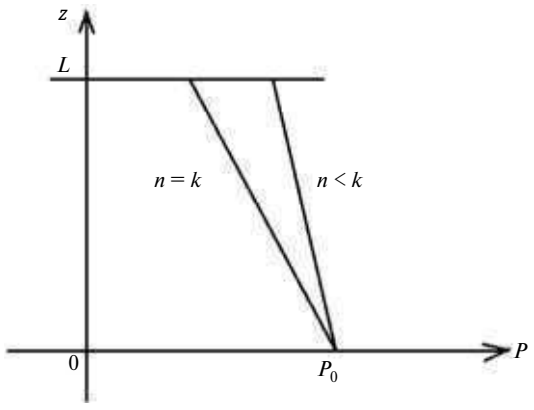


Рис. 2. Распределение давления по высоте адиабатного и политропного столба воздуха

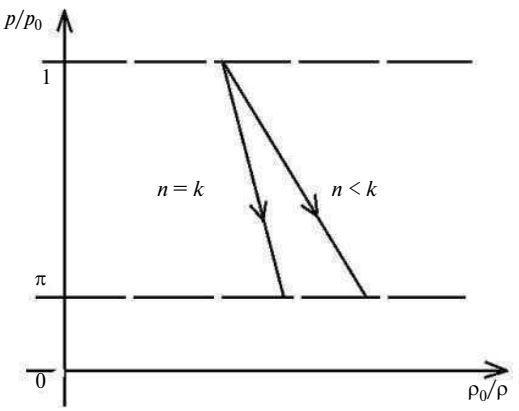


Рис. 3. Техническая работа адиабатного и политропного потоков

давления необходимо знать распределение ветрового напора по высоте фасада. Следовательно, если давление под ветром ниже давления в щелевом канале, происходит фильтрация горячего воздуха наружу. На наветренной стороне приток холодного воздуха в вентилируемый зазор больше притока холодного воздуха при полном штиле.

3. Замороженная схема течения предполагает не скачкообразную (разрывную) релаксацию давления, а непрерывное изменение давления, показанное на рис.6.

Схема, представленная на рис. 6, предполагает существования участка с негидростатическим распределением давления по ходу потока (этот участок пьезометрической линии показан пунктиром).

Из сказанного следует, что аналитическая оценка притока холодного воздуха в щель возможна для схемы п. 1. В этом случае величина скорости v_{ex} притока холодного воздуха в вентилируемую щель может быть найдена из формулы истечения

$$\Delta\pi(Z)=\frac{\rho v_{ex}^2}{2\varphi_{ex}^2 p_0}=\pi_k^{\frac{1}{k}}(Z)\frac{\rho_0 v_{ex}^2}{2\varphi_{ex}^2 p_0}=$$

$$=\left(1-\frac{1}{k}Z\right)\frac{\rho_0 v_{ex}^2}{2\varphi_{ex}^2 p_0}, \qquad (3)$$

где φ_{ex} — коэффициент скорости щели. С учетом (2) равенство (3) приводит к следующему значению скорости затекания холодного воздуха в вентилируемый зазор:

$$v_{ex}=\varphi_{ex}\sqrt{\left(\frac{1}{n}-\frac{1}{k}\right)RT_0}\sqrt{\frac{\Lambda^2-Z^2}{1-\frac{Z}{k}}}. \qquad (4)$$

В силу (4) величина расхода холодного воздуха через щель $0 \le Z_i < Z < Z_{i+1} \le L$ составит

$$\Delta q_{exi}=\frac{RT_0}{g}\int_{Z_i}^{Z_{i+1}} v_{ex}dZ, \qquad (5)$$

а суммарный расход воздуха находится суммированием (5) по всем щелям (Z_i, Z_{i+1}).

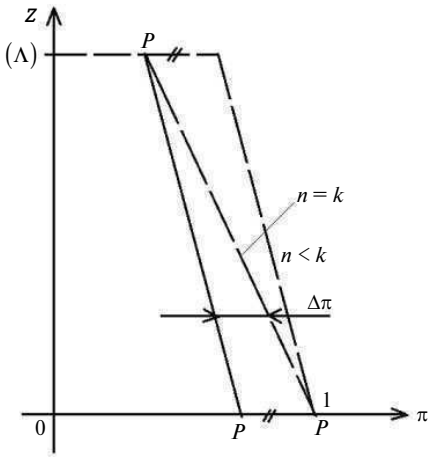


Рис. 4. Пьезометрическая линия для условий полного штиля

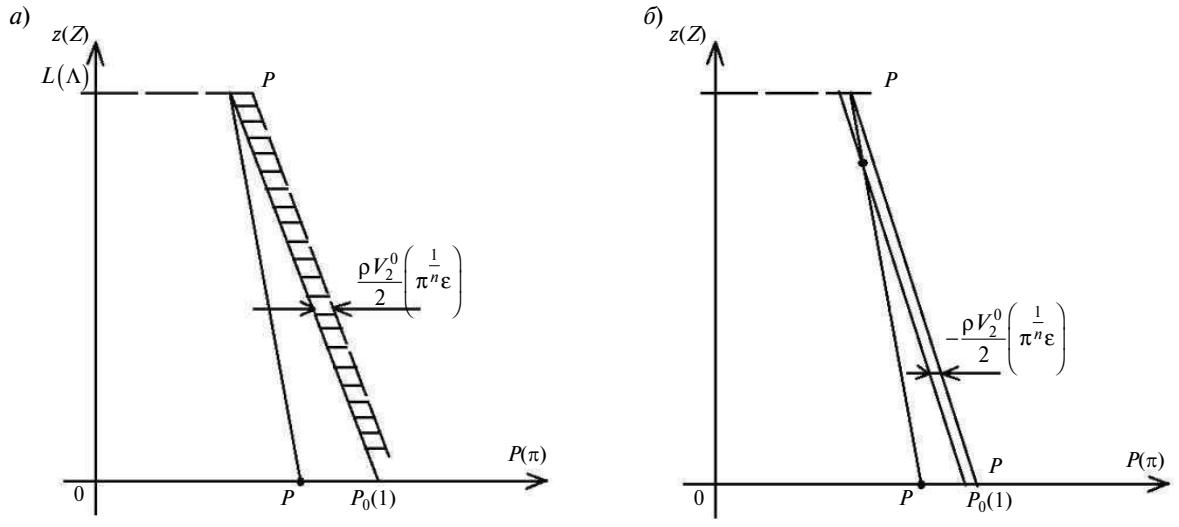


Рис. 5. Пьезометрическая линия зазора наветренной (*а*) и подветренной (*б*) стороны

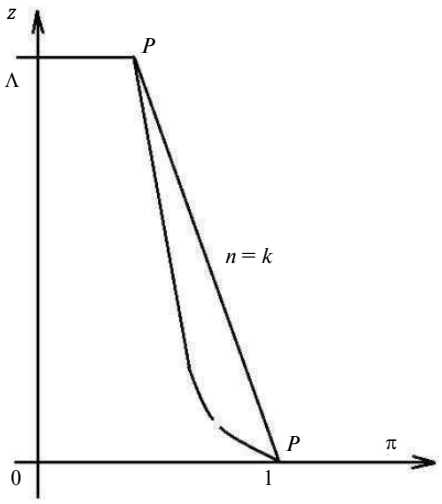


Рис. 6. Пьезометрическая линия для движения с большими входными потерями

Итак, пусть известен расход (инфильтрация) q_{ex} холодного воздуха в вентилируемую щель. Расход горячего воздуха сквозь вентилируемую щель $q_{in} = v\delta(z)$, где v — средняя скорость воздуха в щели, δ — толщина пограничного слоя подъемной силы, $\delta(z) = \sqrt[4]{\frac{4\nu^2 z}{g}}$. Суммарный расход горячей и холодной струй в вентилируемом зазоре равен $q = q_{in} - q_{ex}$. Тогда справедливо следующее утверждение: координата $Z_{\lim}$ сечения вентилируемой щели, отвечающая нулевому значению расхода ($q = 0$), удовлетворяет условию

$$\sqrt[4]{Z_{\lim}^3} = \frac{\varphi}{\varphi_{ex}} \sqrt{\frac{2}{\Re}} \frac{1}{\sqrt[4]{\Lambda}}, \qquad (6)$$

где $\Re = \frac{\sqrt{gL^3}}{\nu}$ — нечто вроде комбинации чисел Фруда и Рейнольдса; φ — коэффициент расхода вентилируемой зазора.

Пусть $Z_{\lim} = \Lambda$. Тогда предельное значение относительной высоты вентилируемого зазора, удовлетворяющее условию положительности расхода q смеси холодной и горячей струй, в силу (6) равно

$$\Lambda_{\lim} = \frac{\varphi}{\varphi_{ex}} \sqrt{\frac{2}{\Re}}. \qquad (6_1)$$

Отсюда

$$\sqrt[4]{L_{\lim}^7} = \sqrt{2\nu} \frac{\varphi}{\varphi_{ex}} \frac{RT_0}{\sqrt[4]{g^5}}. \qquad (7)$$

Значение высоты вентилируемого пространства $L_{\lim}$ называется предельным, т.к. на отметках $Z > L_{\lim}$ восходящий вверх поток подогретого воздуха сменяется падающим потоком холодного воздуха. На отметке $Z = L_{\lim}$ суммарный расход горячей и холодной струй равен нулю. Предельная длина уменьшается вместе с T_0 и возрастает с увеличением вязкости воздуха. Влияние отношения скоростных коэффициентов на предельную высоту вентилируемой щели очевидно.

Качественная структура восходящего потока в вентилируемом пространстве

Результаты предыдущего пункта могут быть уточнены, а именно: вне гидравлического анализа остается поведение горячего настильного факела при наличии попутного и (или) спутного потока. Для низкорейнольдсовой модели турбулентности

$$R_h = \frac{vh}{\nu} = O\left(\sqrt{G_h}\right); \quad G_h = \frac{gh^3}{\nu^2} \frac{2(T_h - T_c)}{T_h + T_c};$$

$$G_h = O\left(10^6 - 10^7\right)$$

уравнения импульсов и энергии могут быть записаны в виде

$$f''' + 3ff'' - 2f'^2 + \theta = 0;$$

$$\theta'' + 3\sigma f\theta' = 0, \qquad (8)$$

где $f = f(\zeta)$ — безразмерная функция тока, $f(\zeta) = \nu \frac{\psi(y,z)}{g\delta^3}$; $\theta(\zeta) = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \in [0,1]$ — безразмерный температурный напор; σ — число Прандтля; $\zeta = \frac{y}{\delta(z)}$; $\delta(\zeta) = \sqrt[4]{\frac{4\nu^2 z}{g}}$; $\zeta \in [0, \infty)$. При существовании спутного течения предельные условия для системы (8) имеют вид

$$f(0) = f'(0) = f'(\infty) - \beta = \theta(0) - 1 = \theta(\infty) = 0, \qquad (9)$$

где $u_z(\infty, z) = \frac{g\delta^3}{\nu}\beta$, т. е. β — безразмерная скорость на внешней границе настильного факела. При $\beta = 0$ предельная задача решена Польгаузеном. Решение в виде расщепляющего ряда приводится в [5].

Формулируем окончательные результаты:

1) асимптотическое ($\zeta \gg 1$) выражение для безразмерной функции тока есть

$$f(\zeta) \cong \beta\zeta + a + O\left(\zeta \exp(-3a\zeta)\right),$$

причем параметр $a = f(\infty) - \beta\zeta$ задает масштаб толщины пограничного слоя и расхода горячего воздуха через пограничный слой;

2) постоянные a и β связаны тождеством

$$a = \sqrt{\sqrt{\frac{1}{27} + \frac{\beta^2}{36}} - \frac{\beta}{6}}.$$

Распределения скорости в сечении вертикального вентилируемого зазора для попутного и для встречного потоков приводятся на рис. 7;

3) для существования пристеночного пограничного слоя на горячей грани необходимо выполнение неравенства $\beta \geq -\frac{1}{9a^2} = \beta_s$, где β_s — отрывное значение параметра спутности β. Если $\beta = \beta_s$, то пограничный слой сорван встречным потоком. Пусть $\beta = \beta_s$. Тогда $a = \sqrt[4]{\frac{2}{27}}$, $\beta_s = -\frac{1}{\sqrt{6}}$, $f''(0) = 0$;

4) разность $\omega = a + \beta\left(\frac{h}{\delta(z)} - 1\right)$ пропорциональна расходу горячего (a) и холодного воздуха. Заменяем β на $-\beta$. Тогда для существования восходящего потока в вентилируемой щели необходимо $a \geq \beta\left(\frac{h}{\delta} - 1\right)$. Или, учитывая п. 2,

$$\sqrt{\sqrt{\frac{1}{27} + \frac{\beta^2}{36}} + \frac{\beta}{6}} \geq \beta\left(\frac{h}{\delta} - 1\right),$$

и далее

$$m^4\beta^4 - m^2\frac{\beta^3}{3} \leq \frac{1}{27},$$

где $m = h/\delta - 1$. Ясно, что в тонком пограничном слое ($m \gg 1$) обнуление расхода произойдет при значении параметра спутности $\beta \ll 1$, т. е. вначале произойдет обнуление расхода, а срыв пограничного слоя еще не произойдет. Вообще легко доказать, что обнуление расхода происходит независимо от того, произошел или не произошел отрыв пограничного слоя на горячей грани вентилируемого зазора. Например, если $m = 1$ ($h/\delta = 2$), $\beta = \beta_s = \frac{1}{\sqrt{6}}$. В этом случае $\omega_s = \sqrt{\frac{3}{6\sqrt{6}} + \frac{1}{6\sqrt{6}}} - \frac{1}{\sqrt{6}} = 0{,}03349 > 0 = 0{,}03349 > 0$, т. е. обнуления расхода еще не происходит и смесь холодного и горячего воздуха в среднем движется снизу вверх. Очевидно, если параметр спутности удовлетворяет условию $\beta^4 - \frac{\beta^3}{3} - \frac{1}{27} = 0$, то произойдет обнуление расхода. Положительное решение этого уравнения $\beta = 0{,}552 > \beta_s$ показывает, что обнуление расхода происходит при больших значениях параметра спутности, чем отрыв пограничного слоя.

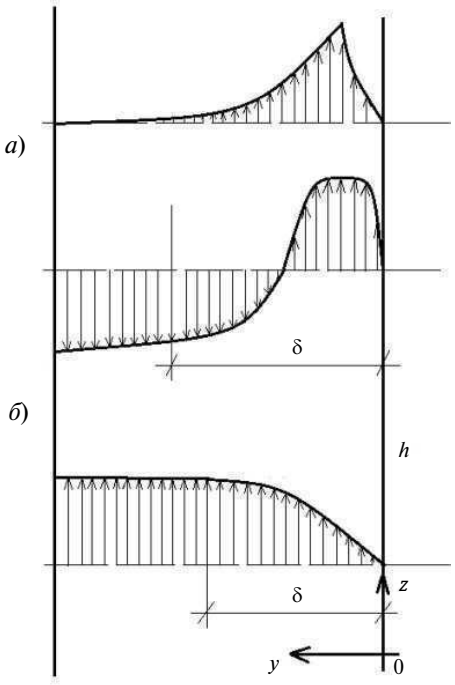


Рис. 7. Эпюра скорости в вертикальном зазоре для движений с переменным по длине расходом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросова, Д.В.** Неизотермическая фильтрация воздуха через ограждающие конструкции замкнутых помещений [Текст]: Автореферат дисс. к.т.н. / Д.В. Петросова.— 05.23.16, СПбГПУ.— 2012.— 21 с.

2. **Петриченко, М.Р.** Термодинамические тождества и уравнения неизотермической фильтрации в изотропной пористой среде [Текст] / М.Р. Петриченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ.—

2013. № 2(171).— С. 188–192.

3. **Петриченко, М.Р.** Достаточные условия существования свободноконвективного течения в вертикальном щелевом канале [Текст] / М.Р. Петриченко, М.В. Петроченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2-2(147).— С. 276–282.

4. **Немова, Д.В.** Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов [Текст] / Д.В. Немова // Инженерно-строительный журнал.— 2013. №2.— С. 25–34.

5. **Петриченко, М.Р.** Расщепляющие разложения в предельных задачах для обыкновенных квазилинейных дифференциальных уравнений [Текст] / М.Р. Петриченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.— 2012. №2 (146).— С. 143–149.

6. **Остроумов, Г.С.** Свободная конвекция в условиях внутренней задачи [Текст] / Г.С. Остроумов // М.–Л.: ГТТИ, 1952.— 256 с.

7. **Соковишин, Ю.А.** Введение в теорию свободноконвективного теплообмена [Текст] / Ю.А. Соковишин, О.Г. Мартыненко.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.— 232 с.

8. **Колешко, С.Б.** Турбулентный свободноконвективный теплообмен на вертикальной поверхности со ступенчатым нагревом при инверсии теплового потока [Текст] / С.Б. Колешко, Ю.С. Чумаков // Теплофизика высоких температур.— 2010. Т. 48, № 3.— С. 419–423.

9. **Чумаков, Ю.С.** Экспериментальное исследование переходного и турбулентного свободноконвективного пограничного слоя на вертикальной нагретой поверхности [Текст]: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук / Ю.С. Чумаков.— Санкт-Петербург, 2000.

10. **Greene, G.A.** Heat Transfer [Текст] // Encyclopedia of Physical Science and Technology.— Third Edition.— 2003.— P. 279–292.

REFERENCES

1. **Petrosova D.V.** Neizotermicheskaia fil'tratsiia vozdukha cherez ograzhdaiushchie konstruktsii zamknutykh pomeshchenii [Tekst]: avtoref. diss. k.t.n. / D.V. Petrosova.— 05.23.16.— SPbGPU, 2012.— 21 s. (rus.)

2. **Petrichenko M.R.** Termodinamicheskie tozhdestva i uravneniia neizotermicheskoi fil'tratsii v izotropnoi poristoi srede [Tekst] / Nautchno-teknitcheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. № 2(171).— S. 188–192. (rus.)

3. **Petrichenko M.R., Petrochenko M.V.** Dostatochnye usloviia sushchestvovaniia svobodnokonvektivnogo techeniia v vertikal'nom shchelevom kanale [Tekst] // Nautchno-teknitcheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. № 2-2(147).— S. 276–282. (rus.)

4. **Nemova D.V.** Integral'nye kharakteristiki termogravitatsionnoi konvektsii v vozdushnoi prosloike navesnykh ventiliruemykh fasadov [Tekst] // Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal.— 2013. №2. S. 25–34. (rus.)

5. **Petrichenko M.R.** Rasshchepliaiushchie razlozheniia v predel'nykh zadachakh dlia obyknovennykh kvazilineinykh differentsial'nykh uravnenii [Tekst] // Nautchno-teknitcheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki.— 2012. №2 (146).— S. 143–149. (rus.)

6. **Ostroumov G.S.** Svobodnaia konvektsiia v usloviiakh vnutrennei zadachi [Tekst] // M.–L.: GTTI, 1952.— 256 s. (rus.)

7. **Sokovishin Yu.A., Martynenko O.G.** Vvedenie v teoriiu svobodno-konvektivnogo teploobmena [Tekst] // L.: Izd-vo LGU, 1981.— 232 s. (rus.)

8. **Koleshko S.B., Chumakov Yu.S.** Turbulentnyi svobodnokonvektivnyi teploobmen na vertikal'noi poverkhnosti so stupenchatym nagrevom pri inversii teplovogo potoka [Tekst] // Teplofizika vysokikh temperatur.— 2010. T. 48, № 3.— S. 419–423. (rus.)

9. **Chumakov Yu.S.** Eksperimental'noe issledovanie perekhodnogo i turbulentnogo svobodnokonvektivnogo pogranichnogo sloia na vertikal'noi nagretoi poverkhnosti [Tekst]: Avtoref. diss. ... doktora fiziko-matematicheskikh nauk.— Sankt-Peterburg, 2000. (rus.)

10. **Greene George Alanson.** Heat Transfer // Encyclopedia of Physical Science and Technology.— Third Edition.— 2003.— P. 279–292. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕМОВА Дарья Викторовна — инженер кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: darya.nemova@gmail.com

ОЛЬШЕВСКИЙ Вячеслав Янушевич — магистр инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; e-mail: Volshevskiy@yandex.ru

ЦЕЙТИН Дмитрий Николаевич — ведущий инженер кафедры гидравлики инженерно-строительного института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: dm.inco@gmail.com

AUTHORS

NEMOVA Darya V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: darya.nemova@gmail.com

OLSHEVSKIY Vyacheslav Ya. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Volshevskiy@yandex.ru

TSEYTIN Dmitrii N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: dm.inco@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 620.10

Ю.С. Воробьев, Л.Б. Гецов,
Б.Е. Мельников, А.С. Семенов

ПРОБЛЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ, СЕЙСМОСТОЙКОСТИ И ПРОЧНОСТИ ТУРБОМАШИН
Часть 2

Yu.S. Vorobiov, L.B. Getsov,
B.E. Melnikov, A.S. Semenov

VIBRATION PROBLEMS OF FOUNDATIONS, SEISMIC RESISTANCE AND STRENGTH OF TURBOMACHINERY
Part 2

Рассматривается ряд актуальных проблем современного энергомашиностроения, связанных с колебаниями единой системы «турбоагрегат — фундамент — основание», при нестационарных динамических воздействиях, возникающих при эксплуатации в случае ударных сотрясений из-за сейсмических воздействий на объекты энергетического машиностроения, а также статической и термоциклической прочностью и колебаниями лопаточного аппарата современных турбомашин.

ФУНДАМЕНТ. КОЛЕБАНИЯ. КОРПУС ТУРБИНЫ. ЛОПАТКА. МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СПЛАВ. КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ.

The article considers a number of urgent problems of modern power-plant-related fluctuations in the single turbine system — pedestal — foundation, a non-stationary dynamic effects that occur at shock jolt in the case of seismic processes of power engineering facilities in operation, with questions related to static and thermal cycling resistance and vibrations advanced turbomachinery blading.

THE FOUNDATION OF THE UNIT. VIBRATION. TURBINE BLADE. SINGLE CRYSTAL ALLOY. FRACTURE CRITERION.

Проблемы вибрационного состояния фундаментов и сейсмостойкости турбомашин рассматривались в первой части статьи [1]. Вторая часть работы посвящена вопросам прочности турбомашин. Надежность эксплуатации современных турбомашин определяется прежде всего прочностью таких элементов, как диски и лопатки турбин. Несмотря на широкое применение монокристаллических сплавов на никелевой основе при изготовлении рабочих лопаток высокотемпературных газовых турбин, вопросы корректного определения их напряженнно-деформированного состояния (НДС) и прочности при статическом, вибрационном и термоциклическом нагружении не нашли еще своего исчерпывающего решения и внедрения в практику проектирования ГТД. В данной статье представлен ряд результатов экспериментальных и расчетных исследований усталостной и термоусталостной прочности монокристаллических сплавов на никелевой основе, выполненных на корсетных образцах и лопатках ГТУ. В числе особенностей неупругого поведения рассматриваемых сплавов, с одной стороны, значительно большая пластичность по сравнению с поликристаллическими сплавами с той же степенью легирования, с другой стороны, влияние кристаллографической ориентации (КГО) на разнообразные свойства монокристаллических сплавов, что заметно усложняет процедуру решения краевых задач и оценку прочности и долговечности.

В современных высокотемпературных газотурбинных двигателях используются лопатки турбин, отливаемые методом направленной кристаллизации и монокристаллического литья [2].

Основными достоинствами получаемых таким способом сплавов являются увеличенное сопротивление высокотемпературной ползучести за счет исключения границ между зернами и уменьшенная по сравнению с обычными материалами с равноосной структурой величина модуля упругости в кристаллографическом направлении <001>, что значительно снижает термические напряжения и увеличивает сопротивление малоцикловой усталости. На практике монокристаллические лопатки кристаллизуются как система однородно направленных дендритов, а не единого дендрита. Тем не менее все существующие монокристаллические материалы на основе никеля на макроуровне обнаруживают свойства кубической симметрии, при которой механические свойства оказываются практически одинаковыми для трех вполне определенных взаимно перпендикулярных направлений. Поэтому при разработке феноменологических моделей деформирования, критериев прочности и долговечности такие материалы можно условно рассматривать как монокристаллы с идеальной гранецентрированной кубической структурой.

Определение НДС турбинных лопаток производят с использованием различных программных средств на основе применения метода конечных элементов (МКЭ). Для оценки прочности и ресурса используются различные критерии разрушения и модели материала. При этом возникает множество вопросов, связанных с тем, что необходимо выбрать [3–9] следующее:

методы расчета НДС лопаток из монокристаллических сплавов;

методы расчета статической прочности таких лопаток;

способы определения запасов прочности при термоциклическом нагружении лопаток из монокристаллических материалов;

способы расчетного определения размахов деформаций при термоциклическом нагружении охлаждаемых лопаток;

способы определения влияния длительности цикла на сопротивление термической усталости материала лопаток;

способы определения температурных полей в лопатках на нестационарных режимах эксплуатации;

способы определения скоростей роста трещин ползучести, усталости и термической усталости;

способы учета влияния на прочность лопаток защитных покрытий;

способы учета коррозионных повреждений лопаток и изменений структуры при эксплуатации.

Наряду со сложностями адекватного описания НДС лопаток, возникают проблемы с экспериментальным определением необходимых для использования в расчетах прочности свойств материалов. К их числу относятся зависящие от температуры и КГО характеристики:

сопротивление кратковременному деформированию в условиях растяжения и сжатия;

кратковременная ползучесть и ползучесть на установившейся стадии;

сопротивление усталости и термической усталости;

зависимости скорости роста трещин от коэффициентов интенсивности напряжений и от значений C^*-интеграла;

кратковременная и длительная пластичность и прочность.

Перечисленные характеристики для новых материалов, обладающих более высокими показателями по длительной прочности, обычно определяются разработчиком в ограниченном объеме или вовсе недоступны для инженеров. Это тормозит внедрение новых материалов в производство.

В отличие от поликристаллических материалов, для которых зависимости характеристик сопротивления деформированию и разрушению от вида напряженного состояния исследовались достаточно широко, такие зависимости для монокристаллических сплавов находятся лишь в начальной стадии изучения. Поэтому при практических расчетах НДС и прочности лопаток из этих сплавов в настоящее время приходится использовать модели, не получившие достаточной экспериментальной проверки (например, использовать свойства изотропного материала вместо анизотропного монокристаллического; зависимости Нортона ползучести вместо ползучести на первой и второй стадиях, характеристики аналогичных материалов и т. д.), что снижает достоверность расчета ресурса и повышает риск разрушения детали при эксплуатации. Между тем использование полных данных о характеристиках материалов и совершенные методы расчета — залог повышенной надежности лопаток ГТУ.

Кроме того, для повышения надежности охлаждаемых лопаток ГТУ необходимо совершенствовать методы расчета их температурных полей. При этом важной задачей является определение граничных условий теплообмена на различных режимах эксплуатации.

Методы расчета НДС и запасов статической прочности лопаток из монокристаллических сплавов

Охлаждаемые лопатки турбин работают в условиях агрессивных сред и нагружения центробежными и газовыми силами при высоких температурах на стационарных и нестационарных режимах. Расчеты НДС и прочности таких лопаток необходимо проводить с учетом деформаций упругости, пластичности, ползучести и температурных деформаций, а также с учетом изменения свойств жаропрочных сплавов, из которых изготовлены лопатки, в неравномерном поле температур. Такие методики разработаны и широко применяются, в частности для расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности лопаток турбин из изотропных материалов.

Для монокристаллических никелевых сплавов с кубической симметрией матрица податливости [S] в системе координат, оси которой совпадают с осями упругой симметрии монокристалла, имеет вид [2]

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Коэффициенты этой матрицы определяются выражениями: $S_{11}=1/E, S_{12}=-\mu/E, S_{44}=1/G$, где E, μ, G — три независимые константы, а именно модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль сдвига монокристалла для его главных осей упругой симметрии.

Для монокристаллических сплавов, обладающих кубической симметрией, коэффициент линейного расширения — $\alpha=\alpha(T)$ является изотропным, не зависящим от выбранной ориентации. Таким образом, термические напряжения в монокристаллических турбинных лопатках вызываются только градиентами температуры, как и в лопатках с равноосной структурой.

Проблемам расчетного анализа напряженного состояния и предсказания ресурса лопаток из сплавов направленной кристаллизации (DS) и из монокристаллических сплавов (SC) посвящено большое количество публикаций. Каждую из предлагаемых моделей состояния и предсказания долговечности можно оценивать по двум критериям: по степени точности описания реального поведения материала и по стоимости затрат и времени для получения экспериментальных данных. Очевидно, что высокая цена и продолжительность исследований, необходимые для разработки моделей состояния высокого уровня для прогнозирования нелинейного деформирования и разрушения турбинных лопаток, отливаемых из DS и SC материалов, являются серьезным ограничением для таких исследований. С другой стороны, каждая модель должна включать в себя наиболее важные особенности механического поведения этих материалов, иначе целесообразность ее применения будет сомнительна. Следует также учитывать, что каждому уровню модели материала лопатки должен соответствовать адекватный ей уровень данных об условиях ее эксплуатации, таких, как температура лопатки, уровень действующих в ней статических и динамических напряжений, условия коррозионно-эрозионного воздействия на лопатку газового потока и др. В связи с этим наряду с дальнейшими углубленными исследованиями механики нелинейного деформирования и разрушения анизотропных DS и SC материалов, целесообразна разработка и использование упрощенных, но достаточно эффективных с практической точки зрения моделей состояния и методов расчета лопаток, отливаемых из этих сплавов.

Практическое применение для прогнозирования НДС лопаток получили феноменологические модели, основанные на рассмотрении SC-материала как анизотропного континуума. Феноменологический подход позволяет описать исходную и деформационную анизотропию материалов.

Наиболее простая феноменологическая модель упруго-пластического деформирования анизотропного материала предложена Хиллом [10], который ввел модификацию условия на-

чала текучести Мизеса в виде квадратичной формы произвольного вида в пространстве напряжений применительно к материалам, имеющим три ортогональные плоскости симметрии. Эта функция начала текучести вместе с использованным Хиллом, ассоциированным законом течения описывают пластическое течение ортотропного материала с изотропным упрочнением. Lee, Zaverl, Shih и др., развив теорию Хилла, разработали теорию анизотропной пластичности с кинематическим упрочнением [11].

Согласно подходу Хилла эквивалентное приращение пластических деформаций и эквивалентное напряжение для монокристаллов с кубической симметрией может быть выражено через компоненты тензора приращений пластических деформаций и напряжений в системе координат, связанной с кристаллографическими осями [100], [010], [001]:

$$d\varepsilon_{eq}=\left\{\frac{2}{9}\left[\left(d\varepsilon_{11}^{p}-d\varepsilon_{22}^{p}\right)^{2}+\left(d\varepsilon_{22}^{p}-d\varepsilon_{33}^{p}\right)^{2}+\left(d\varepsilon_{33}^{p}-d\varepsilon_{11}^{p}\right)^{2}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{K_p}\left[\left(d\gamma_{12y}^{p}\right)^{2}+\left(d\gamma_{23y}^{p}\right)^{2}+\left(d\gamma_{31y}^{p}\right)^{2}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{eq}=\left\{\frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{11}-\sigma_{22}\right)^{2}+\left(\sigma_{22}-\sigma_{33}\right)^{2}+\left(\sigma_{33}-\sigma_{11}\right)^{2}\right]+\right.$$

$$\left.+K_p\left(\tau_{12}^{2}+\tau_{23}^{2}+\tau_{31}^{2}\right)\right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) для монокристалла отличаются от соответствующих выражений для изотропных тел наличием коэффициента анизотропии пластичности монокристаллического сплава K_p.

Если известны значения предела текучести монокристалла при его растяжении в направлении $\langle 001\rangle$, а также в каком-либо другом заданном направлении $\langle n\rangle$, определяемом углами φ и ψ (рис. 1, *а*), то на базе этих данных может быть вычислен коэффициент анизотропии пластичности K_p по формуле

$$K_p=\frac{1}{g(\varphi,\psi)}\left[\left(\frac{\sigma_{T<001>}}{\sigma_{T<n>}}\right)^{2}-f(\varphi,\psi)\right]+1,$$

где $g(\varphi,\psi)$, $f(\varphi,\psi)$ — функции углов заданного направления.

Самым распространенным и поэтому наиболее практически важным для монокристаллических турбинных лопаток является частный случай, когда в лопатке при отливке реализуется первичная ориентация кристаллографической решетки материала $\langle 001\rangle$. Первичной, или аксиальной, называется такая пространственная ориентация кристаллографической решетки монокристалла в теле лопатки, при которой четыре грани куба монокристалла расположены параллельно направлению действия центробежной нагрузки в лопатке (рис. 1, *б*). При этом в поперечном сечении лопатки положение монокристалла характеризуется вторичной, или азимутальной, ориентацией. Напряжения в поперечном сечении такой лопатки действуют в кристаллографических направлениях типа $\langle 001\rangle$ и $\langle 011\rangle$. В других точках направления действия этих напряжений занимают промежуточное положение, определяемое углом φ между этим направлением и главной осью упругой симметрии монокристалла.

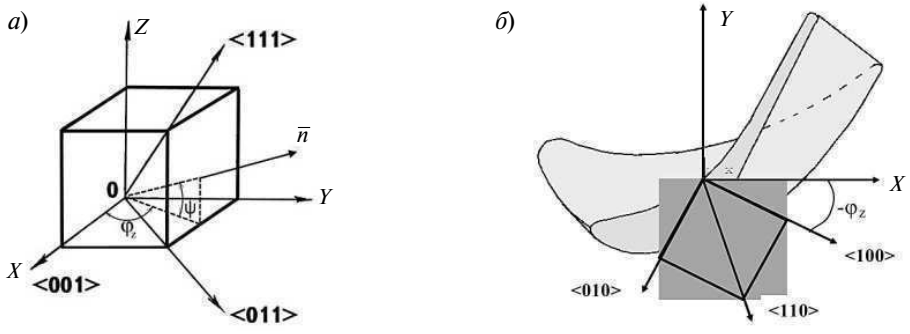


Рис. 1. Кристаллографическая ориентация монокристаллического сплава в лопатке: *а* — расположение основных кристаллографических направлений в кубической решетке; *б* — взаимная ориентация осей лопатки и кристаллографических осей

Таким образом, для лопаток, отлитых с первичной ориентацией $\langle 001 \rangle$ монокристаллического материала, необходимо учитывать механические свойства только для кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$, а также для промежуточных направлений, характеризуемых значениями углов $0 \le \varphi \le 45°$, $\psi = 0$. Указанным направлениям соответствует сторона $\langle 001 \rangle - \langle 011 \rangle$ стандартного стереографического треугольника. В этом случае коэффициент анизотропии пластичности SC-материала для каждой заданной температуры принимается постоянным, т. е. независящим от угла φ, и определяется по формуле

$$K_T = 4\left(\frac{\sigma_{т\langle 001 \rangle}}{\sigma_{т\langle 011 \rangle}}\right)^2 - 1. \qquad (4)$$

Здесь $\sigma_{т\langle 001 \rangle}$, $\sigma_{т\langle 011 \rangle}$ — экспериментально определенные пределы текучести для направлений $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$.

Расчетные соотношения ползучести для SC-материалов при использовании теории Хилла [3] могут быть представлены в аналогичном соотношениям (2), (3) виде, но для скоростей деформаций ползучести и напряжений:

эквивалентное напряжение для ползучести

$$\sigma_e = \left\{\frac{1}{2}\left[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2\right] + K_c\left(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (5)$$

эквивалентная скорость деформаций ползучести

$$\xi_e^c = \left\{\frac{2}{9}\left[\left(\xi_{11}^c - \xi_{22}^c\right)^2 + \left(\xi_{22}^c - \xi_{33}^c\right)^2 + \left(\xi_{33}^c - \xi_{11}^c\right)^2\right] + \frac{1}{K_p}\left[\left(\eta_{12}^c\right)^2 + \left(\eta_{23}^c\right)^2 + \left(\eta_{31}^c\right)^2\right]\right\}^{\frac{1}{2}}. \qquad (6)$$

Здесь ξ_x^c, ξ_y^c, ξ_z^c, η_{xy}^c, η_{yz}^c, η_{zx}^c — компоненты тензора скоростей деформации ползучести; K_c — коэффициент анизотропии ползучести монокристаллического сплава.

Для SC-лопаток, отливаемых с первичной КГО $\langle 001 \rangle$, коэффициент анизотропии ползучести, если известны экспериментальные данные о скоростях ползучести SC-материала только для кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$, приближенно может быть вычислен по формуле

$$K_c = 4\left(\frac{\xi^c_{<001>}}{\xi^c_{<011>}}\right)^2 - 1. \qquad (7)$$

Для вычисления пластических деформаций, деформаций ползучести сплавов с кубической симметрией, например методом Хилла, требуется экспериментально определить значения пределов текучести и скоростей ползучести в двух различных неортогональных направлениях кристаллографических осей (обычно $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$) во всем диапазоне рабочих температур. Однако таких данных, как правило, недостаточно.

В статье Л.А. Магеррамовой и Б.Е. Васильева [13] обсуждалась серия трехмерных расчетов охлаждаемой лопатки авиадвигателя с использованием различных *феноменологических* моделей материала. В работе [14] представлена методика расчетов на основе реализованных в конечно-элементном программном комплексе PANTOCRATOR [15] *физических* моделей пластичности и ползучести, учитывающих, что неупругое деформирование монокристалла происходит по системам скольжения и определяется КГО.

На рис. 2 приведены результаты сопоставления интенсивности местных напряжений по обводу профиля сечения близкого к корневому для реальной рабочей лопатки стационарной ГТУ, изготовленной из изотропного и анизотропного материалов.

Видно, что максимальные напряжения для монокристаллической лопатки могут заметно отличаться от напряжений в лопатке из поликристаллического материала.

На рис. 3 и 4 приведены кривые деформирования [16] и кривые ползучести [17], полученные при испытаниях образцов из монокристаллического сплава ЖС32 с различной ориентацией.

Коэффициент запаса длительной статической прочности n_σ и соответствующую поврежденность D^s можно представить в виде

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{R<001>}}{\bar{\sigma}_{eq}}; \qquad D_\sigma = \frac{1}{n_\sigma}, \qquad (8)$$

где $\sigma_{R<001>} = f(T, \tau)$ — предел длительной статической прочности монокристаллического

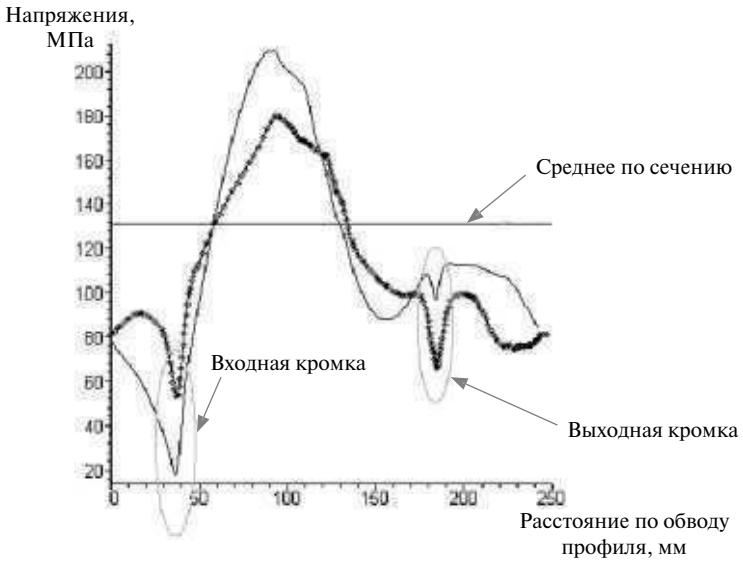


Рис. 2. Распределение значений интенсивности напряжений σ_i по контуру для изотропного и анизотропного материалов (———— — изотропный материал; ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ — анизотропный материал)

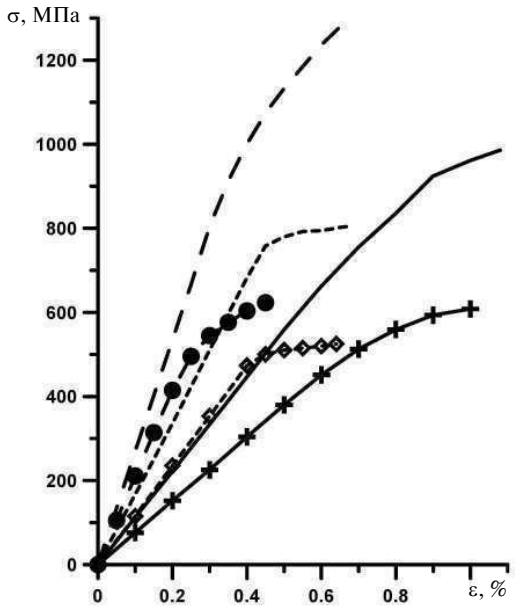


Рис. 3. Кривые деформирования сплава ЖС32 при температурах 20 и 1000°С (—— — ⟨001⟩, 20 °С; ----- — ⟨011⟩, 20 °С; — — — ⟨111⟩, 20 °С; —+— — ⟨001⟩, 1000 °С; --◆-- — ⟨011⟩, 1000 °С; —●— — ⟨111⟩, 1000 °С

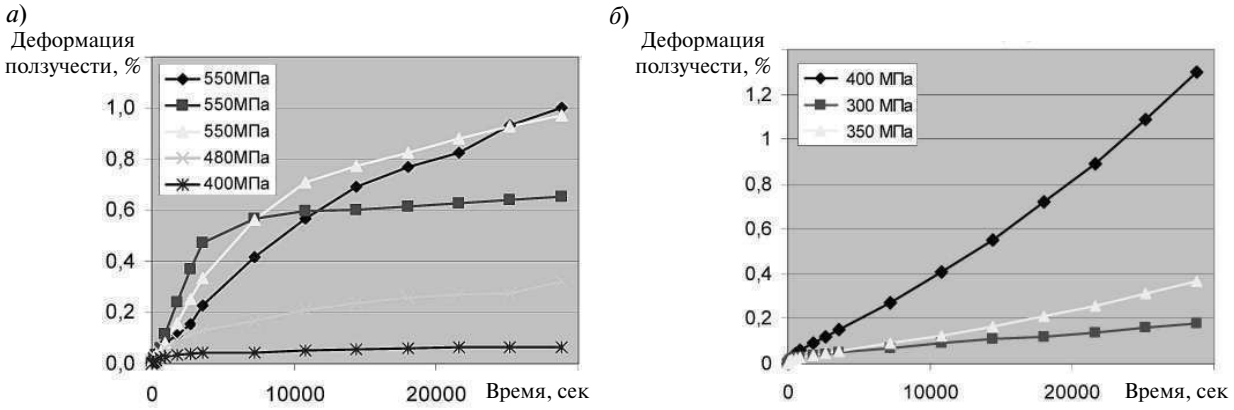


Рис. 4. Кривые ползучести сплава ЖС32 при 850 (*а*) и 975 (*б*) °С

сплава при растяжении в направлении $\langle 001 \rangle$; $\bar{\sigma}_{eq}$ — эквивалентного напряжение, определяемое по формуле

$$\bar{\sigma}_{eq} = \sqrt[m_{e\langle 001\rangle}]{\frac{1}{t}\int_0^t \left[\sigma_{eq}(\tau)\right]^{m_{e\langle 001\rangle}} d\tau}, \qquad (9)$$

где $m_{e\langle 001\rangle}$ — показатель степени кривой длительной прочности монокристаллического сплава для кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$ при рабочей температуре лопатки;

$$\sigma_{eq} = \left\{\frac{1}{2}\left[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2\right] + \right.$$

$$\left. -+ K_R\left(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2\right)\right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (10)$$

где K_R — коэффициент анизотропии длительной статической прочности, который вычисляется по формуле

$$K_R = 4\left(\frac{\sigma_{R\langle 001\rangle}}{\sigma_{R\langle 011\rangle}}\right)^2 - 1. \qquad (11)$$

Для оценки НДС монокристаллических лопаток при сложных программах термомеханического нагружения рационально применять физические модели неупругого деформирования материала, учитывающие, что неупругие деформации происходят в соответствии с механизмом скольжения по активным системам скольжения. К использованию феноменологических моделей пластичности и ползучести с учетом анизотропии только в критерии пластичности и в упругих свойствах следует относиться с осторожностью. Результаты расчетов для лопаток с ориентацией $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ с использованием физических моделей упруго-пластического деформирования монокристаллов [18, 19] показаны на рис. 5. Видно, что КГО лопатки оказывает

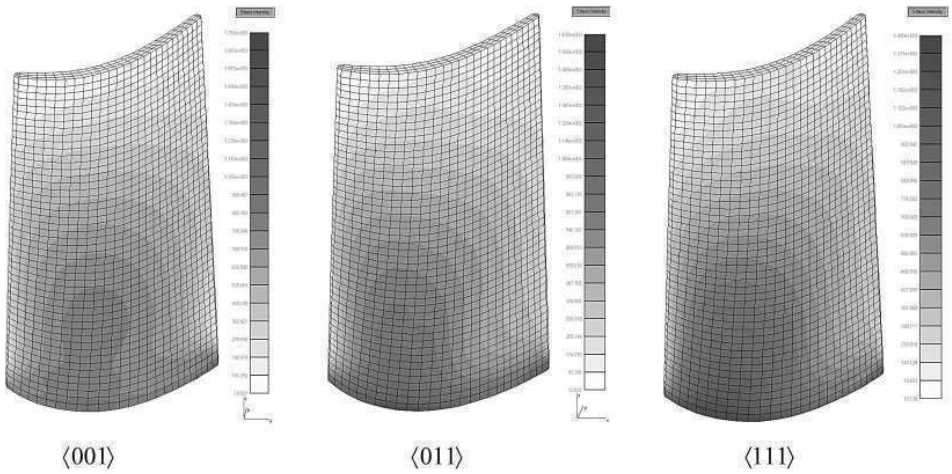


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений для монокристаллических лопаток различной ориентации

значительное влияние на ее НДС. Характер распределения и уровни интенсивности напряжений значительно различаются.

Анализ колебаний монокристаллических охлаждаемых лопаток газовых турбин

Современные тенденции совершенствования ГТД связаны с ростом параметров потока рабочего газа. Лопаточный аппарат при этом испытывает воздействие все более высоких интенсивностей динамических нагрузок и температурных полей, что вызывает необходимость использования рабочих лопаток газовых турбин из жаропрочных монокристаллических сплавов и с внутренним охлаждением. Первые ступени газовой турбины имеют охлаждаемые лопатки с аксиальной ориентацией монокристаллического материала [001]. Это связано с обеспечением их статической прочности в условиях высоких температур и их высоких градиентов. В таких лопатках локализация вибрационных напряжений часто возникает на внутренней поверхности охлаждаемых каналов и представляет большую опасность [20–24].

Большой интерес представляет анализ спектров собственных частот таких лопаток, их форм колебаний и распределения вибрационных напряжений, особенно локализации напряжений.

Без детального анализа вибрационных характеристик монокристаллических лопаток и особенностей распределения относительных напряжений с учетом геометрической формы, температурных полей, центробежных сил и ориентации монокристаллического материала невозможно сделать обоснованные выводы о выборе рациональных конструктивных параметров конкретных конструкций.

Рассматриваются особенности колебаний монокристаллической лопатки первой ступени со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждаемого воздуха. Матрица податливости такой системы представлена зависимостью (1). На рис. 6 показан общий вид лопатки и вихревой системы охлаждения.

Проведены исследования сходимости результатов для серии расчетных конечно-элементных моделей с различными уровнями дискретизации [26]. В связи со сложностью геометрической формы лопатки наиболее подходящими конечными

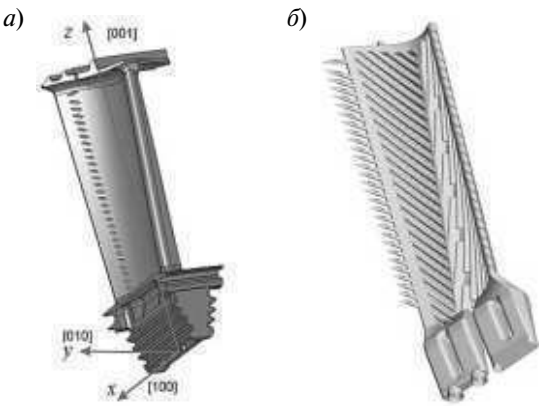


Рис. 6. Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических направлений (*а*) и ее система охлаждения в виде вихревой матрицы (*б*)

элементами оказались десятиузловые тетраэдры, учитывающие неоднородность материала.

Выбранная расчетная схема обеспечивает относительную ошибку в определении собственных частот порядка 1 % при 1,7 млн степеней свободы, а также достаточно ясную картину полей относительных напряжений с высокими их градиентами [23, 24]. Расчетная схема обеспечивает хорошее совпадение расчетных частот с известными экспериментальными данными (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения собственных частот колебаний лопатки из изотропного материала

Номер частоты	Форма колебаний	Значения частот, Гц	
		Расчетное	Экспериментальное
1	1-я изгибная	737,89	740–780
2	2-я изгибная	1712,5	–
3	1-я крутильная	2551,6	2545–2740
4	3-я изгибная	3789,5	–

Проведены исследования влияния отклонения КГО монокристаллического материала от первоначальной, совпадающей с глобальной системой координат лопатки (рис. 5) для первых 10 собственных частот. Для примера на рис. 7 показано влияние углов отклонения КГО на 6-ю собственную частоту. Показано, что наибольшее влияние на собственные частоты оказывает

отклонение аксиальной ориентации КГО. Причем максимальное влияние возникает при повороте КГО вокруг направления [010] и достигает 27°. Отклонения азимутальной ориентации КГО оказывает значительно меньшее влияние на собственные частоты лопатки. Эти результаты соответствуют данным, полученным в работах [20, 22] для монокристаллических лопаток с другими системами охлаждения.

Из результатов подобных исследований можно сделать вывод, что при изготовлении серии монокристаллических лопаток для ограничения разброса их собственных частот не более 10 % и с учетом других технологических отклонений следует обеспечить соблюдение аксиальной ориентации КГО с точностью до 10–15° [20–22]. Аксиальная КГО [001] должна находится в конусе с эллиптическим сечением параллельным плоскости *xy*, а углы отклонения КГО изменяются от 10 до 15°. Ограничения на отклонение азимутальной ориентации менее жесткие [21, 22].

Для жестких охлаждаемых лопаток повышение температуры вызывает снижение собственных частот более чем на 10 %. Повышение собственных частот таких лопаток под действием центробежных сил заметно меньше, и на рабочих режимах наблюдается снижение частот охлаждаемых лопаток.

Большой интерес представляют результаты анализа форм колебаний и распределение напряжений. Сложность геометрической формы охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток обусловливает и сложность форм их колебаний [23–25].

Наибольший интерес вызывает анализ распределения относительных интенсивностей напряжений. Примеры расположения зоны локализации относительных интенсивностей напряжений представлены на рис. 8–11. Результаты численных исследований показывают, что зоны локализации относительных напряжений расположены не только на поверхности лопаток, но и на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха (рис. 8 и 11). Это обстоятельство следует учитывать, так как возможно возникновение повреждений в зонах, недоступных визуальному контролю и тензометрическим исследованиям.

Они объясняют характер и места повреждений и разрушений лопаток, обнаруженные при лабораторных испытаниях лопаток на ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект» (рис. 8 и 11).

В работах [21, 22, 26] отмечалось, что в монокристаллических лопатках распространение магистральной трещины соответствует расположению КГО. Но также известно, что при соблюдении основных тенденций конкретное распространение ряда трещин носит более сложный характер.

Способы определения запасов прочности при термоциклическом нагружении лопаток из монокристаллических материалов

Оценка запасов циклической прочности лопаток может производиться двумя способами, отличающимися по точности и трудоемкости проведении расчетов.

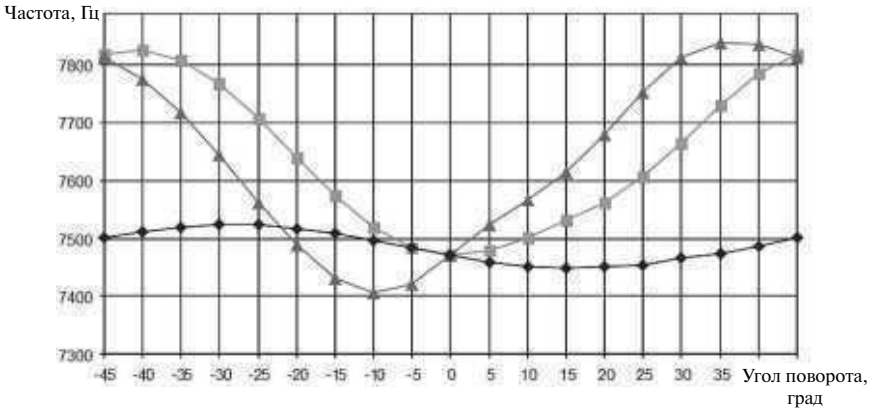


Рис. 7. Зависимость изменения шестой собственной частоты монокристаллической лопатки от угла поворота осей лопатки относительно направлений КГО монокристалла:
[100] (■), [010](▲), [001] (◆)

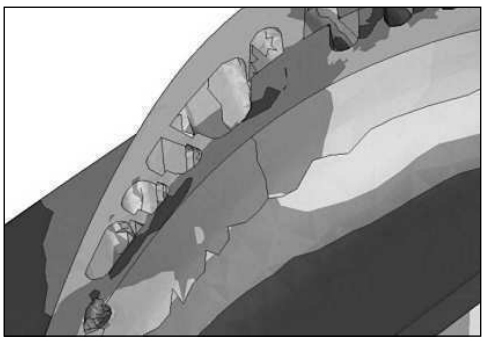


Рис. 8. Расчетные зоны локализации относительных напряжений при четвертой форме колебаний охлаждаемой лопатки

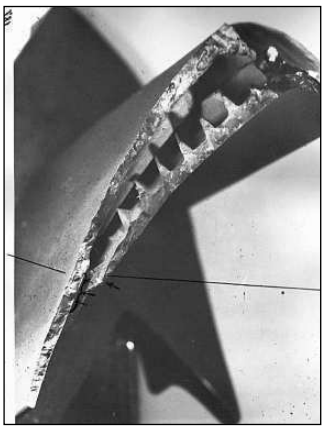
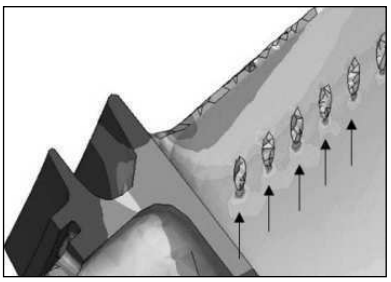


Рис. 9. Разрушение охлаждаемой лопатки при лабораторных испытаниях

а)



б)

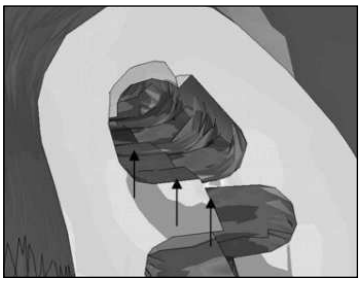


Рис. 10. Зоны локализации напряжений при первой ($а$ — f_1 = 633,2 Гц) и третьей ($б$ — f_3 = 2626 Гц) собственных формах колебаний лопатки

а)

б)

Рис. 11. Зоны зарождения трещин (*а*) и характерные разрушения лопатки (*б*), которые наблюдались при лабораторных исследованиях [31]

Согласно первой методике работоспособность монокристаллической лопатки в течение заданного циклического ресурса без образования в ней трещин МЦУ может быть оценена на основе использования коэффициента запаса по циклической долговечности

$$n_N = \frac{N_{R<001>}}{N}, \qquad (12)$$

где $N_{R<001>} = f\left(\Delta\varepsilon^p_{<001>}\right)$ — число циклов нагружения до разрушения образца из монокристаллического сплава в направлении <001> в условиях одноосного напряженного состояния; N — число циклов нагружения в течение заданного срока службы лопатки; $\Delta\varepsilon^p_{<001>}$ — эквивалентный размах деформаций в направлении $\langle 001\rangle$,

$$\Delta\varepsilon^p_{e<001>} =$$

$$= \left\{\frac{2}{9}\left[\left(\Delta\varepsilon^p_{11} - \Delta\varepsilon^p_{22}\right)^2 + \left(\Delta\varepsilon^p_{22} - \Delta\varepsilon^p_{33}\right)^2 + \left(\Delta\varepsilon^p_{33} - \Delta\varepsilon^p_{11}\right)^2\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{K_R}\left[\left(\Delta\gamma^p_{12}\right)^2 + \left(\Delta\gamma^p_{23}\right)^2 + \left(\Delta\gamma^p_{31}\right)^2\right]\right\}^{\frac{1}{2}}, \qquad (13)$$

где $\Delta\varepsilon^p_{11}$, $\Delta\varepsilon^p_{22}$, $\Delta\varepsilon^p_{33}$, $\Delta\varepsilon^p_{12} = \Delta\gamma^p_{12}/2$, $\Delta\varepsilon^p_{23} = \Delta\gamma^p_{23}/2$, $\Delta\varepsilon^p_{31} = \Delta\gamma^p_{31}/2$ — компоненты тензора размахов пластических деформаций; K_R — коэффициент анизотропии МЦУ монокристаллического сплава, который можно вычислить следующим образом:

$$K_R = 4\left(\frac{\Delta\varepsilon^p_{<001>}}{\Delta\varepsilon^p_{<011>}}\right)^2 - 1. \qquad (14)$$

Для приближенной оценки циклической долговечности при нестационарном циклическом нагружении принято следующее предположение: размахи напряжений и деформаций в каждом цикле нагружения одинаковы, а среднее напряжение в каждом последующем цикле нагружения изменяется в результате накопления деформаций ползучести на стационарных участках каждого цикла. Размах эквивалентных напряжений $\Delta\sigma_{eqv} = \text{const}$ и пластических деформаций $\Delta\varepsilon^p_{eqv} = \text{const}$ установившегося стабильного цикла определяется решением задачи циклической пластичности для монокристаллических сплавов на основе использования теории Хилла. Среднее эквивалентное напряжение в каждом i-м цикле определяется выражением $\sigma^{(i)}_{meqv} = \left(\sigma^{(i)}_{\max} + \sigma^{(i)}_{\min}\right)/2$.

Изменение среднего эквивалентного напряжения после каждого цикла нагружения равно изменению эквивалентного напряжения на стационарном участке с максимальной температурой газа в этом цикле, т. е. $\Delta\sigma^{(i)}_{meqv} \approx \Delta\sigma^{(i)}_{eqv}$. При этом предполагается, что на переходных режимах в каждом цикле, а также на участках остановки между циклами нагружения добавочные деформации ползучести не накапливаются.

В качестве доли циклической повреждаемости на каждом i-м цикле нестационарного циклического нагружения может быть использована величина: $D_{R_i} = 1/N^{(i)}_{\mathrm{Re}}$, где $N^{(i)}_{\mathrm{Re}} = f\left(\Delta\varepsilon^p_{eqv}, \Delta\sigma^{(i)}_{meqv}\right)$ — число циклов нагружения до разрушения монокристаллического сплава при заданном размахе эквивалентной пластической деформации (постоянная для каждого цикла) и заданном среднем эквивалентном напряжении, изменяющемся при переходе от цикла к циклу. Общая циклическая повреждаемость лопатки в течение циклического ресурса определяется формулой

$$D_R = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N^{(i)}_{\mathrm{Re}}}. \qquad (15)$$

Таким образом, для расчетного исследования малоцикловой усталости монокристаллической лопатки при нестационарном циклическом нагружении необходимо иметь экспериментальные данные о характеристиках МЦУ монокристаллического сплава при различной асимметрии цикла нагружения образцов в условиях одноосного напряженного состояния для различных КГО монокристалла.

При одновременном накоплении статических и циклических повреждений общее повреждение материала может быть оценено зависимостью

$$D = D_t + D_R, \qquad (16)$$

основанной на гипотезе линейного суммирования повреждений различной природы (длительной прочности $D_t = \int_0^{t^*} \frac{d\tau}{t_{\mathrm{Re}}(\tau)}$ и усталостных повреждений D_R).

Время до разрушения (t^*) может быть определено из условия

$$D = \int_0^{t^*} \frac{d\tau}{t_{\mathrm{Re}}(\tau)} + \sum_{i=1}^{N^*} \frac{1}{N_{\mathrm{Re}}^{(i)}} = 1, \qquad (17)$$

где $N^* = t^* / \Delta t$ — число циклов до разрушения; Δt — продолжительность цикла.

Пример определения времени до разрушения при одновременном накоплении статических и циклических повреждений для опасного сечения лопатки приведено по данным [3] на рис. 12.

Вторая методика основана на использовании деформационного критерия разрушения монокристаллических сплавов, предложенного в работе [19]:

$$D = D_1(\Delta\varepsilon_{eq}^p) + D_2(\Delta\varepsilon_{eq}^c) + D_3(\varepsilon_{eq}^p) + D_4(\varepsilon_{eq}^c) = 1. \qquad (18)$$

Введенный критерий (18) основывается на линейном суммировании повреждений, вызванных следующими причинами:

изменением пластической деформации в пределах цикла,

$$D_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(\Delta\varepsilon_{eq_i}^p)^k}{C_1(T_i)}; \qquad (19)$$

изменением деформации ползучести в пределах цикла,

$$D_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(\Delta\varepsilon_{eq_i}^c)^m}{C_2(T_i)}; \qquad (20)$$

односторонне накопленной пластической деформацией,

$$D_3 = \max_{0 \le t \le t_{\max}} \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p(T)}; \qquad (21)$$

односторонне накопленной деформацией ползучести,

$$D_4 = \max_{0 \le t \le t_{\max}} \frac{\varepsilon_{eq}^c}{\varepsilon_r^c(T)}. \qquad (22)$$

Здесь C_1, C_2, k, m, ε_r^p, ε_r^c — параметры материала, зависящие от температуры и КГО.

В качестве эквивалентной меры деформаций ε_{eq} в уравнении (18) для монокристаллических материалов могут рассматриваться различные нормы тензора деформаций:

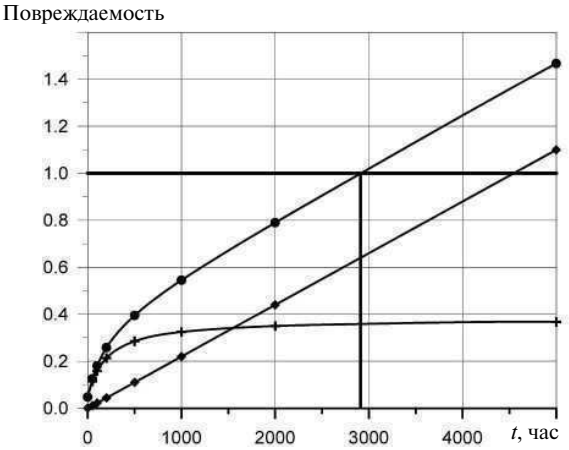


Рис. 12. Повреждаемость монокристаллической лопатки турбины:
+ — статическая (D_t); ◆ — циклическая (D_R); ● — полная (D)

максимальная сдвиговая деформация в системе скольжения с нормалью $\mathbf{n}_{\{111\}}$ к плоскости скольжения и направлением скольжения $\mathbf{l}_{\langle 011\rangle}$:

$$\varepsilon_{eq} = \mathbf{n}_{\{111\}} \varepsilon \mathbf{l}_{\langle 011\rangle}; \qquad (23)$$

максимальная главная деформация (максимальное собственное значение тензора деформаций)

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_1; \qquad (24)$$

интенсивность деформаций по Хиллу

$$\varepsilon_{eq} = \left\{ \frac{2}{9} \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{K_R} \left(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 \right) \right\}^{\frac{1}{2}}; \qquad (25)$$

максимальная деформация сдвига

$$\varepsilon_{eq} = \tfrac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3). \qquad (26)$$

Эквивалентная деформация (23) относится к кристаллографической моде разрушения, а эквивалентные деформации (24)–(26) — к некристаллографической моде.

Величины размахов деформаций в пределах цикла (определяющие D_1 и D_2) и односторонне накопленные деформации (определяющие D_3 и D_4) получают на основе расчетных кривых циклического деформирования (см. рис. 13). Результаты расчетов НДС плоских корсетных образцов ориентации <111> в условиях

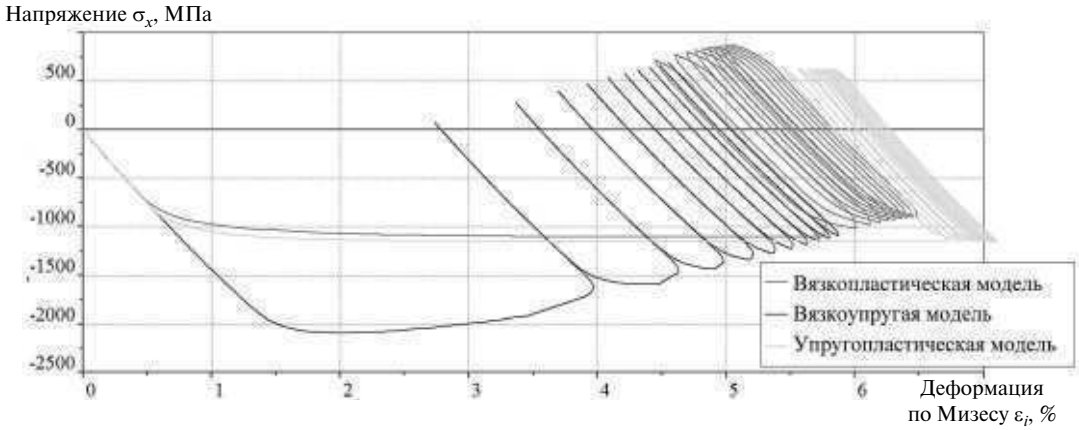


Рис. 13. Расчетные кривые циклического деформирования для вязкоупругой, упругопластической и вязкопластической моделей монокристаллического материала ЖС36

термоусталостного нагружения получены с использованием физических моделей пластичности и ползучести, учитывающих, что неупругое деформирование монокристалла происходит в соответствии с КГО двенадцати систем скольжения. При формулировке физических моделей пластичности учитывалось наличие нелинейного смешанного изотропно-кинематического упрочнения [27], а также латентного упрочнения. Результаты расчетов указали на необходимость учета пластического деформирования. Применение моделей вязкоупругости приводит к нереалистично завышенным уровням напряжений (см. рис. 13).

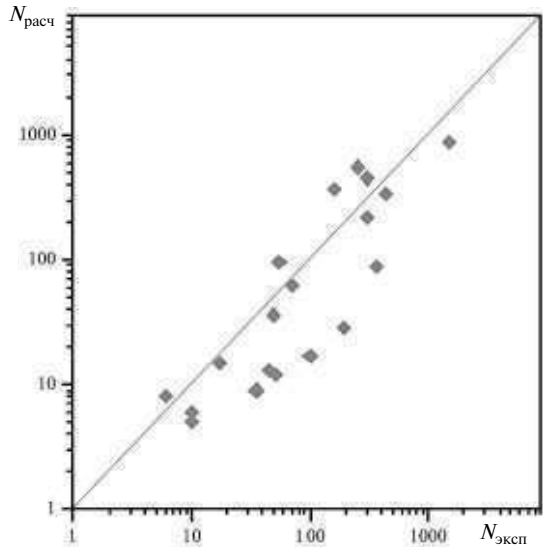


Рис. 14. Сопоставление расчетного числа циклов до образования магистральной трещины с использованием критерия (18) и результатов экспериментов

Проведено расчетное обоснование применимости критерия к испытанным на термическую усталость образцам из сплава ЖС36 с заданными аксиальной и азимутальной ориентациями [28]. Верификация методики расчета (рис. 14. и табл. 2) производилась с использованием различных неупругих моделей монокристалла применительно к результатам испытаний на термическую усталость образцов из сплава ЖС36 [28–30].

Видно, что расчетные и экспериментальные значения долговечности для гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений в испытаниях без выдержек и с выдержками находятся в приемлемой для использования в расчетах долговечности лопаток полосе разброса.

Рассмотрены основные положения методик определения прочности монокристаллических лопаток при статическом и термоциклическом нагружении. Показано, что использование деформационного критерия дает высокую точность прогноза числа циклов до образования магистральных трещин в монокристаллических сплавах при термоциклическом нагружении.

Для обеспечения требований к допустимому разбросу собственных частот монокристаллических лопаток при их изготовлении следует контролировать углы отклонения осей КГО.

Температура жестких охлаждаемых лопаток оказывает на собственные частоты большее влия-

Таблица 2

Сравнение результатов расчета долговечности с экспериментальными данными

Образец	Ориентация	T_{max}, °C	T_{min}, °C	ΔT, °C	Число циклов N до образования магистральной трещины		
					Расчет	Эксперимент	δ, %
1–1*c*	⟨111⟩	900	150	750	5	10	50
1–2	⟨111⟩	900	150	750	28	190	85
1–5*d*	⟨111⟩	900	150	750	36	50	28
1–6*c*	⟨111⟩	850	350	500	11	45	93
2–1	⟨011⟩	900	150	750	15	17	12
2–2	⟨011⟩	1000	500	500	444	300	15
2–4*c*	⟨011⟩	850	350	500	34	210	84
2–6*c*	⟨011⟩	1000	500	500	61	10–130	13
3–0	⟨011⟩	900	150	750	17	100	83
3–1	⟨011⟩	950	200	750	12	52	77
3–2	⟨011⟩	1000	250	750	9	35	74
3–3	⟨011⟩	1000	500	500	550	250	120
3–4	⟨011⟩	1050	550	500	365	160	128
3–5	⟨011⟩	950	450	500	866	1500	42
4–1*c*	⟨011⟩	900	150	750	6	10	40
4–2	⟨011⟩	950	450	500	24	160	85
4–5	⟨011⟩	950	450	500	86	360	76
4–6*d*	⟨011⟩	900	150	750	8	6	33
5–1	⟨001⟩	900	150	750	338	435	22
5–2	⟨001⟩	1000	250	750	94	55	71
5–3	⟨001⟩	1000	500	500	218	305	29

ние, чем центробежные силы; на рабочих режимах собственные частоты таких лопаток снижаются.

Следует учитывать опасность возникновения зон локализации и повышения относительных вибрационных напряжений на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха, что ведет к повреждениям в местах, недоступных для визуального контроля.

В зависимости от режима термомеханического воздействия при распространении магистральных трещин наблюдается как кристаллографическая, так и некристаллографическая мода разрушения. В первом случае рост трещины происходит в плоскостях {111} , а во втором — определяется напряженным состоянием лопатки с трещиной и может иметь достаточно сложный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев, Ю.С.** Проблемы вибрационного состояния фундаментов, сейсмостойкости и прочности турбомашин. Часть 1 [Текст] / Ю.С. Воробьев, Л.Б. Гецов, Б.Е. Мельников, А.С. Семенов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 3(178).— С. 279–286.

2. **Шалин, Р.Е.** Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов [и др.].— М.: Машиностроение, 1997.— 333 с.

3. **Гецов, Л.Б.** Расчетное определение ресурса рабочих и направляющих лопаток ГТУ. Часть 2. Монокристаллические материалы [Текст] / Л.Б. Гецов, В.Е. Михайлов, А.С. Семенов [и др.] // Газотурбинные технологии.— 2011. №8.— С. 18–25.

4. **Getsov, L.** A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading [Text] / L. Getsov, A. Semenov, A. Staroselsky // Materiali in Tehnologije.— 2008. Vol. 42, №1.— P. 3–12.

5. **Semenov, A.** Computer simulation of fatigue, creep and thermal-fatigue cracks propagation in gas-turbine blades [Text] / A. Semenov, S. Semenov, A. Nazarenko, L. Getsov // Materiali in Tehnologije.— 2012. Vol. 46, № 3.— С. 197–203.

6. **Гецов, Л.Б.** Особенности расчетного определения статической и термоциклической прочности охлаждаемых лопаток ГТУ [Текст] / Л.Б. Гецов, В.В. Кривоносова, Б.З. Марголин, О.В. Романова, А.С. Семенов // Тяжелое машиностроение.— 2013. № 3.— С. 11–21.

7. **Bahr, H.A.** Cracks in functionally graded materials [Text] / H.A. Bahr, H. Balke, T. Fett [et all.] // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 362, № 1–2.— P. 2–16.

8. **Semenov, A.S.** Contact-driven delamination and spalling of coatings due to cyclic shock heating [Text] / A.S. Semenov, H.A. Bahr, H. Balke, H.J. Weiss // Thin Solid Films.— 2005. Vol. 471, № 1–2.— P. 200–208.

9. **Назаренко, А.А.** Анализ кинетики роста трещин усталости, ползучести и термоусталости в лопатках ГТУ [Текст] / А.А. Назаренко, С.Г. Семёнов, А.С. Семёнов, Л.Б. Гецов // Морские интеллектуальные технологии.— 2011. №3.— С. 90–93.

10. **Hill, R.** A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals [Text] / R. Hill // Proc. Royal Society of London, Ser. A.— 1948. Vol. 193.— P. 281–297.

11. **Swanson, G.A.** Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials [Text] / G.A. Swanson, R.C. Bill // AIAA-85–1421.— 1985.

12. **Nozhnitsky, Yu.A.** Damage mechanisms for thermomechanical fatigue of aircraft engines materials [Text] / Yu.A. Nozhnitsky, R.A. Doulnev, V.G. Soundyrin // AGARD Conference Procidings 1996. Ess. 569.

13. **Магеррамова, Л.А.** Выбор модели анизотропии сплава для прочностных расчетов монокристаллических лопаток турбин газотурбинного двигателя с помощью современных программных комплексов [Текст] / Л.А. Магеррамова, Б.Е. Васильев // В кн.: Совр. методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей.— Труды ЦИАМ. № 1344.— М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010.— С. 341–350.

14. **Фокин, Д.Ю.** Влияние анизотропии и ползучести материала на НДС лопаток газовой турбины [Текст] / Д.Ю. Фокин, Л.Б. Гецов, А.С. Семенов, Б.Е. Мельников // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. Вып. 9 / Под ред. Е.П. Колпака.— СПб: Изд-во СПбГУ, 2005.— С. 22–36.

15. **Семенов, А.С.** PANTOCRATOR— конечно-элементный программный комплекс, ориентированный на решение нелинейных задач механики [Текст] / А.С. Семенов // Труды V-й Междунар. конф. «Научно-технические проблемы прогнозирования и долговечности конструкций и методы их решения».— С.-Петербург. 14–17 октября 2003.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— С. 466–480.

16. **Тихомирова, Е.А.** Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллического сплава для лопаток ГТД [Текст] / Е.А. Тихомирова, Л.Б. Гецов, А.С. Семенов, А.А. Наумов // Неделя науки СПбГПУ. Инженерно-строительный факультет.— СПб.: Изд-во СпбГПУ, 2012.— С.439–440.

17. **Магеррамова, Л.А.** Влияние азимутальной ориентации в монокристаллических лопатках высокотемпературных газовых турбин на их напряженно-деформированное состояние и прочность [Текст] / Л.А. Магеррамова, Б.Е. Васильев // Вестник УГАТУ.— 2011.— С. 54–58.

18. **Cailletaud, G.A.** Micromechanical Approach to Inelastic Behaviour of Metals [Text] / G.A. Cailletaud // Int. J. Plast.— 1991. Vol. 8.— P. 55–73.

19. **Гецов, Л.Б.** Критерии разрушения поликристаллических и монокристаллических материалов при термоциклическом нагружении [Текст] / Л.Б. Гецов, А.С. Семенов // Труды ЦКТИ.— 2009. Вып. 296.— С. 83–91.

20. **Придорожный, Р.П.** Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин [Текст] / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.П. Зиньковский // Вестник двигателестроения.— 2006. №2.— С. 42–48.

21. **Мельникова, Г.В.** Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток [Текст] / Г.В. Мельникова, Б.Ф. Шорр // Авиационно-космическая техника и технология.— 2001. №26.— С. 140–144.

22. **Ножницкий, Ю.А.** О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования.— Труды ЦКТИ.— Вып. 296.— СПб., 2009.— С. 74–82.

23. **Воробьев, Ю.С.** Анализ локализации напряжений при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко, М.А. Чугай // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования.— Труды ЦКТИ. Вып. 296.— СПб., 2009.— С. 282–306.

24. **Vorobyov, Yu.S.** Vibration stress localization in turbomachine blading [Текст] / Yu.S. Vorobyov, V.N. Romanenko, M.A. Storozhenko, O.V. Tyshkovets, K.Yu. Dyakonenko // Proceedings of the 3rd Korea-Ukraine Gas Turbine Technology Symposium (Korea Institute of Machinery & Materials), 1–9.– Korea, Daejeon, 20–23 November 2006.

25. **Воробьев, Ю.С.** Анализ локализации напряжений при колебаниях рабочих колес и охлаждаемых лопаток ГТД [Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // Вестник НТУ «ХПИ».— 2008. №35— С. 29–43.

26. **Воробьев, Ю.С.** Особенности распределения вибрационных напряжений в монокристаллических лопатках с повреждениями [Текст] / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай // Авиационно-космическая техника и технология.— 2011. №10(87).— С. 123–126.

27. **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. № 53.— С. 85–92.

28. **Гецов, Л.Б.** Сопротивление термической усталости монокристаллического сплава [Текст] / Л.Б. Гецов, Н.И. Добина, А.И. Рыбников, А.С. Семенов [и др.]// Проблемы прочности.— 2008. №5.— С. 54–71.

29. **Гецов, Л.Б.** Сопротивление термической усталости жаропрочных сплавов [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, А.С. Семенов // Теплоэнергетика.— 2009. № 5.— С. 51–58.

30. **Гецов, Л.Б.** Сопротивление деформированию и разрушению монокристаллических сплавов при статическом и термоциклическом нагружении [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, А.С. Семенов [и др.] // Надежность и безопасность энергетики.— 2012. № 18.— С. 53–62.

31. **Vorobiov Yu.S.** Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades [Text] / Yu.S. Vorobiov, K.Iu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N.Skritskij, R.Rzadkowski // VETOMAC VIII Int. Conf. in Vibration Eng. and Technology of Machinary.— Gdansk,Poland.— 2012.— P. 1–8.

REFERENCES

1. **Vorobiev Yu.S., Getsov L.B., Melnikov B.Ye., Semenov A.S.** Problemy vibratsionnogo sostoyaniya fundamentov, seysmo-stoykosti i prochnosti turbomashin. Chast 1 [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2013. № 3(178).— S. 279–286. (rus.)

2. **Shalin R.Ye., Svetlov I.L., Kachanov Ye.B. [i dr.].** Monokristally nikelevykh zharoprochnykh splavov [Tekst]. Mosk-va: «Mashinostroyeniye», 1997.— 333 s. (rus.)

3. **Getsov L.B., Mikhaylov V.Ye., Semenov A.S. [i dr.].** Raschetnoye opredeleniye resursa rabochikh i napravlyayushchikh lopatok GTU. Chast 2 [Tekst] // Monokristallicheskiye materialy. Gazoturbinnyye tekhnologii.— 2011. №8.— S. 18–25. (rus.)

4. **Getsov L., Semenov A., Staroselsky A.** A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading [Tekst] // Materiali in Tehnologije.— 2008. Vol. 42, №1.— P. 3–12.

5. **Semenov A., Semenov S., Nazarenko A., Getsov L.** Computer simulation of fatigue, creep and thermal-fatigue cracks propagation in gas-turbine blades [Tekst] // Materiali in Tehnologije.— 2012. Vol. 46, № 3.— C. 197–203. (rus.)

6. **Getsov L.B., Krivonosova V.V., Margolin B.Z., Romanova O.V., Semenov A.S.** Osobennosti raschetnogo opredeleniya staticheskoy i termotsiklicheskoy prochnosti okhlazhdayemykh lopatok GTU [Tekst] // Tyazheloye mashinostroyeniye.— 2013. № 3.— S. 11–21. (rus.)

7. **Bahr H.A., Balke H., Fett T. [et all.].** Cracks in functionally graded materials [Text] // Materials Science and Engineering: A.— 2003. Vol. 362, № 1–2.— P. 2–16.

8. **Semenov A.S., Bahr H.A., Balke H., Weiss H.J.** Contact-driven delamination and spalling of coatings due to cyclic shock heating [Tekst] // Thin Solid Films.— 2005. Vol. 471, № 1–2.— P. 200–208. (rus.)

9. **Nazarenko A.A., Semenov S.G., Semenov A.S., Getsov L.B.** Analiz kinetiki rosta treshchin ustalosti, polzuchesti i termoustalosti v lopatkakh GTU [Tekst] // Morskiye intellektualnyye tekhnologii.— 2011. №3.— S. 90–93. (rus.)

10. **Hill R.** A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals [Tekst] // Proc. Royal Society of London, Ser. A.— 1948. Vol. 193. P. 281–297. (rus.)

11. **Swanson G.A., Bill R.C.** Life prediction and constitutive models for engine hot section anisotropic materials [Text] // AIAA.— 1985. Vol. 85.— S. 1421.

12. **Nozhnitsky Yu.A., Doulnev R.A., Soundyrin V.G.** Damage mechanisms for thermomechanical fatigue of aircraft engines materials [Tekst].— AGARD Conference Procidings. 1996.— S. 569.

13. **Magerramova L.A., Vasilyev B.Ye.** Vybor modeli anizotropii splava dlya prochnostnykh raschetov monokristallicheskikh lopatok turbin gazoturbinnogo dvigatelya s pomoshchyu sovremennykh programmnykh kompleksov [Tekst].— V kn.: «Sovr. metody obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley». Trudy TsIAM. № 1344.— M.: Torus press, 2010.— S. 341–350. (rus.)

14. **Fokin D.Yu., Getsov L.B., Semenov A.S., Melnikov B.Ye.** Vliyaniye anizotropii i polzuchesti materiala na NDS lopatok gazovoy turbiny [Tekst].— V kn.: «Nelineynyye problemy mekhaniki i fiziki deformiruyemogo tverdogo tela» / pod red. Ye. P. Kolpaka.— SPb: Izd-vo SPbGU, 2005.— Vyp. 9.— S. 22–36. (rus.)

15. **Semenov A.S.** PANTOCRATOR— konechno-elementnyy programmnyy kompleks, oriyentirovannyy na resheniye nelineynykh zadach mekhaniki [Tekst].— Trudy V Mezhdunarodnoy konferentsii «Nauchno-tekhnicheskiye problemy prognozirovaniya i dolgovechnosti konstruktsiy i metody ikh resheniya». S.-Peterburg. 14–17 oktyabrya 2003.— SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.— S. 466–480. (rus.)

16. **Tikhomirova Ye.A., Getsov L.B., Semenov A.S., Naumov A.A.** Soprotivleniye deformirovaniyu i razrusheniyu monokristallicheskogo splava dlya lopatok GTD [Tekst].— «Nedelya nauki SPbGPU. Inzhenerno-stroitelnyy fakultet».— 2012.— S.439–440. (rus.)

17. **Magerramova L.A., Vasilyev B.Ye.** Vliyaniye azimutalnoy oriyentatsii v monokristallicheskikh lopatkakh vysoko-temperaturnykh gazovykh turbin na ikh napryazhenno-deformi-rovannoye sostoyaniye i prochnost [Tekst] // Vestnik UGATU.— 2011.— S. 54–58. (rus.)

18. **Cailletaud G.A.** Micromechanical Approach to Inelastic Behaviour of Metals [Tekst] // Int. J. Plast.— 1991. Vol. 8.— P. 55 73.

19. **Getsov L.B., Semenov A.S.** Kriterii razrusheniya polikristal¬licheskikh i monokristallicheskikh materialov pri termotsik¬licheskom nagruzhenii [Tekst] // Trudy TsKTI.— 2009. Vyp. 296.— S. 83–91. (rus.)

20. **Pridorozhnyy R.P., Sheremetyev A.V., Zinkovskiy A.P.** Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii na spektr sobstvennykh chastot i form kolebaniy monokristallicheskikh rabochikh lopatok turbin [Tekst] // Vestnik dvigatelestroyeniya.— 2006. №2.— S.42–48. (rus.)

21. **Melnikova G.V., Shorr B.F.** Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii monokristalla i yeye tekhnologicheskogo razbrosa na chastotnyy spektr turbinnykh lopatok [Tekst] / Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya.— 2001. №26.— S. 140–144. (rus.)

22. **Nozhnitskiy Yu.A., Golubovskiy Ye.R.** O prochnostnoy nadezhnosti monokristallicheskikh rabochikh lopatok vysokotemperaturnykh turbin perspektivnykh GTD [Tekst] // «Prochnost materialov i resurs elementov energooborudovaniya». Trudy TsKTI.— SPb.— 2009. Vyp. 296.— S. 74–82. (rus.)

23. **Vorobiov Yu.S., Dyakonenko K.Yu., Romanenko V.N., Chugay M.A.** Analiz lokalizatsii napryazheniy pri kolebaniyakh lopatochnogo apparata turbomashin [Tekst] // «Prochnost materialov i resurs elementov energooborudovaniya». Trudy TsKTI.— SPb, 2009. Vyp. 296.— S. 282–306. (rus.)

24. **Vorobiov Yu.S., Romanenko V.N., Storozhenko M.A., Tyshkovets O.V., Dyakonenko K.Yu.** Vibration stress localization in turbomachine blading [Text] // Proceedings of the 3rd Korea-Ukraine Gas Turbine Technology Symposium (Korea Institute of Machinery & Materials), 1–9.– Korea, Daejeon, 20–23 November 2006.

25. **Vorobiov Yu.S., Dyakonenko K.Yu., Kulishov S.B., Skritskiy A.N.** Analiz lokalizatsii napryazheniy pri kolebaniyakh rabochikh koles i okhlazhdayemykh lopatok GTD [Tekst] // Vestnik NTU «KhPI».— 2008.№35— S. 29–43. (rus.)

26. **Vorobiov Yu.S., Chugay M.A.** Osobennosti raspredeleniya vibratsionnykh napryazheniy v monokristallicheskikh lopatkakh s povrezhdeniyami [Tekst] // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011.— №10(87).— S. 123–126. (rus.)

27. **Melnikov B.Ye., Semenov A.S., Semenov S.G.** Mnogomodelnyy analiz uprugoplasticheskogo deformirovaniya materialov i konstruktsiy. sovremennoye sostoyaniye [Tekst] // Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova.— 2010. № 53.— S. 85–92. (rus.)

28. **Getsov L.B, Dobina N.I., Rybnikov A.I., Semenov A.S., Staroselskiy A.A., Tumanov N.V.** Soprotivleniye termicheskoy ustalosti monokristallicheskogo splava[Tekst] // Problemy prochnosti.— №5, 2008.— S. 54–71. (rus.)

29. **Getsov L.B., Rybnikov A.I., Semenov A.S.** Soprotivleniye termicheskoy ustalosti zharoprochnykh splavov [Tekst] // Teploenergetika.— 2009. № 5.— S. 51–58. (rus.)

30. **Getsov L.B., Rybnikov A.I., Semenov A.C., Grigoryev A.V., Tikhomirova Ye.A.** Soprotivleniye deformirovaniyu i razrusheniyu monokristallicheskikh splavov pri staticheskom i termotsiklicheskom nagruzhenii [Tekst] // Nadezhnost i bezopasnost energetiki.— 2012. № 18.— S. 53–62. (rus.)

31. **Vorobiov Yu.S., Dyakonenko K.Yu., Kulishov S.B., Skritskij A.N., Rzadkowski R.** Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades [Tekst] // VETOMAC VIII. Int Conference in Vibration. Eng. and Technology of Machinary.— Gdansk, Poland.— 2012.— P. 1–8.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОРОБЬЕВ Юрий Сергеевич, — доктор технических наук профессор заведующий отделом нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины; 61046, ул.Дм. Пожарского, 2/10, Харьков, Украина; e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

ГЕЦОВ Леонид Борисович, — доктор технических наук профессор кафедры сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail:guetsov@yahoo.com

МЕЛЬНИКОВ Борис Евгеньевич, — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой сопротивления материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kafedra@ksm.spbstu.ru

СЕМЕНОВ Артем Семенович, — кандидат физико-математических наук доцент кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Semenov.Artem@googlemail.com

AUTHORS

VOROBIOV Yurii S, — National Ukrainian Academy of Sciences, Institute of Machinery Problems; Dm.Pozharskyj st., 2/10 Kharkov 61046, Ukraine; e-mail:

vorobiev@ipmach.kharkov.ua

GETSOV Leonid B. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: guetsov@yahoo.com

MELNIKOV Boris E. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kafedra@ksm.spbstu.ru

SEMENOV Artem S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Semenov.Artem@googlemail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.1.016:536.2

Л.В. Зысин, Л.П. Стешенков

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

L.V. Zyssin, L.P. Steshenkov

FEATURES OF HEAT EXCHANGE DURING FORCED CONVECTION OF MICROBIOLOGICAL FLUIDS

Обсуждаются результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена при вынужденном течении в вертикальных трубах и плоско-параллельных каналах микробиологических сред (культуральные жидкости, нейтрализаты, гидролизаты, полиглюкины и др.). Отмечаются характерные особенности теплообмена указанных сред в ламинарной, переходной и турбулентной областях течения.

ТЕПЛООБМЕН. КОНВЕКЦИЯ. ВЫНУЖДЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ. ЛАМИНАРНЫЙ. ТУРБУЛЕНТНЫЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Results of an experimental investigation of convective heat exchange during forced flow of microbiological fluids (cultural fluids, polyglucan and others) inside vertical pipes and flat-parallel channels are given and discussed. Typical features of heat exchange of such fluids for laminar, transition and turbulent parts of flow are shown.

HEAT EXCHANGE. CONVECTION. FORSE FLOW. LAMINAR. TURBULENCE. EXPERIMENTAL RESEARCH.

Современный этап развития теплофизики тесно связан с решением прикладных задач инновационных технологий. Решая на основе фундаментальных исследований практические задачи создания теоретических основ инженерных методов расчета новых видов энерготехнологического и теплоиспользующего оборудования, теплофизика постоянно обогащается за счет изучения новых сред, теплоносителей, расширения диапазонов режимных параметров и др. В последние десятилетия в мире ускоренными темпами развивается биотехнология, для которой характерна значительная доля теплоиспользующего оборудования и энергоемкость производства. Поэтому промышленное освоение процессов биосинтеза ввело в круг актуальных для теплофизики прикладных задач изучение теплообмена в биологических и микробиологических средах [1].

Микробиологическая технология базируется на закономерностях, свойственных популяциям микроорганизмов, как получаемых в промышленных условиях, так и существующих в реальных живых организмах. При этом биологическая форма движения материи с присущим ей многообразием определила ряд специфических особенностей микробиологических сред (биомасса, культуральные жидкости, продукты метаболизма клеток и др.): вариабельность и многокомпонентность, низкие концентрации и скорости реакций, переменность в ходе процесса реологических свойств, проявление у белков одновременно свойств аморфных электролитов и коллоидных растворов, а также многое другое [2].

Для создания методов расчета и оптимизации параметров технологического оборудования требуются достоверные сведения о процессах теплообмена, такие данные необходимы и для расчетов биофизических процессов внутри организмов. Построение обоснованных физических моделей соответствующих процессов невозможно без определенного набора первичной экспериментальной информации, которая позволила бы понять место рассматриваемых сред в теплофизике.

Одновременно такая информация открывает возможности выполнения необходимых инженерных расчетов. То обстоятельство, что практически все микробиологические среды являются слабо концентрированными водными растворами, дает основания предположить сходный характер процессов конвективного теплообмена с однокомпонентными средами и искать решение в данном направлении.Ниже приводятся некоторые результаты обобщения данных экспериментальных исследований теплообмена при вынужденной конвекции ряда микробиологических сред. Опыты проводились на вертикальном плоско-параллельном канале и трубах, имеющих эквивалентный диаметр 12–32 мм, длину 1000–6000 мм и снабженных предвключенным участком гидродинамической стабилизации. Предварительные опыты по определению потерь давления по длине канала и тенеграммы течения жидкости, полученные на плоско-параллельном канале, подтвердили, что протяженность $l_т$ участка гидравлической стабилизации при числе Прандтля $Pr > 1$ была короче, чем протяженность $l_г$ области тепловой стабилизации, что согласуется с данными многочисленных исследований. Тепловой поток создавался с помощью электрического тока. В опытах на трубе диаметром 32 мм и длиной 6000 мм тепловой поток создавался с помощью парового обогрева. Максимальная скорость исследуемых жидкостей в каналах составляла 3,5 м/с. Тестирование экспериментальных установок производилось с помощью опытов на воде, которые дали хорошую сходимость с известными зависимостями.

Исследовались следующие культуральные жидкости: дрожжевая суспензия и суспензия БВК при концентрациях C в диапазоне 2,5–20 %; отработанная культуральная жидкость (ПДБ) с концентрациями 1–15 %; остальные среды при фиксированных значениях концентрации, соответствующих технологическим условиям. Кроме того, были исследованы водные растворы полиглюкина (заменитель крови) при $C = 0{,}1–10$ % и глюкозы при $C = 2–25$ %. Влияние окислительно-восстановительной среды на теплообмен определялось для диапазона $pH = 1–4{,}5$. Тепловая нагрузка в опытах варьировалась в диапазоне $q = 50–200$ кВт/м^2, массовая скорость — $\rho W = 100–2500$ кг/(м^2·с), температура жидкости — $t_ж = 20–95$ °С, давление — близкое к атмосферному. Кратко результаты опытов сводятся к следующему.

Закономерности теплообмена изучались для условий стабилизированного течения в турбулентной и переходной областях течения. Для ряда жидкостей были рассмотрены также особенности теплообмена в ламинарной области течения. Остановимся на основных результатах проведенного исследования.

Ламинарный режим течения. При обобщении экспериментальных данных по теплоотдаче на участке тепловой стабилизации при ламинарном течении и вязкостном режиме теплообмена ($Gr \cdot Pr < 250$) за основу было принято известное интерполяционное уравнение, которое для плоского канала и условий $q_x = \text{const}$ принимает вид

$$Nu \approx 1{,}3\left(Pe\, d/l\right)^{1/3}\left(\mu/\mu_w\right)^m \qquad (1)$$

и, как известно, с точностью ±4 % описывает точное решение. Показатель степени m при симплексе μ/μ_w, учитывающем влияние на теплообмен переменной вязкости, для случая подъемного движения жидкости соответствует величине $m \approx 0{,}14$. Принятый подход позволил обобщить экспериментальные данные с точностью до коэффициента, при этом была подтверждена степенная зависимость

$$Nu \sim \left(Pe\, d/l\right)^{1/3}. \qquad (2)$$

Обобщение опытных данных по дрожжевым суспензиям позволило получить значение коэффициента пропорциональности в формуле (1) равное 2,3; для гидролизатов получено несколько иное значение, а именно 2,1. Погрешность аппроксимации в данном случае лежит в пределах +50 %. Естественно было предположить, что столь существенное расхождение связано с проявлением реологических свойств рассматриваемых сред. В обзоре Е.М. Хабахпашевой [3] отмечается, что для учета изменения вязкости неньютоновских жидкостей, обусловленного наличием радиальных температурных градиентов, обычно пользуются приближенными методами, которые представляют собой обобщения известных степенных поправок, хотя в общем случае для течения структурно-вязких жидкостей следует учитывать влияние на теплообмен не только соотношения вязкостей, но и величины $l/(Pe\, d)$.

Основываясь на указанных положениях, мы стремились добиться удовлетворительного обобщения экспериментальных данных, ограничиваясь только уточнением степенной поправки, поскольку для исследуемых сред с помощью принятых методов измерения не удавалось определить градиенты скорости у стенки. Соответственно не мог быть вычислен коэффициент χ, учитывающий структурно-вязкие свойства. Поэтому в качестве параметра был сохранен симплекс $(\mu/\mu_w)^m$, а на его основе в результате обобщения опытных данных получена уточненная зависимость

$$\mathrm{Nu} \approx 1{,}3(\mathrm{Pe}\,d/l)^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0{,}25}, \qquad (3)$$

аппроксимирующая опытные данные с погрешностью ±12 %. При этом коэффициент теплоотдачи для дрожжевых суспензий получен примерно на 15 % выше, чем для ньютоновских сред при тех же значениях $\mu/\mu_ж$. Сопоставление наших результатов с данными, приведенными в обзоре [3], позволяет предположить, что рассматриваемые среды следует отнести к жидкостям с линейным или квадратичным законом текучести. Окончательный ответ на данный вопрос можно получить только в результате детального изучения реологических свойств микробиологических сред, что должно стать предметом дальнейшего достаточно углубленного исследования.

Переходный режим течения. Вопросы теплоотдачи в переходной области течения для жидкостей, проявляющих неньютоновские свойства, до настоящего времени изучены мало. Отмечается [3], что наличие структурной вязкости вызывают затягивание перехода к турбулентному режиму течения. Наши экспериментальные данные также указывают на некоторое затягивание перехода, при этом был отмечен ряд закономерностей.

При фиксированном значении чисел Прандтля теплоотдача Nu характеризуется серией кривых, имеющих общую область пропорциональности числу $\mathrm{Re}^{1,34}$. С погрешностью ±10 % можно утверждать, что коэффициент пропорциональности является функцией числа Pr и аппроксимируется соотношением

$$\frac{\mathrm{Nu}}{\mathrm{Re}^{1,34}} = 1{,}64\cdot 10^{-4}\,\mathrm{Pr}^{1,1}. \qquad (4)$$

Поскольку для обобщения был приняты только данные, соответствующие вязкостному и вязко-инерционному режимам течения, диапазон изменения $\mu/\mu_ж$ в опытах был невелик. Поэтому данные удалось обобщить, не вводя параметр $(\mu/\mu_ж)^{0{,}25}$. Однако в общем случае он, очевидно, должен быть введен в формулу (4). Таким образом, формула для расчета интенсивности теплоотдачи в трубах и каналах для переходной области течения культуральных жидкостей была получена в виде

$$\mathrm{Nu}_{\text{пер}} = 1{,}64\cdot 10^{4}\,\mathrm{Pr}^{1,1}\,\mathrm{Re}^{1,34}. \qquad (5)$$

Максимальное отклонение экспериментальных данных от зависимости (5) не превышает ±15 %, что для переходной области (которая вообще характеризуется нестабильностью течения и пульсациями параметров) можно признать удовлетворительной точностью. Анализ результатов опытов показал также, что области, описываемой формулой (5), предшествует некоторая область неустойчивого теплообмена, где значения Nu выше числа Nu_∞, определенного для ламинарной области. При этом было установлено, что для плазмолизованных дрожжевых суспензий при Pr = 7–120 минимальные значения чисел Nu и Re, соответствующие началу указанной выше устойчивой переходной области течения, подчиняется соответственно зависимостям

$$\mathrm{Nu}_{\text{н}}^{\text{пер}} = 4{,}9\,\mathrm{Pr}^{0{,}5}; \qquad (6)$$

$$\mathrm{Re}_{\text{н}}^{\text{пер}} = 2\cdot 103\,\mathrm{Pr}^{-0{,}6}. \qquad (7)$$

Интересно, что при Pr = 0,72 (воздух) формула (6) дает хорошо известное теоретическое решение $\mathrm{Nu}_\infty \approx 4{,}36$, а формула (7) — также хорошо опробованное значение $\mathrm{Re}_{\text{кр}} \approx 2300$.

Отмеченная выше зависимость потери устойчивости от числа Прандтля согласуется с данными А.А. Жукаускаса и А.А. Шлянчаускаса [4], которые справедливо отмечают, что такой характер зависимостей можно объяснить тем, что при больших значениях числа Прандтля тепловой пограничный слой значительно утоняется по сравнению с динамическим. В результате имеющие место в пристенной области малые возмущения начинают играть относительно большую роль в процессе перехода и ускоряют его начало.

Турбулентный режим течения. Как уже отмечалось, основная часть наших исследований относилась к турбулентной области течения как

наиболее типичной для технологического оборудования. Опытные данные по теплоотдаче при турбулентном течении капельных жидкостей (и газов) в трубах и каналах, как известно, хорошо аппроксимируются соотношением

$$\mathrm{Nu} = A\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{n}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0,25}. \qquad (8)$$

При этом известно, что в зависимости от направления теплового потока, числа Pr, условий эксперимента и т. п. получаемые в экспериментах значения A и n в этой формуле колеблются в следующих пределах: $A = 0{,}021$–$0{,}026$; $n = 0{,}3$–$0{,}6$. Тестовые опыты, проведенные нами на воде, с погрешностью ±10 % подтвердили классические значения: $A = 0{,}023$; $n = 0{,}4$. Поэтому при обработке и анализе результатов последующих опытов на других жидкостях искалась зависимость вида

$$\mathrm{Nu} = k\,0{,}023\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{0,4}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0,25}, \qquad (9)$$

где k — коэффициент, учитывающий индивидуальные свойства жидкости.

Резюмируя результаты проведенных исследований, отметим, что они подтвердили возможность пользоваться указанным подходом в целом ряде случаев, однако не для всех исследованных жидкостей.

Так для *культуральных жидкостей* типа ПДБ с погрешностью ±15 % опытные данные обобщаются с помощью зависимости (9) при $k = 1$. Для *дрожжевых суспензий* с аналогичной погрешностью получено значение $k = 1{,}216$. В ряде работ указывается [3], что расчеты коэффициентов теплообмена для нелинейно-вязких жидкостей можно производить по формулам для ньютоновских жидкостей, если вычислять значения чисел Re и Pr по величине вязкости на стенке. Такая обработка была произведена нами для дрожжевых суспензий. Погрешность аппроксимации при этом увеличилась до ±25 %, поэтому в дальнейшем от подобной обработки пришлось отказаться.

Самостоятельную группу составили *гидролизаты* и *нейтрализаты*: их теплоотдача подчиняется одинаковым закономерностям, которые при этом отличаются от общеизвестных. В частности, теплоотдача указанных сред в турбулентной области течения оказалась пропорциональной $\mathrm{Re}^{0,47}$, что исключало возможность применения для обобщения зависимости (9). Кроме того, была установлена некоторая зависимость теплоотдачи от pH (диапазон изменения $pH = 1$–$4{,}5$). Иная зависимость теплоотдачи от числа Re обусловила существование для данных сред области ($\mathrm{Re} \approx 7\cdot10^3$–$3\cdot10^4$), где их теплоотдача выше, чем для воды, и области ($\mathrm{Re} > 3{,}5\cdot10^4$), в которой их теплоотдача ниже, чем для воды (рис. 1). Становятся объяснимыми противоречивые данные относительно соотношения теплоотдачи воды и гидролизатов, встречающиеся в ряде нормативных документов.

Визуальные исследования показали, что для гидролизатов и нейтрализатов при переходе к турбулентному режиму течения характерно помутнение — они перестают быть прозрачными. Мы высказали предположение, что данное обстоятельство связано с образованием пенно-эмульсионной структуры. В этом случае теплоотдача действительно может несколько увеличиваться, благодаря интенсификации массообменных процессов в момент образования пены. То обстоятельство, что при дальнейшем увеличением числа Re темп увеличения теплоотдачи примерно такой же, как в ламинарной области течения, позволяет предположить, что пенно-эмульсионная структура при общей интенсификации теплообмена определяет условия течения в пристенной области, близкие к ламинарному.

Здесь необходимо отметить, что параметр pH определяет молекулярное взаимодействие на границе раздела фаз растворов, содержащих поверхностно-активные вещества, и тем самым характеризует устойчивость пенных структур. В такой постановке становится понятным влияние pH на теплообмен. Однако отмеченные особенности могут быть связаны также с изменением физических свойств жидкостей и структурной вязкостью эмульсий, а влияние pH при этом будет иметь косвенный характер.

Окончательный ответ может быть получен только на основе детальных исследований локальных характеристик потока и структуры течения. Поэтому на данном этапе мы вынуждены ограничиться обобщением результатов опытов в виде формулы

$$\mathrm{Nu} = 0{,}91\,\mathrm{Re}^{0,47}\,(pH)^{-0,16}, \qquad (10)$$

которая аппроксимирует опытные данные с погрешностью, не превышающей ±20 %, в области $7\cdot10^3 < \mathrm{Re} < 10^6$, $1 < pH < 4{,}5$.

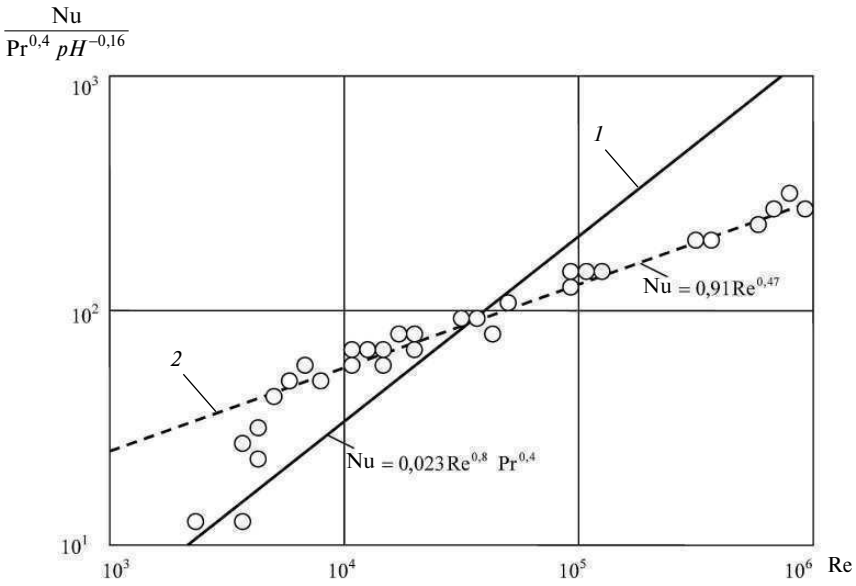


Рис. 1. Сопоставление теплоотдачи воды (*1*) и гидролизатов (*2*) в турбулентной области течения

Отдельную группу среди исследованных сред составили *полиглюкины*, где обнаружена аномалия теплоотдачи при малых концентрациях и затягивание перехода к развитому турбулентному течению. Последнее обстоятельство, по-видимому, связано с влиянием полимерных свойств жидкости. Из ряда работ, например [5], известно, что эффект Томса проявляется в жидкостях с малыми полимерными добавками обычно при турбулентном течении.

Интенсивность теплообмена для водных растворов полиглюкина (при одинаковых числах Re) ниже, чем для воды. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость изменения коэффициента K (см. формулу (9)) от процентной весовой концентрации абсолютно сухих веществ (а.с.в.). Как видно из приведенного графика в области малых концентраций ($C = 0{,}1–0{,}5$ %) наблюдается резкое снижение теплоотдачи. С увеличением концентрации до $C \approx 1$ % теплоотдача несколько возрастает, далее опять снижается, стабилизируясь при $C \approx 3$ %.

Приведенные данные позволяют сравнить слабые водные растворы полиглюкина и жидкости с высокополимерными добавками, где, как известно, было обнаружено существование оптимальных малых концентраций, при которых снижается сопротивление [3]. Опыты Е.М. Хабахпашевой и Б.В. Перепелицы [6] показали, что основное действие полимерных добавок проявляется в снижении интенсивности поперечных компонент пульсации скорости. Поскольку указанные пульсации вместе с пульсациями температуры определяют интенсивность теплообмена между потоком и стенкой, естественно ожидать уменьшения теплоотдачи.

Для сравнения были проведены опыты с водными растворами глюкозы и глицерина, которые носили в известной степени методический характер. Отмечено, что, как и у полиглюкина, интенсивность теплоотдачи для указанных растворов с увеличением концентрации снижается, но не столь интенсивно.

Из-за отсутствия достаточного объема данных о теплофизических свойствах для полиглюкина и ему подобных сред при вычислении критериев подобия использовались значения физических констант для воды. Поэтому наряду с критериальной была произведена обработка опытных данных в размерном виде, что позволило получить зависимость

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \exp(-BC), \qquad (11)$$

где α_0 — теплоотдача для дистиллированной воды; B — коэффициент, зависящий от рода жидкости; C — весовая концентрация абсолют-

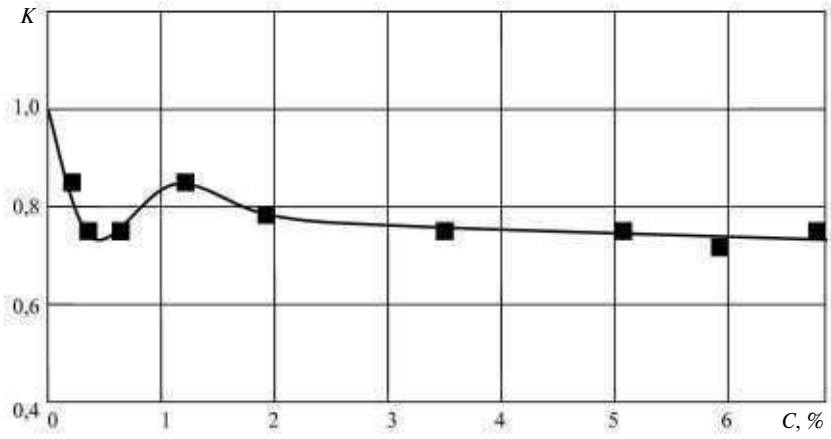


Рис. 2. Зависимость коэффициента k в формуле (9) от концентрации а.с.в. для полиглюкина

но сухих веществ, %. Получили: $B = 3{,}35$ для водных растворов полиглюкина в области $C = 1{,}3–10$ %; $B = 0{,}97$ для водных растворов глюкозы при $C = 2–25$ %; $B = 1{,}22$ для водных растворов глицерина при $C = 5–40$ %.

Изложенные результаты исследования теплообмена микробиологических сред позволили выявить ряд специфических особенностей, отличающих указанные среды от однокомпонентных жидкостей. В ламинарной области течения эти особенности проявляются незначительно и сводятся к увеличению области тепловой стабилизации на входном участке канала и затягиванию начала переходной области течения. Переходная область носит более размытый характер и заканчивается при больших значениях критерия Re. Наибольшие отличия наблюдались в области турбулентного течения. Здесь для ряда микробиологических сред отмечена аномалия теплоотдачи при малых концентрациях, слабая зависимость теплоотдачи от числа Re, переход к турбулентному режиму при больших значениях Re и др. Ряд отмеченных особенностей находит объяснение на основе современных представлений о реологических средах, а также о влиянии окислительно-восстановительного потенциала на пенообразования жидкостей. Некоторые особенности пока ждут своего объяснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зысин, Л.В.** Проблемы теплообмена при разработке оборудования микробиологических производств [Текст] / Л.В. Зысин // Тезисы докладов YII-й Всесоюзной конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». Т. 3.— Л., 1985.

2. **Кутателадзе, С.С.** Теплоотдача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: Справочное пособие / С.С. Кутателадзе.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 367 с.

3. **Хабахпашева, Е.М.** Конвективный теплообмен в реологических средах [Текст] / Е.М. Хабахпашева.— В сб.: Реодинамика и теплообмен / Ин-т теплофизики СО АН СССР.— Новосибирск, 1979.— С. 5–46.

4. **Žukauskas, A.** Convective Heat Transfer in Cross Flow [Text]: Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer.— New York: Wiley & Sons, 1987.

5. **Седов, Л.И.** Особенности структуры пристенной турбулентности и механизм снижения трения полимерными добавками [Текст] / Л.И. Седов, В.А. Иосилевич, В.Н. Пилипенко.— В кн.: Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента / АН ЭССР.— Таллин, 1985.— С. 7–12.

6. **Kutateladze, S.** Experimental investigation of the structure of near-wall turbulence and viscous sublayer [Text] / S. Kutateladze, E. Khabakhpasheva, V. Orlov, V. Perepelitsa, E. Mikhailova // In: Turbulent Shera Flows Vl.— Berlin-Heidelberg-New York: Sprinder-Verlag, 1979.— P. 91–103.

REFERENCES

1. **Zysin L.V.** Problemy teploobmena pri razrabotke oborudovaniia mikrobiologicheskikh proizvodstv [Tekst] / Tezisy dokladov YII-oi Vsesoiuznoi konf. «Dvukhfaznyi potok v energeticheskikh mashinakh i apparatakh». T. 3.— L., 1985. (rus.)

2. **Kutateladze S.S.** Teplootdacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: Spravochnoe posobie [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 1990.— 367 s. (rus.)

3. **Khabakhpasheva E.M.** Konvektivnyi teploobmen v reologicheskikh sredakh [Tekst] // V sb.: Reodinamika i teploobmen / In-t teplofiziki SO AN SSSR.— Novosibirsk, 1979.— S. 5–46.

4. **Žukauskas, A.** Convective Heat Transfer in Cross Flow [Text]: Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer.— Wiley & Sons, New York, 1987.

5. **Sedov L.I., Iosilevich V.A., Pilipenko V.N.** Osobennosti struktury pristennoi turbulentnosti i mekhanizm snizheniia treniia polimernymi dobavkami [Tekst].— V kn.: Turbulentnye dvukhfaznye techeniia i tekhnika eksperimenta / AN ESSR.— Tallin, 1985.— S. 7–12.

6. **Kutateladze S., Khabakhpasheva E., Orlov V., Perepelitsa V., Mikhailova E.** Experimental investigation of the structure of near-wall turbulence and viscous sublayer [Text].— In: Turbulent Shera Flows Vl.— Berlin-Heidelberg-New York: Sprinder-Verlag. 1979.— P. 91–103.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗЫСИН Леонид Владимирович — доктор технических наук научный сотрудник отделения энергодинамики Института интегративных исследований; 34600, ул. Геула, 39, г. Хайфа, Израиль, e-mail: lv_zyssin@mail.ru

СТЕШЕНКОВ Леонид Петрович — кандидат технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail:steshenkov@spbstu.ru

AUTHORS

ZYSSIN Leonid V. — Integrative Resarch Institue (IRI), Department of Entrgodynamics; 34600, Geula 39, Haifa, Israel; e-mail: lv_zyssin@mail.ru

STESHENKOV Leonid P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail:steshenkov@spbstu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 517.929

А.Ф. Зубова, А.В. Зубов,
В.И. Зубов, М.В. Стрекопытова

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НА СХОДИМОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНОСТЬ

A.F. Zubova, A.V. Zubov,
V.I. Zubov, M.V. Strecopitova

THE INVESTIGATION OF SYSTEMS DIFFERENTIAL EQUATIONS ON INTIMATION, STABILITY AND PRECISION

В статье дан критерий устойчивости линейных систем, а также приведены методы интегрирования матричных дифференциальных уравнений высокой размерности.

МАТРИЦА. УРАВНЕНИЕ. РЕШЕНИЕ. АЛГОРИТМ. ПРОИЗВОДНАЯ. КОРЕНЬ. СИСТЕМА. ПОРЯДОК. ЧИСЛО.

In giving article is give criteria of stability linear systems, and so is bring methods of integration matrix differential equations higher dimension.

MATRIX. EQUATION. SOLUTION. ALGORITHM. DERIVATIVE. ROOT. SYSTEM. ORDER. NUMBER.

При построении вычислительных алгоритмов в случаях асимптотической устойчивости или условной асимптотической устойчивости решения первоначальной вычислительной задачи (решение специально построенной системы дифференциальных уравнений) сходимость и устойчивость алгоритма следуют автоматически, а о точности можно судить по оценке нормы приближения решения специально построенной дифференциальной системы к положению равновесия. Под термином «специально построенная система дифференциальных уравнений» следует понимать такую систему, которая имеет те же корни, что и первоначальная, но порядок которой установлен намного ниже, для того чтобы ее было легче исследовать на сходимость, устойчивость и точность.

Постановка задачи

1. Мы установили, что все решения матричного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = -A^* AX + A^* \qquad (1)$$

сходятся к значению обратной матрицы A^{-1}, если она существует, т. е. если матрица A невырожденная. При этом матричная функция $V = AX - E$ удовлетворяет на решениях системы (1) дифференциальному уравнению

$$\dot{V} = -AA^* V . \qquad (2)$$

Откуда следует экспоненциальная оценка скорости приближения решения $X(t, X_0)$ к значению обратной матрицы A^{-1}. Интегрируя систему (1) методом Эйлера с шагом h, получим итерационный алгоритм

$$X_{k+1} = X_k + h(-A^* ax_k + A^*) .$$

Поскольку система (1) линейная, то ее решения легко разложить в ряд и получить эффективный алгоритм Шульца [1] или — представляя этот ряд в виде бесконечного произведения — еще более эффективный алгоритм автора [2]. Использование методов интегрирования более высокого порядка для системы (1) неэффективно.

2. Мы показали также, что все решения нелинейного матричного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = X - XAX \qquad (3)$$

также сходятся к значению обратной матрицы A^{-1}, если она существует. Матричная функция

$V = X^{-1} - A$ удовлетворяет на решениях (3) дифференциальному уравнению

$$\dot{V} = -V, \qquad (4)$$

откуда следует оценка величины интервала интегрирования. Интегрируя систему (3) методом Эйлера, получаем итерационный алгоритм

$$X_{k+1} = X_k + h(X_k - X_k a x_k),$$

который при $h = 1$ принимает вид

$$X_{k+1} = 2X_k - X_k a x_k$$

и называется *алгоритмом Шульца — Джонса — Майера* (SJM). Алгоритм сходится не всегда и требует специальной подготовки начальных данных [3, 4]. Причина расходимости в некоторых случаях алгоритма SJM заключается только в ограниченности машинной арифметики, так как из (4) следует, что он должен сходиться при любых начальных данных. Действительно, представляя решение системы (3) в виде ряда Тейлора при $h = 1$

$$X(1) = X(0) + \frac{X(0) - X(0)AX(0)}{1!} +$$

$$+ \frac{X(0) - 3X(0)AX(0) + 2X(0)AX(0)AX(0)}{2!} + \ldots, \qquad (5)$$

видим, что присутствующий в силу нелинейности системы (3) множитель AX(0) может превалировать некоторое время над фактором в знаменателе и, более того, вызвать ошибку арифметического переполнения. Это может происходить только при условии

$$\| AX(0) \| >> 1.$$

Отсюда следует и очевидный критерий выбора начального приближения. Метод SJM еще плохо отражен в научной литературе, и впереди — большие численные эксперименты и исследования по его сравнению с другими алгоритмами. Следует отметить также, что в силу нелинейности системы (3) применение неявных или полуявных методов невозможно.

3. Мы установили также, что решение $X(t, X_0)$ при $X_0 = A$ матричного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = \frac{1}{2}(-X + X^{*-1}) \qquad (6)$$

сводится к значению ортогональной матрицы $U : U^* U = E$ полярного разложения матрицы $A = FU, F : \{\forall x \in E_n : x \neq 0, x^* F x > 0\}$. Матричная функция $V = XX^* - E$ удовлетворяет на решениях системы (6) системе уравнений (4).

4. Мы установили также, что решение $X(t, X_0)$ при $X_0 = A^{*-1}$ матричного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = \frac{1}{2}(-X + XX^* X) \qquad (7)$$

также сходится к значению ортогональной матрицы U полярного разложения матрицы A. Матричная функция $V = (XX^*)^{-1} - E$ удовлетворяет на решениях системы (7) системе уравнений (4).

5. Нами было показано, что все решения матричного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = -X + X^{-1} AA^* \qquad (8)$$

сходятся к значению матричной функции квадратного корня из матрицы AA^* при условии, что матрица A — невырожденная. При этом матричная функция $V = (1/2)(X^2 - AA^*)$ удовлетворяет на решениях системы (8) системе уравнений (4) [3]. Из матричных дифференциальных систем (1), (3), (7), (8) только первая линейна, и поэтому для нее годится разложение решения в ряд, который позже представляется в виде бесконечного произведения. Интегрирование остальных систем осуществляется приближенными методами. Причем выбор величины *h* шага интегрирования, порядка метода и интервала интегрирования осуществляется на основе уравнения (4) и требуемой точности ε. Матричная функция *V* является мерой отклонения решения матричного дифференциального уравнения от решения первоначальной вычислительной задачи. Эта функция удовлетворяет линейному матричному дифференциальному уравнению (4) на решениях построенных дифференциальных матричных систем.

Численный анализ систем большой размерности

Многие системы, с которыми работает исследователь, имеют высокую размерность и большие числа обусловленности. Поэтому не всегда целесообразно приводить систему линейного приближения к нормальной форме. Рассмотрим систему линейных дифференциальных уравнений второго порядка

$$A_0\ddot{X} + HA_1\dot{X} + A_2X = 0, \qquad (9)$$

где A_0, A_1, A_2 — «обычные» матрицы, т. е. не имеющие больших чисел обусловленности и не представляющие затруднений в вычислительном аспекте; H — большой положительный параметр. Система (1) описывает механическую систему, в которой присутствуют быстро вращающиеся массы. Попытаемся отыскать собственные числа уравнений (1). Решение системы (1) мы будем искать в виде

$$X = \exp(\lambda t)C, \qquad (10)$$

где C — постоянный вектор. Для существования у системы (1) ненулевого решения вида (2) необходимо и достаточно, чтобы выполнялось соотношение

$$\det(A_0\lambda^2 + HA_1\lambda + A_2) = 0. \qquad (11)$$

Будем искать корни последнего уравнения, имеющие порядок величины H. Для этого в (3) сделаем замену $\lambda = \mu H$. Получим

$$\det(A_0\mu^2H^2 + A_1\mu H^2 + A_2) = 0.$$

Полагая $\alpha = H^{-2}$, имеем

$$\det(A_0\mu^2 + A_1\mu + \alpha A_2) = 0. \qquad (12)$$

Пусть это уравнение при $\alpha = 0$ имеет ненулевой корень μ_0. Тогда μ_0 удовлетворяет соотношению

$$\det(A_0\mu_0 + A_1) = 0. \qquad (13)$$

В случае, когда матрица A_0 невырожденная, число μ_0 является собственным значением матрицы $A_0^{-1}A_1$. Обозначим через μ_{01}, μ_{02}, ..., μ_{0k} корни уравнения (13).

Теорема 1. Каждому корню μ_0, кратность которого равна единице, отвечает корень μ_j уравнения (12), определяемый по формуле

$$\mu_j(\alpha) = \mu_{0_j} + \alpha\mu_{1_j} + \alpha^2\mu_{2_j}^2 + \ldots \qquad (14)$$

Ряд (14) сходится при достаточно малых значениях α.

Доказательство. Уравнение (12) определяет неявную функцию $\mu_j(\alpha)$, удовлетворяющую условию $\mu_j(0) = \mu_{0_j}$. Обозначим левую часть (12) $\Delta(\mu_{0_j}, \alpha)$.

Получим

$$\frac{\partial\Delta(\mu_{0_j}, \alpha)}{\partial\mu} = \mu_{0_j}^n \frac{\partial\det(A_0\mu_{0_j} + A_1)}{\partial\mu},$$

так как μ_{0_j} — простой корень уравнения (13). Из этого следует, что при достаточно малых $|\alpha|$ существует неявная функция $\mu_j(\alpha)$, удовлетворяющая уравнению (12) и условию $\mu_j(0) = \mu_{0_j}$. Разложимость функции $\mu_j(\alpha)$ в виде ряда (14) следует из теоремы Коши, так как $\mu_j(\alpha)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d\mu_j}{d\alpha} = \frac{\partial\Delta}{\partial\alpha} \Big/ \frac{\partial\Delta}{\partial\mu}$$

с голоморфной правой частью в окрестности точки μ_{0_j}. Следовательно, $\mu_j(\alpha)$ представима в виде ряда (14), сходящегося при $|\alpha| < \alpha_0$.

Доказательство закончено.

Отметим, что корню $\mu_j(\alpha)$ отвечает собственное число $\alpha_j = \mu_j(\alpha)H$. Теперь будем искать корни порядка H^{-1}. Для этого положим в (11) $\lambda = \nu H^{-1}$. Получим уравнение

$$\det(a\nu^2A_0 + \nu A_1 + A_2) = 0. \qquad (15)$$

Пусть это уравнение при $\alpha = 0$ имеет отличный от нуля корень ν_0, тогда ν_0 удовлетворяет соотношению

$$\det(\nu_0A_1 + A_2) = 0. \qquad (16)$$

Обозначим через $\nu_{01}, \nu_{02}, \ldots, \nu_{0n}$ корни этого уравнения.

Теорема 2. Каждому корню ν_{0_j} кратности единица уравнения (16) отвечает корень уравнения (15) ν_j, определяемый по формуле

$$\nu_j(\alpha) = \nu_{0_j} + \alpha\nu_{1_j} + \alpha^2\nu_{2_j} + \ldots \qquad (17)$$

При этом ряд сходится при достаточно малых значениях α.

Доказательство. Уравнение (15) определяет неявную функцию $\nu(\alpha)$. Воспользуемся теоремой о существовании неявной функции. Обозначим левую часть (15) через $\Delta_1(\nu, \alpha)$. Найдем частную производную этой функции по ν при $\alpha = 0$:

$$\frac{\partial\Delta_1(\nu_{0_j}, 0)}{\partial\nu} = \frac{\partial\det(\nu_{0_j}, A_1 + A_2)}{\partial\nu} \neq 0,$$

так как v_{0_j} — простой корень. Поэтому при малых α существует неявная функция $v_j(\alpha)$. Возможность разложения неявной функции $v_j(\alpha)$ в ряд (17) можно доказать аналогично теореме 1.

Доказательство закончено.

Если матрица A_1 невырожденная, то v_{0_j} является собственным числом матрицы $-A_1^{-1}A_2$. На основе теорем 1 и 2 могут быть получены конструктивные методы построения собственных значений μ_j, v_j: для этого нужно ряды (14) и (17) подставить соответственно в (12) и (15) и приравнять коэффициенты при одинаковых степенях α. Отметим, что если матрицы A_0, A_1, A_2 невырожденные и матрицы $A_0^{-1}A_1$, $A_1^{-1}A_2$ не имеют кратных собственных чисел, то первая и вторая группы корней содержат по n членов, где n — число уравнений в системе (1). Для нахождения собственных чисел μ_{0_j}, v_{0_j} потребуется обращать матрицы A_0 и A_1. Здесь можно воспользоваться эффективным методом обращения матрицы. Изложенный подход можно применить к нахождению собственных чисел матрицы вида A + HB, где H — большой положительный параметр. Полагая $\lambda = H\mu$, получим, что число μ должно удовлетворять соотношению

$$\det(A + HB - H\mu E) = 0.$$

Положим $\beta = H^{-1}$, тогда получим соотношение

$$\det(\beta A + B - \mu E) = 0. \qquad (18)$$

Пусть μ_0 — отличное от нуля собственное число матрицы B. Тогда соотношение (18) определяет неявную функцию $\mu = \mu(\beta)$, удовлетворяющую условию $\mu(0) = \mu_0$. Если μ_0 — простой корень, то выполнено условие

$$\frac{\partial \det(B - \mu_0 E)}{\partial \mu} = 0,$$

и при малых β существует неявная функция $\mu(\beta)$, удовлетворяющая соотношению (18) и определяемая соотношением типа (14). В случае, когда кратность корня μ_0 равняется $k > 1$, введем новую переменную

$$\eta = (\mu - \mu_0)^k. \qquad (19)$$

Тогда производная левой части (18) по переменной η при $\beta = 0$ в точке $\eta = 0$ отлична от нуля. Следовательно, при малых $|\beta|$ существует неявная функция $\eta = \eta(\beta)$, определяемая рядом типа (14). Функцию $\mu(\beta)$ найдем через функцию η из формулу (19).

Достаточные условия устойчивости линейных систем

Поставим задачу определения и анализа корней уравнения

$$\det(A - \lambda E) = 0, \qquad (20)$$

где $A - (n \times n)$ -матрица. Известно, что вопрос об устойчивости линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений будет решен, если выяснится, что все корни уравнения (20) лежат в левой полуплоскости комплексного переменного λ. Следуя [4], отобразим эту левую полуплоскость на единичный круг в плоскости переменного ρ при помощи преобразования

$$\lambda = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}. \qquad (21)$$

При этом корни уравнения (20) перейдут в корни уравнения

$$\det(B - \rho E) = 0, \qquad (22)$$

где $B = E + 2(A - E)^{-1}$. Обозначим корни этого уравнения через ρ_1, ρ_2, ..., ρ_n. Из нашего преобразования следует, что если корни уравнения (20) лежат в левой полуплоскости, то корни уравнения (22) лежат в единичном круге. А тогда, поскольку матрица B^k имеет собственные числа ρ_1^k, ρ_2^k, ..., ρ_n^k, необходимым и достаточным условием асимптотической устойчивости будет условие

$$B^k \underset{k \to \infty}{\to} 0. \qquad (23)$$

Рассмотрим теперь матрицу B^*B. Эта матрица — симметричная, ее собственные числа неотрицательны. Обозначим собственные числа матрицы B^*B через μ_1, ..., μ_n. Пусть μ_1 — наибольшее из этих чисел. Заметим, что из условия $|\rho_j| < 1$ $(j = 1, ..., n)$ не следует $|\mu_i| < 1$ $(i = 1, ..., n)$. При выполнении условия $|\rho_i| < 1$ $(i = 1, ..., n)$ существует целое положительное число k такое, что собственные числа матрицы $(B^*B)^k$ будут меньше единицы. Обратное также верно: если при некотором целом положительном k соб-

ственные числа матрицы $(B^*B)^k$ меньше единицы, то собственные числа матрицы B лежат в единичном круге, т. е. имеет место асимптотическая устойчивость. По определению

$$\| B \| = \max_{X \in E_n} \frac{\| BX \|}{\| X \|} = \max_{X \in E_n} \frac{\sqrt{X^* B^* BX}}{\| X \|}.$$

Введем в рассмотрение величины

$$S_k = S_p((B^*B)^k).$$

Теорема 3. Если при некотором целом положительном k выполнено неравенство

$$\frac{S_k}{S_1} < \frac{1}{n}, \qquad (24)$$

то собственные числа матрицы B лежат в единичном круге. Следовательно, система с матрицей A асимптотически устойчива.

Доказательство. Вычислим отношение S_k / S_1:

$$\frac{S_k}{S_1} = \frac{\mu_1^k + \mu_2^k + ... + \mu_n^k}{\mu_1 + \mu_2 + ... + \mu_n} = \mu_1^{k-1} \frac{(1 + (\mu_2 / \mu_1)^k + ...)}{(1 + (\mu_2 / \mu_1) + ...)}.$$

Поскольку μ_1 — наибольшее собственное число (здесь мы предполагаем, что матрица B^*B имеет хотя бы одно ненулевое собственное число), то справедливы оценки

$$\frac{\mu_1^{k-1}}{n} \le \frac{S_k}{S_1} \le \mu_1^{k-1}. \qquad (25)$$

Отсюда видно, что при выполнении условия (24) будет справедливо неравенство $\mu_1^{k-1} < 1$. Следовательно, наибольшее собственное значение матрицы B^*B меньше единицы, а тогда выполнено условие (23), откуда следует, что собственные числа матрицы B лежат в единичном круге.

Доказательство закончено.

Теорема является критерием устойчивости линейных систем. Как отмечено выше, даже при условии $|\rho_j| < 1$ матрица B^*B может иметь собственные числа, превосходящие единицу. Для того чтобы охватить и эти случаи, следует рассматривать вместо матрицы B^*B матрицу $(B^*B)^m$, где $m > 1$. Условия теоремы останутся прежними. Для большей эффективности вычислений можно сразу рассматривать матрицу $(B^*B)^m$, где m достаточно велико. Следует отметить также, что настоящий критерий является достаточным. Необходимо добавить также, что эффективность предложенных алгоритмов нисколько не снижается в том случае, когда определитель матрицы A близок к нулю.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (пр. № 10–08–000624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубов, А.В.** Динамическая безопасность управляемых систем [Текст] / А.В. Зубов, Н.В. Зубов.— СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ,— 2009.— 172 с.

2. **Зубов, А.В.** Математические методы качественного анализа систем управления и устойчивость расчетных движений [Текст] / А.В. Зубов, С.В. Зубов.— СПб.: Изд-во ВВМ, 2011.— 323 с.

3. **Зубов, А.В.** Управление динамическими системами [Текст]/ А.В. Зубов, О.А. Шабурова.— СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2005.— 83 с.

4. **Зубов, И.В.** Анализ управляемых систем и равновесных движений [Текст]/ И.В. Зубов, Н.В. Зубов, М.В. Стрекопытова.— СПб.: Изд-во ВВМ. 2012.— 322 с.

5. **Зубова, А.Ф.** Математические методы моделирования промышленных процессов и технологий [Текст] / А.Ф. Зубова.— СПб.: Изд-во СПбГУ,— 2004.— 472 с.

6. **Зубов, И.В.** Анализ систем управления и способы представления программных управлений [Текст] / И.В. Зубов.— СПб.: Изд-во ВВМ, 2014.— 150 с.

7. **Стрекопытов, С.А.** Теория квазипериодических систем [Текст] / С.А. Стрекопытов.— СПб.: ВВМ, 2014.— 157 с.

8. Стрекопытова, М.В. Анализ равновесных движений [Текст] / М.В. Стрекопытова.— СПб: Изд-во СПбГУ, 2014.— 176 с.

REFERENCES

1. **Zubov A.V., Zubov N.V.** Dinamicheskaia bezopasnost' upravliaemykh sistem [Tekst].— SPb.: Izd-vo NII Khimii SPbGU, 2009.— 172 s. (rus.)

2. **Zubov A.V., Zubov S.V.** Matematicheskie metody kachestvennogo analiza sistem upravleniia i ustoichivost' raschetnykh dvizhenii [Tekst]— SPb.: Izd-vo VVM, 2011.— 323 s. (rus.)

3. **Zubov A.V., Shaburova O.A.** Upravlenie dinamicheskimi sistemami [Tekst].— SPb.: Izd-vo NII Khimii SPbGU, 2005.— 83 s. (rus.)

4. **Zubov I.V., Zubov N.V., Strekopytova M.V.** Analiz upravliaemykh sistem i ravnovesnykh dvizhenii [Tekst].— SPb.: Izd-vo VVM, 2012.— 322 s. (rus.)

5. **Zubova A.F.** Matematicheskie metody modelirovaniia promyshlennykh protsessov i tekhnologii [Tekst].— SPb.: Izd-vo SPbGU, 2004.— 472 s. (rus.)

6. **Zubov I.V.** Analiz sistem upravleniia i sposoby predstavleniia programmnykh upravlenii [Tekst].— SPb.: Izd-vo VVM, 2014.— 150 s. (rus.)

7. **Strekopytov S.A.** Teoriia kvaziperiodicheskikh sistem [Tekst] / SPb.: Izd-vo VVM, 2014.— 157 s. (rus.)

8. **Strekopytova M.V.** Analiz ravnovesnykh dvizhenii [Tekst].— SPb: Izd-vo SPbGU, 2014.— 176 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗУБОВА Александра Федоровна — доктор технических наук профессор кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22/5, кв. 4, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

ЗУБОВ Афанасий Владимирович — доктор физико-математических наук профессор кафедры теории управления факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22/5, кв. 4, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

ЗУБОВ Всеволод Иванович — аспирант кафедры теории управления факультет прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22/5, кв. 4, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

СТРЕКОПЫТОВА Мария Владимировна — аспирант кафедры теории управления факультет прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета; 191024, ул. Конная, д. 22/5, кв. 4, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ddemidova@mail.ru

AUTHORS

ZUBOVA Alexandra F. — St. Petersburg State University; 191024, Connya St. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

ZUBOV Afanasyi V. — St. Petersburg State University; 191024, Connya St. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

ZUBOV Vsevolod I. — St. Petersburg State University; 191024, Connya St. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

STRECOPITOVA Maria V. — St. Petersburg State University; 191024, Connya St. 4, St. Petersburg, Russia; e-mail: ddemidova@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.9.048

К.Д. Бабкин, Я.Б. Певзнер,
В.В. Осипов, А.В. Кузнецов

ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СВАРИВАЕМЫМ СТЫКОМ ПРИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

K.D. Babkin, Ya.B. Pevzner,
V.V. Osipov, A.V. Kuznetsov

TRIANGULATION SENSOR FOR WELD TRACKING DURING HYBRID LASER-ARC WELDING OF STEELS

Описаны требования, предъявляемые к системам отслеживания свариваемых стыков при гибридной лазерно-дуговой сварке металлов. Требуемые высокие точности наведения и узкие разделки ограничивают применимость традиционных контактных датчиков. В качестве альтернативы был выбран метод лазерной триангуляции, описаны основы алгоритмов обработки изображения. Для использования в составе лазерно-дугового сварочного комплекса разработан датчик наведения, который отвечает всем необходимым требованиям по точности и робастности.

ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА. НАВЕДЕНИЕ НА СТЫК. ЛАЗЕРНЫЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ.

The requirements for weld tracking systems during laser-arc welding of steels are described. Because of high required accuracies and narrow welding cuttings usage of traditional contact sensors are limited. Laser triangulation method was chosen instead and image processing algorithms are described. Tracking sensor, based on these algorithms was made for using during hybrid laser-arc welding. This sensor meets all necessary requirements in terms of accuracy and robustness.

LASER-ARC WELDING. WELD TRACKING. LASER TRIANGULATION SENSOR. MACHINE VISION. IMAGE RECOGNITION.

Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов — динамично развивающаяся технология. Она находит широкое применение при изготовлении конструкций судостроения, тяжелого машиностроения, используется при сварке труб больших диаметров, толстостенных баков, цистерн, обечаек. Толщина свариваемых листов составляет от 5 до 50 мм при длине сварного соединения до 10–20 метров. Эта технология хорошо себя зарекомендовала как замена традиционной многопроходной сварки плавящимся электродом на стыковых и тавровых швах. Гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет улучшить металлургические характеристики сварного соединения, уменьшить зону термического влияния и увеличить скорость сварки. Однако она более требовательна к качеству подготовки свариваемого стыка и, как следствие, к системам слежения и наведения технологического инструмента. Отклонение лазерного луча от стыка во время сварки должно быть не более диаметра фокального пятна и составлять 0,2–0,4 мм. Для обеспечения такой точности наведения необходимо включить в состав технологического комплекса систему наведения, которая с погрешностью не хуже ±0,1 мм будет определять положение стыка и формировать управляющий сигнал для манипулятора.

Постановка задачи

При создании технологического комплекса для лазерно-дуговой сварки труб больших диаметров была поставлена задача: разработать систему наведения на стык для сварочного трактора. Основные требования, предъявляемые к системе:

точность определения положения стыка — не хуже ±0,1 мм;

тип свариваемых швов — стыковые, с разделкой и без нее;

высокая надежность распознавания узких (10–30°) разделок и возможность работы без разделки;

небольшие габариты датчика, устанавливаемого на тракторе (примерно 50×50×100 мм; вес не более 200 г);

надежная работа в условиях сварки (дуговой разряд — до 500 А; сильная засветка от плазменного факела; брызги расплавленного металла).

В качестве метода распознавания стыка было выбрано техническое зрение. Системы слежения за стыком, основанные на нем, получили широкое распространение и успешно применяются в условиях автоматической дуговой сварки крупногабаритных изделий [1] и в условиях автоматической лазерной сварки [2, 3]. Типовая система слежения за стыком состоит из цифровой видеокамеры, вычислительного блока и программного обеспечения. Камера захватывает изображения стыка; вычислительный блок по заложенному в программном обеспечении алгоритму обрабатывает видеопоток, находит характерные точки и формирует управляющий сигнал для манипулятора, перемещающего технологический инструмент. В основном используются два подхода: анализ изображения свариваемого стыка с применением сложных алгоритмов распознавания образов [4, 5] либо использование структурированной подсветки (например, генератора лазерной линии) и относительно простых алгоритмов [6, 7]. Для реализации был выбран второй подход, известный как лазерный триангуляционный метод, из-за хорошей устойчивости к засветке и простоте алгоритмов обработки изображений.

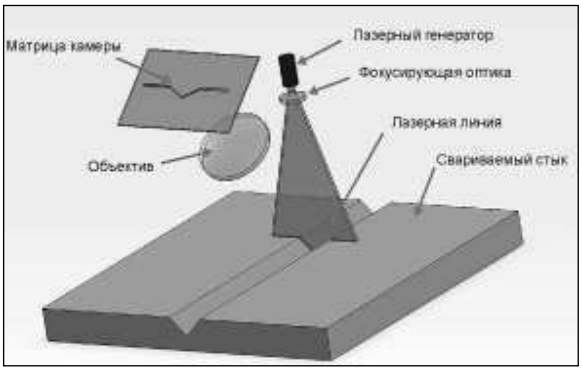


Рис. 1. Схема работы триангуляционного датчика

Разработка триангуляционного датчика наведения

Триангуляционный датчик состоит из двух частей: генератора лазерной линии и цифровой видеокамеры. Во время работы датчика на свариваемый стык проецируется лазерная линия, которая считывается цифровой камерой, установленной под углом к плоскости лазерного луча. Камера и лазерный генератор жестко закреплены относительно друг друга, что позволяет откалибровать датчик и по расположению изображения на матрице видеокамеры рассчитать положение свариваемого стыка относительно датчика. Схема работы датчика показана на рис. 1.

При создании датчика системы наведения для лазерно-дугового комплекса были использованы следующие комплектующие:

цифровая видеокамера с разрешением 640×480 пикселей, скоростью съемки 60 кадров/с и интерфейсом USB;

объектив с фиксированным фокусным расстоянием 5 мм;

генератор лазерной линии на базе лазерного диода с длиной волны $\lambda = 640$ нм и $P = 50$ мВт, оборудованный цилиндрической и мощностью сферической линзами.

Исходя из требуемой точности определения стыка в 0,1 мм были выбраны компоненты видеокамеры, обеспечивающие пространственное разрешение 0,1 мм. Область захвата камеры составила 60 мм по горизонтали и 30 мм по вертикали, что достаточно для использования в составе комплекса. Стоит заметить, этого разрешающая способность датчика пропорциональна разрешению камеры и обратно пропорциональна области захвата. Это позволяет модернизировать датчик при необходимости, приспособляя его под конкретную задачу. На-

пример, при сварке без разделки видимая область стыка очень мала и требуется увеличить разрешающую способность датчика, что достигается заменой объектива на другой, с фокусным расстоянием 10 мм. При этом поле захвата уменьшается до 30 мм, а разрешающая способность увеличивается до 0,05мм. Камера и генератор линии были смонтированы в металлическом корпусе размером 75×40×30 мм (рис. 2).

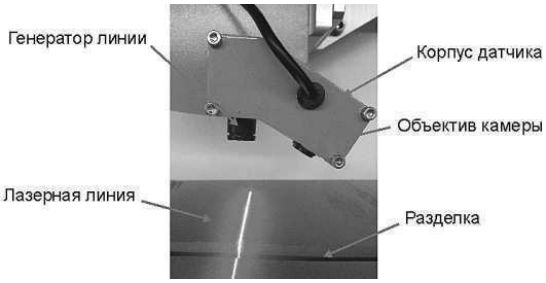


Рис. 2. Фотография датчика наведения

Лазерный диод для генератора лазерной линии был выбран с учетом спектра свечения дугового разряда [8]. Использование мощных диодов увеличивает соотношение сигнал/шум и уменьшает восприимчивость датчика к помехам, однако высокие мощности излучения опасны для оператора. Поэтому был выбран компромиссный вариант в 50 мВт излучаемой мощности. Эксперименты показали, что при лазерно-дуговой сварке сталей больших толщин (мощность лазерного луча — примерно 15 кВт, мощность дугового разряда — 5 кВт) необходимо использовать дополнительные средства защиты от засветки. Поэтому в конструкцию были внесены следующие изменения:

смонтирован защитный металлический щиток, отсекающий прямую засветку;

перед матрицей видеокамеры установлен узкополосный интерференционный фильтр с центральной линией 640 нм и шириной 10 нм;

установлены быстросменные защитные стекла для генератора и камеры.

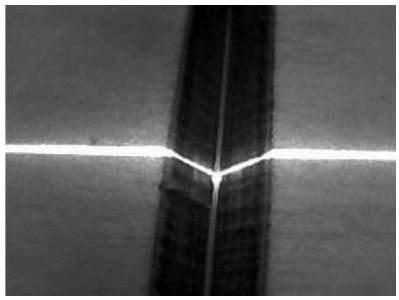
Эти модификации позволили поднять соотношение сигнал/шум до приемлемого для дальнейшей обработки уровня.

Программное обеспечение системы наведения

Обработка видеосигнала с цифровой камеры проводится на промышленном компьютере системы управления комплексом, который работает под управлением операционной системы Windows 7. Конструкция сварочного трактора предусматривает установку датчика наведения впереди технологического инструмента, на расстоянии 200 мм от точки сварки. Таким образом, между моментом сканирования участка стыка и моментом его сварки проходит не менее 6 секунд (максимальная скорость сварки 2 м/мин). Поэтому использовать систему жесткого реального времени нет необходимости. Программа системы наведения была написана в среде программирования LabVIEW, обработка изображения проводилась с помощью встроенного пакета NI Vision, реализующего основные алгоритмы фильтрации, исправления дисторсий и поиска ключевых элементов на изображении. Качество предварительной обработки изображений определяет надежность работы алгоритмов распознавания изображений [9]. Предварительная обработка включает несколько шагов: исправление дисторсии объектива, очистку от шума и нормализацию.

Необходимо учитывать, что получаемое изображение, а именно — толщина лазерной линии на изображении, зависит от качества обработки поверхности стыка. На загрязненных, ржавых и шероховатых участках поверхности

а)



а)

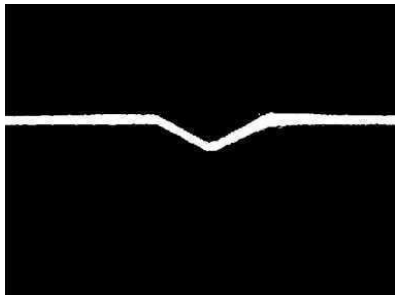


Рис. 3. Исходное изображение (*а*) и скорректированное (*б*)

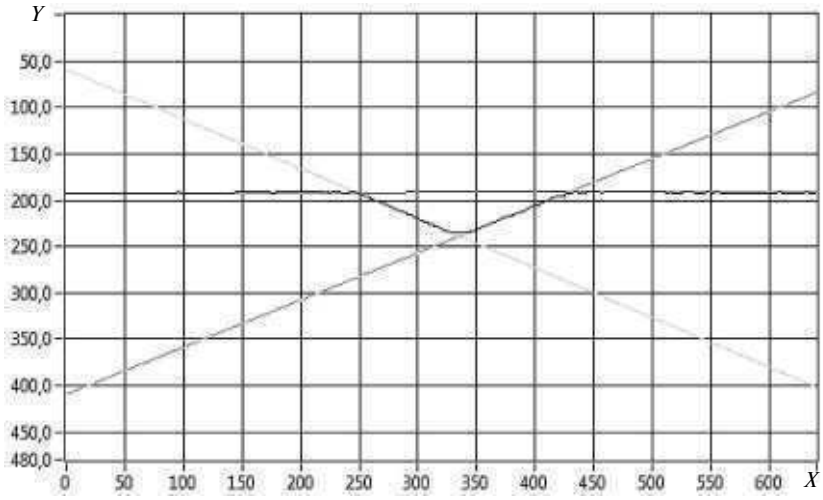


Рис. 4. Изображение разделки с искомыми отрезками

свариваемых деталей линия становится шире, чем на гладких поверхностях разделки. Чтобы нивелировать влияние этого факта, для каждого вертикального столбца изображения находится центр масс, и толстая линия переменной ширины сводится к линии из одного пикселя. На полученном изображении взвешенным методом наименьших квадратов находят отрезки прямых.

Точка пересечения двух наклонных отрезков является искомой и соответствует дну сварочной разделки. С помощью калибровочной функции координаты точки на изображении преобразуются в координаты системы позиционирования и передаются системе автоматического управления.

Точность определения положения стыка, достигаемая описанным методом, больше разрешающей способности датчика благодаря использованию статистических метод обработки данных. Суммарная ошибка составляет от ±0,01 до ±0,05 мм и сильно зависит от качества подготовки кромок свариваемого стыка.

При наведении на свариваемый стык, выполненный без разделки, алгоритм упрощается, за искомую точку берется центр «провала» лазерной линии в щель между деталями. Экспериментальные испытания показали надежное детектирование стыка при зазоре от 0,3 до 5 мм, что соответствует реальным зазорам при лазерно-дуговой сварке.

Лазерные триангуляционные сенсоры — хорошая альтернатива традиционным контактным датчикам положения для наведения на стык при автоматической сварке металлов. В некоторых применениях, например при гибридной лазерно-дуговой сварке металлов, они обеспечивают большие точности, надежность распознавания и удобство в работе, чем контактные датчики, а с учетом прогресса в области разработки алгоритмов компьютерного зрения и в производстве цифровых камер есть большой потенциал по дальнейшему совершенствованию основных качеств. Кроме того, стоимость компонентов подобных датчиков постоянно снижается, что позволяет расширять сферу их применения [10].

Для использования в составе технологического комплекса был разработан триангуляционный датчик на основе доступной элементной базы. Он зарекомендовал себя как доступное и в то же время надежное и точное решение для задач наведения технологического инструмента на свариваемый стык.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №14.527.12.0027 от 20.10.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Suga, Y., Ishii, A.** Application of image processing to automatic weld inspection and welding process control [Text] // The Japan Society of Precision Engineering.— 1998. Vol. 32, № 2.

2. **Xiang Dong Gao, De Yong You.** Seam Tracking Monitoring during High-Power Fiber Laser Welding [Text] // Applied Mechanics and Materials.— 2012. Vol. 201–202.— P. 69–72.

3. **Xiangdong Gaoa, Deyong Youa, Seiji Katayamab.** Infrared image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding [Text] // Mechatronics.— 2012. Vol. 22, Issue 4.— P. 370–380.

4. **Xianghua Liu, Zhengyi Jiang, Jingtao Han.** BP Neural Network Model for Seam Tracking Offset during High-Power Fiber Laser Welding [Text] // Advanced Materials Research.— 2011. Vol. 418–420.— P. 1464–1467.

5. **Xiangdong Gao, Deyong You, Katayama, S.** Seam Tracking Monitoring Based on Adaptive Kalman Filter Embedded Elman Neural Network During High-Power Fiber Laser Welding [Text] // IEEE Transactions on Industrial Electronics.— 2012. Vol. 59, Issue 11.— P. 4315–4325.

6. **Haug K., Pritschow G.** Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry [Text] / Industrial Electronics Society, 1998 // IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998. Vol. 2.— P. 1236–1241.

7. **Kim T., Lee S., Baek S., Boo K.** A study on the welding seam tracking by using Laser Vision Sensor [Text].— 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS).— 2010.— P. 779–782.

8. **Agapiou G., Kasiouras C., Serafetinides A.A.** A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensors [Text] // Optics & Laser Technology.— 1999. Vol. 31, Issue 2.— P. 157–161.

9. **Haug K., Pritschow G.** Reducing distortions caused by the welding arc in a laser stripe sensor system for automated seam tracking [Text] // Industrial Electronics.— ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on. 1999. Vol. 2.— P. 919–924.

10. **Fernandez Villan A., Acevedo R.G., Alvarez E. [et all.].** System for Weld Tracking Based on Artificial Vision [Text] // IEEE Transactions on Industry Applications.— 2011. Vol. 47, Issue 3.— P. 1159–1167.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБКИН Константин Дмитриевич — ведущий инженер Российско-Германского лазерного технологического центра Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: babkin.kd@mail.ru

ПЕВЗНЕР Яков Борисович — ведущий инженер Российско-Германского лазерного технологического центра Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bezde@inbox.ru

ОСИПОВ Вячеслав Владимирович — ведущий инженер ООО «Центр лазерных технологий»; 194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.21 e-mail: slava_1981@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Андрей Владимирович — инженер научно-исследовательской лаборатории лазерных и электронно-лучевых технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: algorithm.ltd@gmail.com

AUTHORS

BABKIN Konstantin D. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: babkin.kd@mail.ru

PEVZNER Yakov B. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bezde@inbox.ru

OSIPOV Vyacheslav V. — «Laser Technology Center», ltd. 194064, Tihorezkiy pr. 21, St. Petersburg, Russia, e-mail: slava_1981@mail.ru

KUZNETSOV Andrey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: algorithm.ltd@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.165.5

И.А. Кудрявцев, А.С. Ласкин

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА В ПОДВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ АЭС

I.A. Kudryavtsev, A.S. Laskin

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FLOW IN INLET MANIFOLD HPC OF THE STEAM TURBINE FOR NPP

В статье представлены результаты исследования структуры потока в подводящих трактах цилиндра высокого давления турбин АЭС. Сопоставлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПАРОВАЯ ТУРБИНА. АЭС. ПОДВОДЯЩИЙ ТРАКТ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА.

This article is discussed structure of the flow in inlet manifold high pressure cylinder of the steam turbine for NPP. Results of compare are presented for experimental research and numerical modeling.

EXPERIMENTAL RESEARCH. NUMERICAL MODELING. STEAM TURBINE. NPP. INLET MANIFOLD. RESEARCH OF THE FLOW.

Статья посвящена совершенствованию трактов подвода пара, которое базируется на исследовании структур потока в подводящих трактах цилиндров высокого давления (ЦВД) быстроходных и тихоходных турбин атомных электростанций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР).

Основная задача при конструировании входного тракта ЦВД — минимизация потерь кинетической энергии, окружной и радиальной неравномерностей потока перед входом в проточную часть турбины. Минимизация потерь кинетической энергии необходима для повышения КПД ЦВД и всей турбоустановки в целом. Минимизация окружной и радиальной неравномерностей потока также позволит увеличить КПД ЦВД и повысить вибрационную надежность лопаточного аппарата. Поиск направлений совершенствования конструкций подводящих трактов — основная задача данной работы. Для выработки такой усовершенствованной конструкции на первом этапе необходимо исследовать структуру потока в подводящем тракте ЦВД.

Основной метод исследования — сочетание экспериментального исследования и численного моделирования в CFD пакетах. В настоящее время численное моделирование оценивается как наиболее быстрый и относительно дешевый способ получения данных о протекающих физических процессах. При этом в связи со сложностью реальных исследуемых процессов все большее значение приобретают выбор соответствующей модели турбулентности и тестирование результатов численного моделирования.

Для численного моделирования процессов, протекающих в подводящем тракте ЦВД турбины АЭС, применен трехмерный аэрогидродинамический пакет FlowSimulation. Рассматриваемый CFD пакет является составной частью системы автоматизированного проектирования SolidWorks и позволяет рассчитывать широкий круг различных течений на основе k–ε модели турбулентности.

Для оценки адекватности имитации исследуемых процессов течения FlowSimulation необходимо верифицировать. Для этого ре-

зультаты проведенного экспериментального исследования сравниваются с результатами численного моделирования.

Объект исследования

В качестве объекта для проведения экспериментального исследования структуры потока в подводящем тракте послужила конструкция Ленинградского металлического завода для турбины К-1000–60/3000–2 с подводом в нижнюю часть корпуса ЦВД, что дает ряд преимуществ при монтаже и эксплуатации турбины. Конструкция подводящего тракта рабочего тела в ЦВД представляет собой четыре подводящих патрубка, расположенных под углом 30° к вертикальной оси, соединяющихся в цилиндрическую сборную камеру с эллиптическим днищем. Близкая по схеме конструкция применяется в тихоходных турбинах Харьковского турбогенераторного завода, но в их конструкции сборная камера состоит из объема сферической формы и цилиндрического участка. На рис. 1 изображена схема подвода пара к ЦВД турбины АЭС с ВВЭР и конструкция прототипа подводящего тракта.

На входе в ЦВД пар имеет $y \approx 0$ (степень влажности), $P = 5{,}76$ МПа, $t = 273$°С.

Экспериментальная установка

Воздушный экспериментальный стенд представляет собой имитацию участка подвода рабочего тела в ЦВД турбины — четыре подвода к общему коллектору (прототип изображен на рис. 1). Источником рабочего тела для эксперимента выбран вентилятор, находящийся в лаборатории кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей СПбГПУ. На рис. 2 изображены экспериментальный стенд, контрольные сечения и расположение применяемых пневмозондов.

Движения среды: воздух от вентилятора подается по входной трубе *1* в уравнительную камеру *2* и далее по четырем подводящим трубам *3* поступает в сборный коллектор *4*. Камера *2* предназначена для выравнивания расходов в подводящих трубах *3*.

Модель входного участка выполнена в масштабе 1:10. Основные размеры: внутренний диаметр сборного коллектора 150 мм; $l/D = 6{,}6$; внутренний диаметр подводящих труб 48 мм; $l/d = 21$. Для потока в подводящей трубе число Маха $M = 0{,}19$ и число Рейольдса $Re = 6{,}1\times10^5$. Соответствующие числа для натуры составляют: $M = 0{,}14$, $Re = 5{,}5\times10^7$. Основные размеры натуры: внутренний диаметр сборного коллектора 1240 мм, $l/D \approx 0{,}6$, внутренний диаметр подводящих труб 470 мм.

Сборный коллектор в точке входа подводящих труб в модели имеет плоское днище, в отличие от прототипа, который имеет эллиптическое днище. Численное моделирование выполнялось также для конструкции сборного коллектора с плоским днищем.

Контрольно-измерительные приборы

Для измерения полных давлений использованы трубки Пито, а для статических давлений — отборы давлений на стенках.

На рис. 2 изображены контрольные сечения в сборном коллекторе и нулевое сечение, соответствующее дну сборного коллектора, в месте

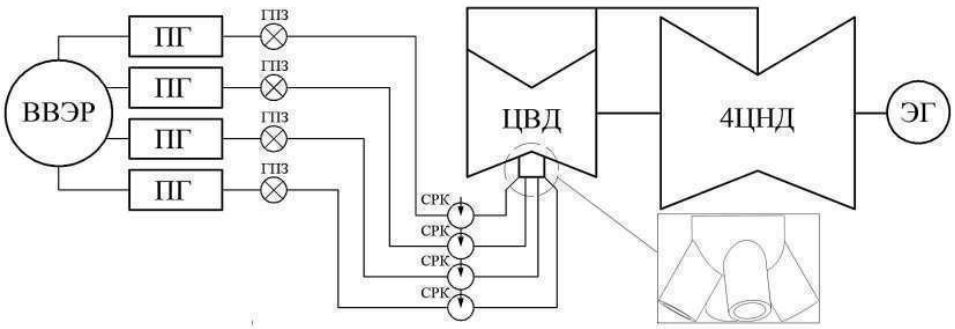


Рис. 1. Схема подвода пара к ЦВД турбины АЭС с ВВЭР (ПГ — парогенератор; ГПЗ — главная паровая задвижка; СРК — стопорно-регулирующий клапан; ЭГ — электрогенератор)

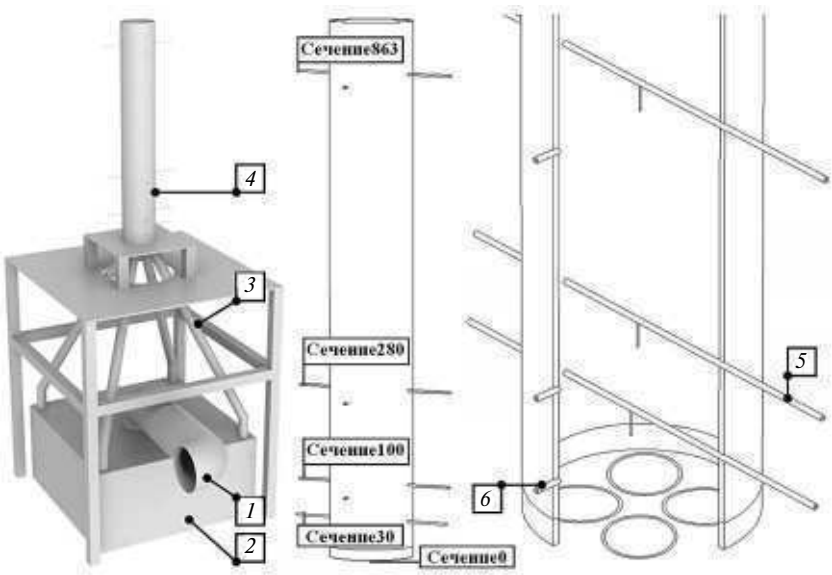


Рис. 2. Экспериментальный стенд, контрольные сечения и пневмозонды:
1 — труба входная; *2* — уравнительная камера; *3* — трубы подводящие; *4* — сборный коллектор; *5* — трубка Пито; *6* — отбор статического давления

входа потоков из подводящих труб. При проведении экспериментального исследования для исключения влияния аэродинамических следов предшествующих зондов в сборном коллекторе единовременно устанавливалась только одна трубка полного давления.

Трубки Пито устанавливались в пяти контрольных сечениях. Одна из них — для контроля входных условий и режима — устанавливалась на подводящей трубе на расстоянии 90 мм по оси трубы от входа в сборный коллектор (сечение –90). В сборном коллекторе измерения проводились в четырех контрольных сечениях по ходу рабочего тела на расстоянии соответственно 30, 100, 280, 863 мм от нулевого сечения (см. рис. 2). Трубки Пито перемещались вдоль диаметра сборного коллектора. Сборный коллектор вместе с установленными в нем зондами имеет возможность вращаться вокруг своей оси, что позволяет исследовать структуру потока в любой точке контрольного сечения.

Отборы статического давления расположены в девяти точках. Один отбор имеется на верхней поверхности уравнительной камеры. Четыре отбора установлено на подводящей трубе, у сечения –90. Отборы статического давления на сборном коллекторе и подводящей трубе выполнены в сечениях, которые соответствуют входу потока в приемную часть зондов полного давления.

Полное давление в сечении –90 измерялось в 19 точках вдоль диаметра, в сечениях 30, 100, 280, 863 — в 33 точках вдоль диаметра. Измерение полных давлений осуществлялось при 12 углах поворота сборного коллектора с шагом в 15°.

Данные из расчета FlowSimulation сопоставлялись с аналогичными данными для тех же контрольных сечений.

Численное моделирование

Для определения достижения сеточной сходимости произведен ряд расчетов на сетках различной густоты: $6{,}5\cdot10^5$, $2\cdot10^6$ и $3{,}5\cdot10^6$ ячеек. Проведенные расчеты показали, что густота расчетной сетки $3{,}5\cdot10^6$ ячеек — оптимальна, дальнейшее ее сгущение не приведет к существенному уточнению значений целевых параметров. На расчет для $3{,}5\cdot10^6$ ячеек было затрачено порядка 75 часов процессорного времени.

Расчетная модель представляет собой имитацию натурного объекта исследования с соблюдением основных геометрических характеристик.

Анализ полученных результатов

В качестве основных аэродинамических характеристик были приняты коэффициенты местных потерь кинетической энергии $\zeta_{E_к}$ и степени неравномерности потока β.

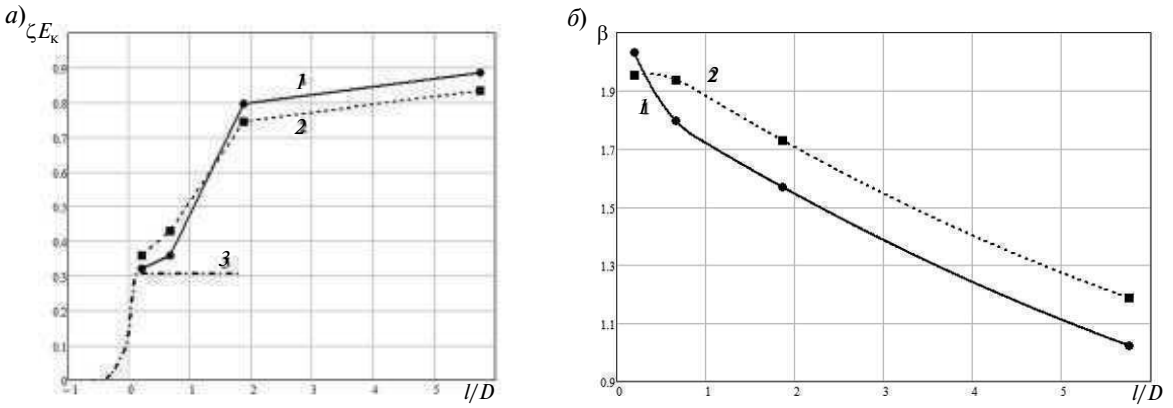


Рис. 3. Зависимости потерь $E_к$ (*а*) и степени неравномерности β (*б*) в контрольных сечениях 30, 100, 280, 863: *1* — эксперимент; *2* — FlowSimulation; *3* — по формуле Борда

На рис. 3 представлены зависимости потерь $E_к$ и степени неравномерности в контрольных сечениях.

Изменение коэффициента потерь кинетической энергии $\zeta_{E_к} = \dfrac{\bar{E}_{к1} - \bar{E}_{к2}}{\bar{E}_{к1}}$ по тракту течения от контрольного сечения $l/D = -0{,}6$ (–90 мм) до $l/D \approx 5{,}8$ (863 мм) представлено на рис. 3, *а* и свидетельствует о существенном возрастании потерь кинетической энергии для модельного тракта до $\zeta_{E_к} = 0{,}8–0{,}9$. Можно выделить область течения до сечения $l/D \approx 1{,}3$, где и происходит основная диссипация кинетической энергии. Следовательно, главная причина повышения потерь во входном тракте — местное сопротивление ввода четырех подводящих труб в сборный коллектор. Следует отметить, что для случая ввода потока одной трубой равной площади оценка коэффициента местного сопротивления по формуле Борда $\zeta_м = \left(1 - \dfrac{4S_{пт}}{S_к}\right)^2$, где $S_{пт}$ — площадь сечения подводящей трубы, $S_к$ — площадь сечения сборного коллектора, дает величину $\zeta_м = 0{,}308$. Это меньше значения, полученного в эксперименте, более чем в 2 раза. Можно сделать предварительный вывод о том, что организация ввода среды в коллектор несколькими трубами (по сравнению с одной центральной трубой равного проходного сечения) всегда будет сопровождаться увеличением местного сопротивления. Это обусловлено тем, что поверхность срывной области при четырех вводах больше, чем для случая с одной подводящей трубой равной площади.

Оценки интегральных потерь по данным эксперимента и численного моделирования отличаются в среднем приблизительно на 10 %, что свидетельствует об их достоверности и практической целесообразности применения пакета FlowSimulation с моделью турбулентности *k*–ε при проектировании трактов подвода.

Расчетами и экспериментально установлено наличие пространственных вихревых областей. При входе потоков в сборный коллектор в придонном пространстве присутствуют кольцевые вихри.

Четыре вихревые зоны расположены между входящими потоками из подводящих труб и внутренней стенкой сборного коллектора. Вихри занимают область от входа потоков в коллектор до контрольных сечений 30, 100 и далее. Условная поверхность разделения присоединяется к стенке в зоне $l/D \approx 1{,}8–2$. Пространственная струя от четырех входов внутри коллектора имеет сужение сечения в области $l/D \approx 0{,}7$, что позволяет отметить существование эффекта Вентури.

Наблюдается также нестационарность изучаемого процесса течения, особенно в области сечений 30 и 100, что подтверждается и результатами численного моделирования.

Изменение неравномерности потока по скорости $\beta = \dfrac{c_{max} - c_{min}}{c}$ в контрольных сечениях вдоль тракта течения представлено на рис. 3, *б* и свидетельствует о высоких уровнях и почти линейном изменении степени неравномерности от 2 до 1. Для натурного тракта подвода длина сборного коллектора соответствует $l/D \approx 0{,}6–$

0,7 и величине $\beta \approx 1{,}9$–$1{,}8$. Такие высокие уровни неравномерности служат источниками дополнительной генерации турбулентности и снижения КПД проточной части ЦВД. Поток высокой неравномерности, переносимый далее в кольцевой объем перед направляющим аппаратом, может быть источником возбуждающих нагрузок, вызывающих вибрацию рабочих лопаток. Для снижения неравномерности потока целесообразно увеличение длины сборного коллектора.

Основные выводы исследования:

Коэффициент потерь кинетической энергии $\zeta_{E_к}$ в модели тракта входа потока в ЦВД турбины АЭС достигает по величине значений 0,8–0,9.

Основной рост потерь кинетической энергии (до 0,6–0,65) характерен для участка сборного коллектора по l/D от 0 до 1,5.

Степень неравномерности β потока в сборном коллекторе изменяется по его длине от 2 до 1. При $l/D \approx 0{,}6$–$0{,}7$, что характерно для натурного входного тракта, $\beta \approx 1{,}9$–$1{,}8$.

Моделирование течения во входном тракте ЦВД турбины АЭС при помощи FlowSimulation с моделью турбулентности k–ε свидетельствует о достаточной практической точности оценок изменения параметров по тракту и его аэродинамических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трояновский, Б.М.** Паровые и газовые турбины атомных электростанций [Текст]: учеб. пособие для вузов / Б.М. Трояновский, Г.А. Филиппов, А.Е. Булкин.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 256 с.

2. **Гурский, Д.А.** Вычисления в Mathcad12 [Текст] / Д.А. Гурский, Е.С. Турбина.— СПб.: Питер, 2006.— 544 с.: ил.

3. Основные элементы SolidWorks [Текст].— SolidWorks Russia., 2010.— 534 с.

4. **Петунин, А.Н.** Методы и техника измерений параметров газового потока [Текст] / А.Н. Петунин.— М.: Машиностроение, 1972.— 332 с.

5. **Повх, И.Л.** Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И.Л. Повх.— Изд. 3-е, доп. и исправл.— Л.: Машиностроение, 1974.— 480 с.

6. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя [Текст] / Пер. с нем.— М.: Наука, 1974.— 712 с.

7. **Алямовский, А.А.** SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев // СПб.: БХВ-Петербург, 2008.— 1040 с.: ил. + DVD— (Мастер).

REFERENCES

1. **Troyanovskiy B.M., Filipov G.A., Bulkin A.E.** Parovye I gazovye turbiny atomnykh elikrostantsiy [Tekst].— Moscow: Energoatomizdat, 1985.— 256 p. (rus.)

2. **Gurskiy D.A., Turbina E.S.** Vychisleniya v Mathcad12 [Tekst].— Saint-Petersburg: Piter, 2006.— 544 p. (rus.)

3. Osnovnye elementy SolidWorks.— SolidWorks Russia. 2010. 534 p. (rus.)

4. **Petunin A.N.** Metody I tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka [Tekst].— Moscow: Mashinostroenie, 1972.— 332 p. (rus.)

5. **Povh I.L.** Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroenii [Tekst].— Leningrad: Mashinostroenie, 1974.— 480 p. (rus.)

6. **Shlikhting G.** Teoriya pogranichnogo sloya [Tekst].— Moscow: Nauka, 1974.— 712 p.

7. **Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B.** SolidWorks 2007/2008. Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Tekst].— Saint-Petersburg, BKHV-Peterburg, 2008.— 1040 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАСКИН Александр Степанович — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: a.s.laskin@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Игорь Александрович — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com

AUTHORS

LASKIN Alexander S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: a.s.laskin@mail.ru

KUDRYAVTSEV Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 681.51

В.Е. Брунман, А.В. Коняшин, А.П. Петкова,
А.В. Смородов, Ф.И. Кочанжи

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛЯТОРА УСТАНОВОК МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ С ВЫСОКИМ КПД

V.E. Brunman, A.V. Konyashin, A.P. Petkova,
A.V. Smorodov, F.I. Kochanzhi

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES AND SYSTEM OF ADAPTIVE CONTROL FOR WATER DISINFECTION USING MEMBRANE ELECTOLYSIS WITH HIGH EFFICIENCY

Были разработаны, изготовлены и испытаны комплексная система управления станцией обеззараживания воды с учетом существующих на рынке зарубежных и отечественных электролизеров, а также регулятор выработки анолита для обеззараживания воды в установках мембранного электролиза. Разработаны принципы адаптивного управления электрохимическим синтезом в реакторе электролизеров и создания единой комплексной системы управления станциями обеззараживания. Проведена оценка эффективности комплексной системы управления.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. СТАЦИЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЭЛЕКТРОЛИЗЕР. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ.

Taking into account particulars of the existing in the market foreign and domestic electrolytic disinfection systems the design, manufacture and usage of the integrated management system of water disinfection station were developed. In the course of the work were development of control system of anolyte production for disinfection of water in the membrane electrolysis facilities, development of the principles of adaptive management of the electrochemical synthesis and creation of a single integrated control system for disinfection stations, the efficiency of the integrated management system was evaluated later on.

ADAPTIVE CONTROL. WATER DISINFECTION STATION. CONTROL SYSTEM. ELECTROLYTIC WATER.

Анализ существующих на рынке зарубежных аналогов отечественных электролизеров с ионселективной диафрагмой показал, что данные конструкции предусматривают оснащение системой контроля и управления внешними параметрами электролиза (расход, давление, сила тока, концентрация исходного солевого раствора). Однако описанные системы контроля используются только для слежения за внешними параметрами процесса электролиза. Между тем полученные зависимости КПД от режимов работы электролизера могут быть использованы для построения посредством дистанционного мониторинга «обратной связи» с электролизной установкой и управления синтезом анолита через сеть интернет и посредством GPRS модема. Такой подход позволяет оптимизировать внешние параметры процесса электрохимической активации для получения параметров анолита (католита) в требуемом диапазоне. На основе сбора и анализа этих параметров может быть построен алгоритм оптимального управления установками электролиза для обеспечения заданного уровня концентрации хлора в питьевой воде при одновременной минимизации ресурсопотребления установки и максимально бы-

строй ее реакции на возможные колебания расхода воды. Однако в открытых публикациях об отечественных и зарубежных конструкциях электролизеров сведения о такой системе отсутствуют [1–8].

Поэтому для разработки оптимального алгоритма управления установками электролиза экспериментальный малогабаритный биполярный электролизер был оснащен автоматизированной системой управления (АСУ) мембранным электролизером, которая обеспечивает процесс обеззараживания воды, включая управление элементами мембранного электролизера, регулирование параметров рабочих компонентов по заданным алгоритмам, сбор, регистрацию, отображение, хранение и обработку информации всех необходимых сигналов и параметров процесса электролиза*. Адаптивное управление экспериментальным мембранным электролизом осуществлялось АСУ, построенной на базе программируемых контроллеров автоматизации CompactRIO производства компании «National Instruments» (США). Программное обеспечение АСУ создано в среде графического программирования LabVIEW производства компании «National Instruments» (США).

Предлагаемая двухуровневая система контроля процесса электролиза, кроме перечисленных параметров, которые относятся к работе конкретного электролизера (нижний уровень сбора информации), на верхнем уровне обеспечивает передачу информации на централизованный пульт управления, ее обработку, позволяет управлять с удаленным доступом (с пульта управления) параметрами работы группы объединенных в сеть электролизных станций, вести сбор информации, контроль и оптимизацию процесса электролиза. АСУ позволяет в зависимости от потребления (расхода) воды, который меняется в течение суток, задавать алгоритм снижения концентрации хлора в очищаемой воде пропорционально фактическому расходу воды и соответственно снижать расход электроэнергии пропорционально снижению концентрации хлора в очищаемой воде [2].

Для отработки предлагаемого алгоритма экспериментальная электролизная установка на базе мембранного электролизера была оснащена автономной системой управления мембранным электролизером (АСУ МЭ), которая обеспечивает управление его элементами, регулирование параметров рабочих компонентов по заданным алгоритмам, сбор, регистрацию, отображение, хранение и обработку информации всех необходимых сигналов и параметров процесса электролиза, а также управление процессом через сеть интернет и посредством GPRS [3].

Структура АСУ МЭ — централизованная (управление из единого центра или группы взаимосвязанных центров) и строится по иерархическому принципу [4]:

на нижнем уровне реализуются автоматические функции управления ходом процесса электролиза (реализация алгоритмов), функции контроля и регулирования переменных сигналов;

на верхнем уровне отрабатывается функции обеспечения деятельности персонала — отображение информации о ходе электролиза, выдача заданий по непосредственному управлению устройствами, управление выполнением функций контроля и регулирования (запуск/останов, включение/выключение, изменение установок, то есть заданных значений регулируемых переменных, и настроек), конфигурирование алгоритмов управления.

Математическое моделирование процесса функционирования установки мембранного электролиза реализовано в программном комплексе LabVIEW-2011. Создана автоматизированная система управления оборудованием, входящим в состав индивидуального оснащения станции обеззараживания жилого или общественного комплекса зданий.

Операторская панель управляющей программы по моделированию функционирования станции обеззараживания представлена на рис. 1, фрагмент блок-диаграммы в среде графического программирования LabVIEW функционирования моделируемой станции обеззараживания приведен на рис. 2.

При формировании управляющего синусоидального сигнала с частотой 50 Гц было принято, что один цикл должен содержать 10 точек; таким образом, формируется массив точек который далее через FIFO буфер передается на ПЛИС и поступает на ПИД регулятор в виде задающего сигнала [5].

* Работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы

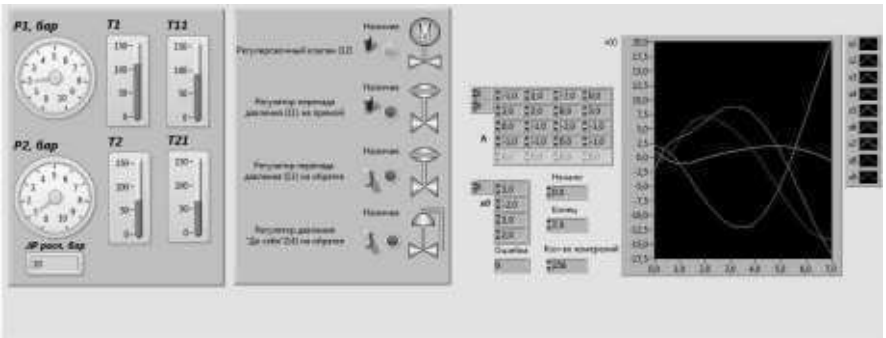


Рис. 1. Операторская панель прибора по моделированию функционирования станции обеззараживания

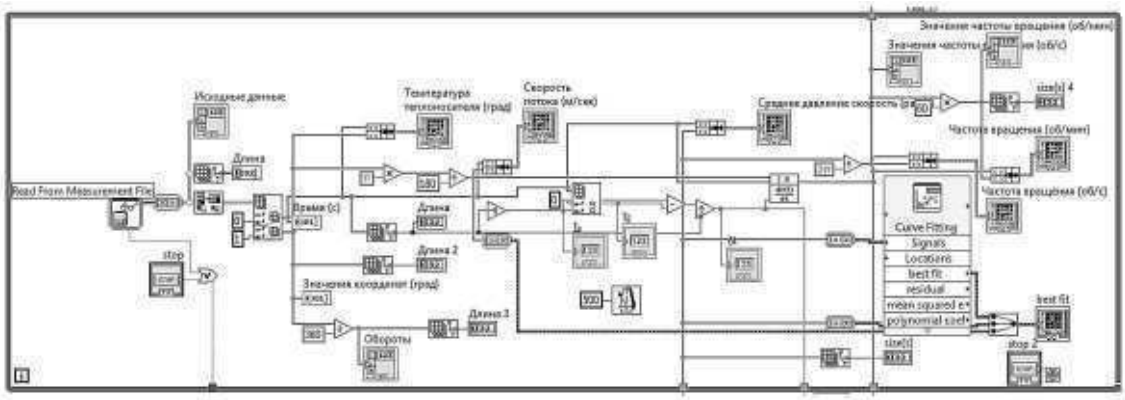


Рис. 2. Фрагмент блок-диаграммы функционирования моделируемой станции обеззараживания

ПИД регулятор сравнивает полученные значения и текущие измеренные значения сигнала, полученные по каналу обратной связи, и формирует управляющий сигнал, который далее поступает на исполнительный механизм (гидроцилиндр мембранного электролизера и/или мембранные насосы).

Была установлена частота дискретизации измеренного сигнала по каждому измерительному каналу 1000 измерений/с. Массив 4000 точек/с через FIFO буфер передается на контроллер, где результаты измерений калибруются (преобразование электрического сигнала в параметры потока перемещения и остаточного хлора в системе), далее массив из 8000 точек/с передается на ПК. Результаты измерений сохраняются одновременно в двух форматах — TDMS и .txt.

При максимальной частоте работы машины 100 циклов выработки хлора соответствует 20 000 с (примерно 5,5 час.), или 20 млн точек по каждому измерительному каналу. Разработанное решение реализовано на уровне ПК. Счетчик определяет количество массивов данных, записанных в файл. Когда объем данных становится равным или большим, чем указал оператор, файл закрывается и создается новый с тем же именем, но следующим порядковым номером начиная с нуля, и запись продолжается в него, и т. д. В файле также сохраняются все данные о процессе обеззараживания — условия, параметры и т. п. Параллельно данные сохраняются в формате .txt, условия сохранения данных — аналогичные [6].

По результатам моделирования произведен выбор основных элементов станции обеззараживания, определены предельные и номинальные характеристики и режимы, разработан интерфейс системы мониторинга и управления станцией обеззараживания. На рис. 3 представлена операторская панель автоматизированной

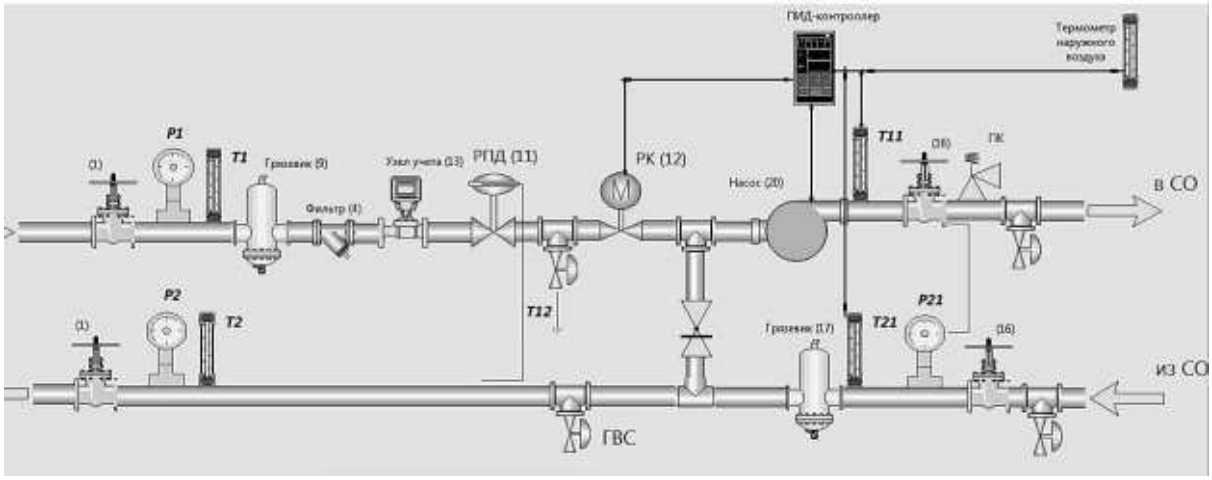


Рис. 3. Панель мониторинга станции обеззараживания

системы управления, предназначенной для осуществления мониторинга. Исходные данные для прибора — требуемый режим обеззараживания, температура, концентрация и скорость потока дезинфектанта, а также параметры запорной и регулирующей арматуры.

Оптимальным решением для системы управления уровнем воды является объединение всех ее компонентов — подсистем измерения и управления — в рамках единой системы, обеспечивающей все функции заявленных подсистем. Такая единая система строится на базе магистрально-модульных платформ, обеспечивающих управление вводом/выводом данных с единого контроллера, соединенного с модулями ввода/вывода сигналов по скоростной шине данных. Использование системы единого времени для всех компонентов АСУ СО представляется одним из наиболее значимых моментов в контексте управления комплексными станциями обеззараживания, состоящими из нескольких установок мембранного электролиза.

На следующем этапе разрабатывались алгоритмы внешнего управления качеством водоподготовки при помощи автоматизированной системы управления станцией обеззараживания. Алгоритм должен учитывать следующие сферы управления [7, 8]:

регулирование параметров мембранного электролизера и управление режимами его работы;

реализацию алгоритмов аварийной защиты;

регистрацию, отображение и обработку медленно- и быстроменяющихся параметров мембранного электролизера.

Комплект станции обеззараживания воды на основе мембранных биполярных электролизеров включал следующее оборудование:

электролизер типа МБЭ — 3 шт. (схема подключения на рис. 4);

источник постоянного тока ZF-1500A-12V–3 шт;

растворный солевой бак объемом 1400 л, оборудованный смесительным устройством — 1 шт.;

промежуточную емкость объемом 1400 л — 1 комплект;

емкость объемом 1000 литров для сбора католита — 2 шт.;

насос погружной Grundfos Unilift AP12–2 шт.;

накопительную емкость чистой воды объемом 1600 литров — 2 шт.;

насос-дозатор воды Etatron BT-MF производительностью 80 л/ч — 3 шт.;

насос-дозатор рассола Etatron BT-MF производительностью 80 л/ч — 3 шт.;

прибор контроля общего, остаточного хлора HACH 9184–1 компл.,

эжектор — 2 шт.;

трубопроводы, фитинги и запорная арматура — 1 компл.;

соединительные силовые шины — 3 компл.;

модуль контроля загазованности помещения хлор/водород — 1 компл.;

блок управления и автоматики compactRIO — 1 шт.

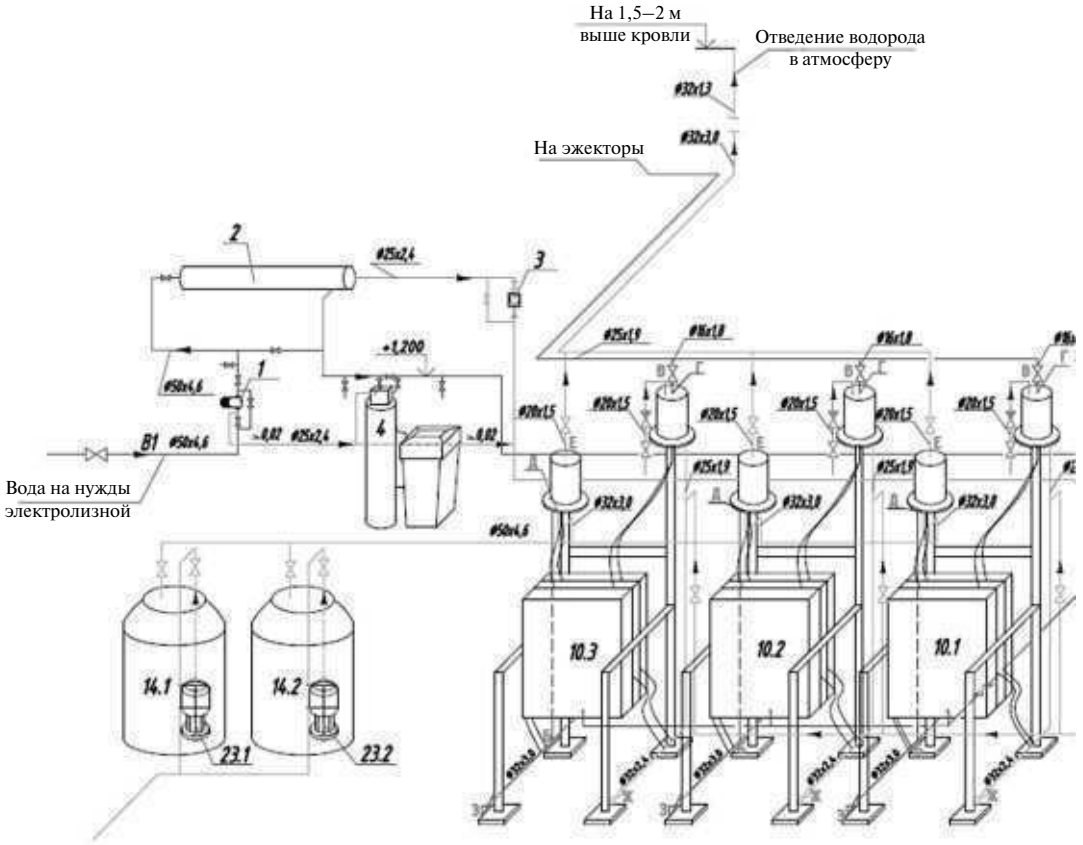


Рис. 4. Схема соединений основного оборудования

Затем была произведена проверка возможностей оборудования и программного обеспечения системы АСУ МЭ по обработке сигналов с подключенного к модулю аналогового ввода контроллера автоматизации датчика прибора контроля общего, остаточного хлора HACH 9184 производства компании «HACH-Lange» (США–Германия). С помощью измерительного преобразователя CompactRIO, входящего в состав АСУ МЭ, осуществлялась оцифровка с частотой 10 кГц сигнала с датчика контроля общего, остаточного хлора, установленного на выходе мембранной электролизной установки. Затем производилась обработка полученных данных с помощью алгоритмов фильтрации, имеющихся в составе программного обеспечения АСУ МЭ.

Для необходимой в будущем синхронизации сбора данных с контроллеров, установленных на разных мембранных электролизерах станции обеззараживания и водоподготовки, использовался сигнал GPS приемника, подаваемый на один из дифференциальных входов модуля аналогового ввода. Результаты измерений были представлены в формате числовых данных, графиков и диаграммы.

Как показали проведенное тестирование, а также опыт внедрения и эксплуатации систем регулирования на других установках мембранного электролиза, для эффективной работы таких систем требуется высокоточная фильтрация сигналов с датчиков от электромагнитных помех и технологических шумов, а также последующая их математическая обработка. Для такой фильтрации применялись программные цифровые фильтры контроллера автоматизации CompactRIO.

Дальнейшая математическая обработка производилась как в контроллере, так и на сервере сбора данных, в том числе и с помощью приложений, разработанных с помощью средств программного обеспечения АСУ МЭ. Выделен-

ный полезный сигнал после цифровой обработки программным обеспечением АСУ МЭ и исходный сигнал от датчика прибора контроля остаточного хлора HACH 9184, полученный через порт Ethernet от контроллера АСУ МЭ CompactRIO, изображены на рис. 5.

Результаты проведенного тестирования показывают, что контроллер АСУ МЭ по своим возможностям полностью удовлетворяет целям сбора, скоростной обработки технологических сигналов и выдачи команд управления в производственных условиях станций обеззараживания и водоподготовки, а программное обеспечение АСУ МЭ обеспечивает простоту разработки, открытость и легкость понимания алгоритмов скоростной обработки и графической визуализации технологических сигналов состояния оборудования и телеизмерений давления в составе систем мембранного электролизера.

Созданная подсистема круглосуточного управления процессами хранения и распределения воды внутри станции обеззараживания позволяет существенно автоматизировать процесс производства, устранить перебои в поставке воды и, как следствие, повысить качество обеззараживания.

Непрерывный контроль уровня воды, а также распределения очищенной воды по соответствующим бакам и анолита для эжекций на станции обеззараживания осуществляется автоматизированной системой управления станцией обеззараживания (АСУ СО).

Распределенная подсистема АСУ СО включает в свой состав 3 измерительных станции, каждая из них представляет собой независимый контроллер CompactRIO, основными функциями которого является непрерывное измерение уровня жидкости в емкости и управление клапанами и насосами при достижении заданных уровней. Информация о работе всех станций передается по сети Ethernet на центральный пульт оператора. Каждая станция обеспечивает измерение уровня посредством микроволнового датчика уровня LFT. При достижении заданных критических уровней станция формирует дискретные команды на включение/ выключение мембранных насосов и открытие/закрытие клапанов. В процессе работы системы осуществляется автоматический контроль и отображение уровня жидкости, световая и звуковая сигнализация, а также регистрация тревожных сообщений.

В качестве интерфейса пользователя системы выступает программное обеспечение центрального пульта управления (ЦПУ). На вкладках ЦПУ оператора отображаются состояния емкостей и всех механизмов. В системе предусмотрены процедуры ручного взаимодействия со станциями, калибровки измерительных каналов, настройки параметров программы и оборудования, а также справочная система [9].

Подсистема управления может быть расширена как по количеству станций, так и по количеству, а также номенклатуре измерительных

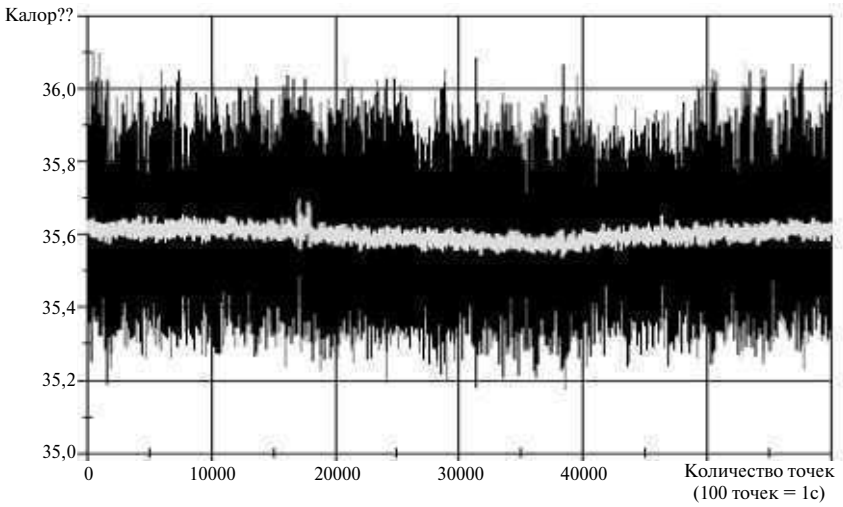


Рис. 5. Исходный сигнал от датчика остаточного хлора HACH 9184 и выделенный полезный сигнал после цифровой обработки программным обеспечением АСУ МЭ

каналов. Созданная подсистема управления в составе комплексной АСУ СО обеспечивает круглосуточное управление процессами хранения и распределения воды внутри станции обеззараживания, что позволяет существенно автоматизировать процесс производства, устранить избыток хлора в обеззараживаемой воде и, как следствие, повысить качество обеззараживания.

В работе реализована возможность удаленного мониторинга параметров станций обеззараживания и создания карты с указанием параметров остаточного хлора в результате водоподготовки на станциях обеззараживания. Собранные данные передаются модулями на шлюз. Так как один из модулей достаточно удален от точки приема, то для сохранения связи используется дополнительный беспроводной модуль в режиме роутера. На шлюзе происходит усреднение значений и их запись в сетевые переменные. При этом значение остаточного хлора на станции обеззараживания и метка соответствующего времени записываются в файл на сервере.

Имеющиеся библиотеки для баз данных были переработаны с целью увеличения стабильности соединения. Переменные, в свою очередь, передают данные на устройства, обеспечивающие отображение операторского интерфейса HMI. На том же компьютере работает web-сервер, который позволяет удаленно наблюдать за изменениями показателей остаточного хлора. В результате ту же лицевую панель можно наблюдать в реальном времени с любого устройства, обладающего доступом в интернет и браузером.

Переменные, в которые были записаны данные, могут быть также переданы по сети Wi-Fi и считываться мобильными устройствами, имеющими необходимое программное обеспечение. Использование приложения Dashboard для мобильных устройств на базе операционных систем Google Android и Apple iOS позволяет сохранять единожды созданную лицевую панель в одном из «облачных» сервисом и затем открывать ее на любом iPad или iPhone, а также на любом устройстве с операционной системой Android при наличии в нем данного приложения и зарегистрированного в «облаке» аккаунта [10].

Интерфейс оператора обеспечивает и возможности калибровки каналов измерения потока, перемещения и остаточного хлора в системе, а также возможность подбора параметров ПИД регулятора с сохранением коэффициентов в файле. Разработанная автоматизированная система управления успешно дополнит комплексную АСУ СО, обеспечит удобство работы оператора в управлении установками МБЭ и существенно повысит возможности учета результатов обеззараживания за счет сохранения данных в электронном виде.

КПД оборудования по выработке дезинфектанта имеет широкий разброс величин в зависимости от конструктива, технологии выработки дезинфектанта, эффективности работы вспомогательного оборудования, качества сырья и технического состояния установки. Зависимость концентрации оксидантов в анолите от внешних параметров процесса электролиза в экспериментальной установке МБЭ приведена на рис. 6 и описывается выражением $C_{ox} = kI/\text{P}$, $q = I/\text{P}$, где I — сила тока, А; P — расход воды, л/ч; q — удельное количество электричества, А×ч/л.

Рекомендовано использование полученных результатов для создания автономных систем управления электролизными установками в составе станций обеззараживания, в которых предусмотрены процессы технической диагностики и выдача внешних параметров в регулирующие

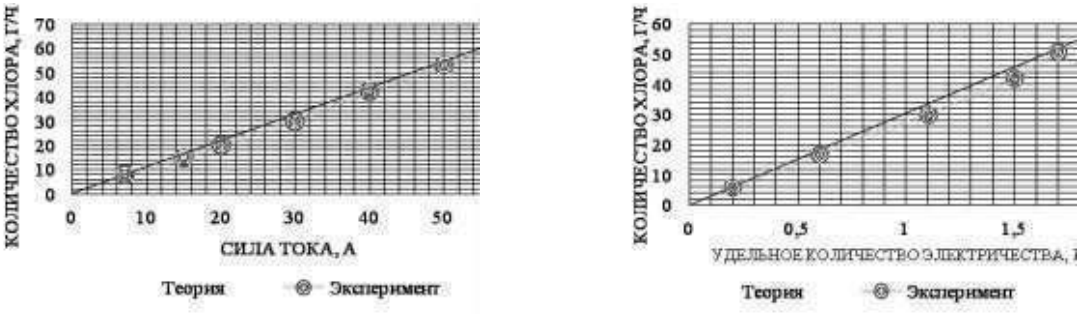


Рис. 6. Зависимость производительности установки МБЭ по хлору от внешних параметров процесса электролиза

органы. Результаты работы предназначены для создания автономных систем управления электролизными установками, осуществляющих процесс технической диагностики, сбор и выдачу внешних параметров на пульт дистанционного управления. Полученные результаты первоначально планируются к внедрению на территории Северо-Запада, а также в структурах Росприроднадзора и МЧС России. Имеется перспектива экспорта разработанного устройства электролиза с АСУ СО зарубежным потребителям аналогичного оборудования.

Испытания комплексной системы управления станцией обеззараживания показало, что система обеспечивает удобство работы оператора в управлении установками МБЭ и существенно повышает возможности учета результатов обеззараживания за счет сохранения данных в электронном виде.

Использование контроллера реального времени NI compactRIO в составе АСУ СО в сочетании с разработанным алгоритмом управления мембранного электролизера обеспечивает возможность точного управления динамическими гидросистемами и исполнительными механизмами.

Получены зависимости КПД от режимов работы электролизера, позволяющие оптимизировать внешние параметры процесса электролиза в установках МБЭ для получения параметров анолита в требуемом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст] / Под ред. К.А. Пупкова Н.Д. Егупова.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

2. **Аврамчук, В.С.** Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения [Текст] / В.С. Аврамчук, Н.Л. Бацева.— Томск, 2003.

3. **Скворцов, О.Б.** Комплексная система мониторинга и защиты гидроблоков. [Электрон. ресурс] / О.Б. Скворцов, Е.С. Трунин.— Russia power. HydroVision Russia. 2011.— 28–30 марта 2011, PennWell, Конференция

4. **Ту, Ю.** Современная теория управления [Текст] / Ю. Ту / Пер. с англ. Я.Н. Гибадуллина; Под ред. В.В. Солодовникова.— М.: Машиностроение, 1971.

5. **Бесекерский, В.А.** Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов.— М.: Наука, главн. ред. физ.-мат. лит., 1972.— 768 с.

6. **Евдокимов, Ю.К.** LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора: Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW [Текст] / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков.— М.:ДМК Пресс, 2007.— 400 с.

7. **СТО 17330282.27.140.001–2006.** Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций [Текст] / Некоммерческое партнерство «Гидроэнергетика России» ОАО «Инженерный центр ЕЭС— Филиал «Фирма ОРГРЭС».— М., 2006.— 620 с.

8. **СТО РусГидро 02.01.059–2011.** Гидроэлектростанции. Мониторинг технического состояния основного оборудования. Нормы и требования [Текст] / РусГидро.— М., 2011.— 42 с.

9. **Биргер, И.А.** Техническая диагностика [Текст].— М.: Машиностроение, 1978.— 240 с.

10. **Андриянов, А.В.** Цифровая обработка информации в измерительных приборах и системах [Текст] / А.В. Андриянов, И.И. Шпак.— Минск: Вышэйшая школа, 1987.— 176 с.

REFERENCES

1. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia [Tekst] // Podred. K.A. Pupkova, N.D. Egupova.— M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2004. (rus.)

2. **Avramchiuk V.S., BatsevaN.L.** Funktsional'nyi control' I diagnostika elektrotekhicheskykh I electromekhanicheskikh system I ustroistv po tsyfrovym otschiotam mgnovennikh znachenii toka I napriazheniia [Tekst].— Tomsk, 2003. (rus.)

3. **Skvortsov O.B., Trunin E.S.** Kompleksnaia sistema monitoring I zashchity gidroblokov. [Electron. resurs].— Russia power Hydro Vision Russia. 2011.— 20–28 marta 2011, PennWell, Conferentsiia. (rus.)

4. **Tu Yiu.** Sovremennaia teoriia upravleniia [Tekst] / Per. s angl. Ya.N. Gibafullina; Pod red. V.V. Solodovnikova.— M.: Mashinostroenie, 1971. (rus.)

5. **Besekerskii V.A., Popov E.P.** Teoriia system avtomaticheskogo regulirovaniia [Tekst].— M.: Nauka, glavn. red. fiz.-mat. lit., 1972.— 768 s. (rus.)

6. **Evdokimov Yu.K., Lindval' V.R., Shcherbakov G.I.** LabView dlia radioinzhenera ot virtual'noi modeli do real'nogo pribora. Praktichskoe rukododstvo dlia raboty v

programmnoi srede LabView [Tekst].— M. DMK Press, 2007.— 400 s. (rus.)

7. **STO 17330282.27.140.001–2006.** Metod(rus.)ki otsenki tekhnicheskogo sostoianiia osnovnogo oborudovaniia gidroelectrostantsii [Tekst] / Nekommercheskoe partniorstvo «Gidroenergetika Rossii». OAO «Inzhenernyi tsentr EES — Filial «Firma ORGRES».— M., 2006.— 620 s. (rus.)

8. **STO RusGidro 02.01.059–2011.** Gidroelektrostantsii. Monitoring tekhnicheskogo sostoianiia osnovnogo oborudovaniia. Normy i trebovaniia [Tekst].— M., 2011.— 42 s. (rus.)

9. **Birger I.A.** Tekhnicheskaia diagnostika [Tekst].— M.: Mashinostroenie, 1978.— 240 s. (rus.)

10. **Andriianov A.V., Shpak I.I.** Tsyfrovaia obraborka informatsii v izmeritel'nykh priborakh I sistemakh [Tekst].— Minsk.: Vysheishaia shkola, 1987.— 176 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТКОВА Ани Петровна — доктор технических наук профессор кафедры технологий конструктивных материалов и материаловедения Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, Санкт-Петербург,ул. Политехническая 29, e-mail: apetkova@inbox.ru.

СМОРОДОВ Андрей Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры автоматов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29

КОНЯШИН Александр Викторович — аспирант кафедры автоматов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: akonyashin@ya.ru

КОЧАНЖИ Федор Иванович — студент кафедры автоматов Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: fred_1990@list.ru.

БРУНМАН Владимир Евгеньевич — кандидат экономических наук доцент кафедры электротехники и электроэнергетики Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, e-mail: brunman@yandex.ru.

AUTHORS

PETKOVA Ani P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; E-mail: apetkova@inbox.ru.

SMORODOV Andrey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29,

KONYASHIN Alexander V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya St. 29, Petersburg, Russia; e-mail: akonyashin@ya.ru

KOCHANZHI Fiodor I. — St. Petersburg State Polytechnical University. 9, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia, 195251; e-mail: fred_1990@list.ru

BRUNMAN Vladimir E. - St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya St. 29, Petersburg, Russia; e-mail: brunman@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 681.7.036

В.Е. Рогалин, И.С. Ценина, И.А. Каплунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗОТОПИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНИЯ

V.E. Rogalin, I.S. Tsenina, I.A. Kaplunov

EFFECT OF ISOTOPIC PURITY ON THE OPTICAL PROPERTIES OF GERMANIUM

Исследованы оптические свойства монокристаллов германия природного изотопического состава и изотопически чистых монокристаллов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge. Обнаружена зависимость снижения частоты максимумов полос фононного поглощения в германии с ростом массового числа.

МОНОКРИСТАЛЛЫ. ГЕРМАНИЙ. ИЗОТОПЫ. ИНФРАКРАСНАЯ ОПТИКА. ФОНОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ.

A study is made of the optical properties of germanium single crystals with natural isotopic composition and isotopically pure crystals of ^{70}Ge и ^{74}Ge. A dependence is found of the decrease of the frequency of phonon band absorption maxima with the increase of the germanium mass number.

SINGLE CRYSTALS. GERMANIUM. ISOTOPES. INFRARED OPTICS. PHONON ABSORPTION.

К особенностям германия как промышленного материала относится то, что для большинства практических применений пригодны его монокристаллы с содержанием посторонних примесей на уровне 10^{-10} вес. % и ниже. Поэтому физика и химия процессов, происходящих в германии, исследована подробно, при этом большинство данных получено на материале природного изотопического состава. Природный германий (атомный номер — 32, атомная масса — 72,59) состоит из смеси пяти изотопов с массовыми числами 70, 72, 73, 74, 76. Поскольку разделение изотопов — технически крайне сложный и дорогостоящий процесс, в литературе почти отсутствуют сведения о влиянии изотопического состава на физические свойства кристаллов. Однако еще в 1942 году И.Я. Померанчуком было предсказано, что изотопический беспорядок даже в химически чистых и структурно совершенных кристаллах приводит к снижению коэффициента теплопроводности [1, 2]. В работах [3, 4] этот эффект экспериментально исследован в монокристаллах на основе изотопов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge; показано, что изотопически чистый германий может иметь теплопроводность в 8,5 раз выше, чем у кристалла природного состава, что связано с характером фононного спектра. В работе [5] теоретически обоснованы механизмы влияния изотопического состава на теплопроводность кристаллов германия.

Полосы поглощения германия в области длин волн 12–17 мкм обусловлены взаимодействием света с фононами [6]. Теоретические и экспериментальные исследования влияния изотопического состава германия на поглощение в этой области отсутствуют, и в нашей работе ставилась задача оценить влияние изотопического состава на оптический спектр монокристаллического германия. Изучалась зависимость спектра пропускания кристаллов в инфракрасном диапазоне длин волн для германия природного и изотопического состава и изотопов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge.

Исследования оптического пропускания германия

Измерения проведены на двухлучевом ИК-спектрофотометре «Hitachi-225». Методика измерений и оценка точности в зависимости от методов измерений пропускания и от качества обработки образцов приведена в работах [6–8].

Согласно методикам и нашему анализу условий получения максимально точных значений

коэффициентов пропускания спектрофотометрическими методами с погрешностью измерения величины волнового числа ν порядка 1 $см^{-1}$ были изготовлены образцы в форме плоскопараллельных пластин с кристаллографической ориентацией <111> и <100> и диаметром до 30–45 мм. Толщина образцов 12–22 мм обеспечивала получение фактического значения коэффициента пропускания в области максимальной прозрачности не менее 0,4 и позволяла надежно выявить положение исследуемых фононных пиков поглощения в области 12–17 мкм. Погрешность в измерении коэффициента пропускания составляла 0,5 %. Рабочие поверхности пластин были отполированы по IV классу (ГОСТ 11141–76), шероховатость полированных поверхностей соответствовала $R_z \le 0{,}05$ мкм (на базовой длине 0,08 мм по ГОСТ 2789–73). Кристаллы полировались по специально разработанной технологии химико-механической оптической обработки.

Ранее [6] при проведении подобных измерений было обнаружено, что клиновидность образцов оказывает значительное влияние на величину измеренного пропускания образца. Клиновидность образцов (или поворот кристалла на некоторый угол) используется в специальных методах [7] с целью устранения попадания в фотоприемник лучей, многократно отраженных от внутренних поверхностей кристалла. В этом случае соответствующая величина — коэффициент направленного пропускания τ_λ в отличие от обычного коэффициента пропускания T, не является общепринятой. Кроме того, для германия она меньше примерно на 7 %. Следовательно, клиновидность (или поворот кристалла, неправильная его установка в приборе) может привести к ошибке в измерениях до 7 %. Сочетание указанных обстоятельств определило не только выбор стандартной плоскопараллельности образцов, но и технические меры для достижения максимально возможной плоскопараллельности.

Наш опыт показывает, что интерференционные полосы могут давать биения в спектре пропускания сравнительно тонких (порядка 100 мкм) образцов. Этот эффект обычно используется для измерения толщины образцов, которая может определяться по интерференционным максимумам в спектре на основе формулы

$$d = N / \left(2\nu_1 n_1 - \nu_2 n_2\right), \qquad (1)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления материала соответственно для волновых чисел ν_1 и ν_2; N — число интерференционых максимумов. Точность определения d в этом случае не хуже 1 мкм.

В «толстых» образцах при исследовании спектров пропускания влияния интерференции мы не наблюдали.

Исследование спектральных зависимостей проводили на ИК-спектрофотометре «Hitachi-225», который предназначен для регистрации спектров пропускания с учетом многократного отражения в спектральном диапазоне от 4200 до 400 $см^{-1}$. Градуировка прибора обычно производится по эталонным спектрам (нормали), волновые числа, максимумы, полосы поглощения которых точно известны (например, для полистирола). Для повышения качества регистрации спектра поглощения исследуемым веществом желательно устранить сигнал фона, связанный с поглощением атмосферными газами, влиянием теплоизлучения кюветного пространства и т. д. В спектрофотометре используется двухлучевая схема, позволяющая компенсировать фоновый сигнал. Измеряется интенсивность двух световых потоков — прошедшего через образец и прошедшего в атмосфере по оптической схеме прибора — в зависимости от длины волны.

Источник излучения в приборе — глобар — представляет собой стержень из карбида кремния диаметром 5 мм и длиной порядка 40 мм, нагреваемый пропускаемым через него электрическим током до температуры порядка 1200–1400 °C. Рабочий диапазон излучения глобара — 0,8–50 мкм. Форма кривой распределения энергии близка к форме кривой излучения абсолютно черного тела. В качестве приемника излучения используется болометр, принцип действия которого основан на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента при нагревании. Инфракрасное излучение, попадающее на болометр, вызывает слабый ток малого напряжения, который усиливается с помощью усилителя переменного тока и затем фиксируется в виде записи спектральной кривой.

Принцип действия спектрофотометра при работе по двухлучевой схеме основан на нулевом методе. Радиация от источника излучения направляется двумя пучками, в одном из которых

помещается исследуемый образец, в другом — фотометрический клин. Фотометрические свойства световых пучков одинаковы. Оба пучка направляются на зеркальный модулятор, который попеременно пропускает их в монохроматор. При отсутствии поглощения в обоих пучках на болометр попадают световые потоки одинаковой интенсивности, на входе усилительной системы при этом сигнал отсутствует.

При наличии поглощения в одном из пучков на болометр падают потоки различной интенсивности, в результате чего возникает переменный сигнал, частота которого равна частоте прерывания. Этот сигнал после усиления и преобразования подается на обмотку электродвигателя отработки, который перемещает фотометрический клин, уменьшая до нуля возникшую разность интенсивностей пучков. Фотометрический клин связан с регистрирующим устройством, где фиксируются (на бумажном носителе, в цифровом виде) значения пропускания T в зависимости от волнового числа (длины волны излучения).

Для экспериментов использовали образцы изотопически чистых монокристаллов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge, технология получения и свойства которых описаны в работах [3, 4]. Германий изготавливался центробежным методом разделения изотопов в Институте молекулярной физики РНЦ «Курчатовский институт»; для исследований были получены изотопы ^{70}Ge и ^{74}Ge с обогащением 99,99 %. В Лаборатории им. Лоуренса в Беркли была проведена тонкая химическая очистка материала методом многократной (33 прохода) зонной плавки. Очищенные таким образом слитки ^{70}Ge и ^{74}Ge применялись в качестве исходного сырья для выращивания монокристаллов германия *n*-типа методом Чохральского. Удельное сопротивление монокристаллов обоих изотопических составов было 65 Ом·см. Повышенное удельное электросопротивление — выше 47 Ом·см при температуре 23 °C (что соответствует теоретической концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике равной $2{,}4\cdot10^{13}$ см$^{-3}$) может быть связано со структурой образцов (плотность дислокаций $\sim 5\cdot10^{4}$ см$^{-2}$), которая могла влиять на рассеяние носителей заряда на дефектах решетки.

Монокристаллы германия природного изотопического состава были выращены на Запорожском титано-магниевом комбинате и в Тверском государственном университете из заведомо разных партий исходного сырья двумя методами — Чохральского и Степанова [9]. В качестве исходного сырья использовали зонноочищенный поликристаллический германий (марки ГПЗ) с удельным сопротивлением материала более 47 Ом·см (при температуре 23 °C).

Германий широко применяется в ИК-оптике, преимущественно в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм, однако присутствующие в этой области полосы фононного поглощения заметно ограничивают его применение. Эти полосы поглощения хорошо изучены, и их положение в спектрах кристаллов природного изотопического состава практически является константой материала. Германий также используется в полупроводниковой технике для создания высокочувствительных детекторов, фотоприемников и других полупроводниковых приборов и материалов. Как для оптического, так и для детекторного и других применений германия в электронике важна температурная стабильность работы, что впрямую связано с теплопроводностью материала (известно, что рабочая температура германия ограничена температурой 70 °C, и важно при работе обеспечивать хороший теплоотвод от кристалла).

Согласно теоретическим представлениям поглощения света кристаллической решеткой в одноатомных полупроводниках типа германия и кремния наблюдается многофононное поглощение света, связанное как с оптическими (продольные (TO) и поперечные (LO)), так и с акустическими (по аналогии — TO и LO) модами [10]. Выполненные нами спектральные исследования не выявили влияния ориентации и технологии выращивания на положение максимумов фононных полос поглощения в спектре пропускания образцов. Спектры пропускания германия изотопического состава $M = 70$ и $M = 74$ приведены на рис. 1. В таблице и на рис. 2 приведены частоты ν, измеренные экспериментально и рассчитанные по аппроксимационным зависимостям (2), для трех характерных максимумов фононных полос поглощения германия в исследованных кристаллах. Обнаружено, что решеточные пики поглощения на частотах ν, равных 850, 755, 650 см$^{-1}$, наблюдаемые в монокристаллах германия природного изотопического состава, в моноизотопных

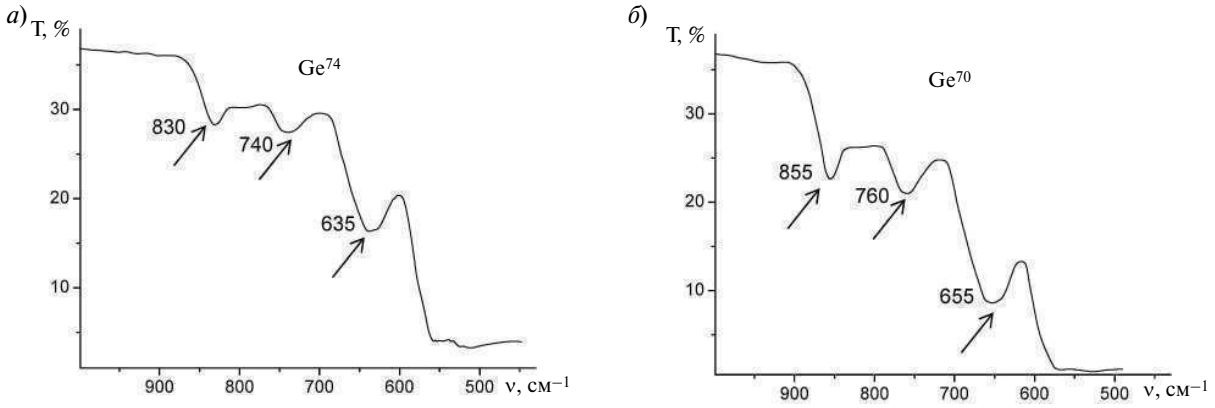


Рис. 1 — Спектральные зависимости изотопов германия: *а* — $M = 74$, толщина образца 12 мм; *б* — $M = 70$, толщина образца 22 мм (стрелками показаны максимумы фононных полос поглощения с указанием соответствующих волновых чисел)

Положение максимумов фононных полос поглощения в кристаллах германия различного изотопного состава

Состав германия	Максимумы фононных полос поглощения в германии					
	ν_1, см$^{-1}$		ν_2, см$^{-1}$		ν_3, см$^{-1}$	
	Эксперимент. данные	Полученные по формуле (2)	Эксперимент. данные	Полученные по формуле (2)	Эксперимент. данные	Полученные по формуле (2)
^{70}Ge	855	866,5	760	759,6	655	655,0
^{72,59}Ge (природный)	850	841,5	755	747,5	650	642,9
^{74}Ge	830	833,5	740	741,0	635	636,4

кристаллах сдвигаются, причем в ^{70}Ge наблюдается рост частоты полос поглощения, а в ^{74}Ge частота уменьшается по сравнению с кристаллами природного изотопического состава. При этом зависимости $\nu = f(M)$ для каждой из трех полос поглощения весьма близки. Обобщенно их можно аппроксимировать выражением

$$\nu = 1{,}6\ \nu_0\ e^{-kM}, \quad (2)$$

где ν_0 — частота максимума соответствующей полосы фононного поглощения при $M = 70$, k — степенной коэффициент, находящийся в диапазоне 0,0062–0,0072.

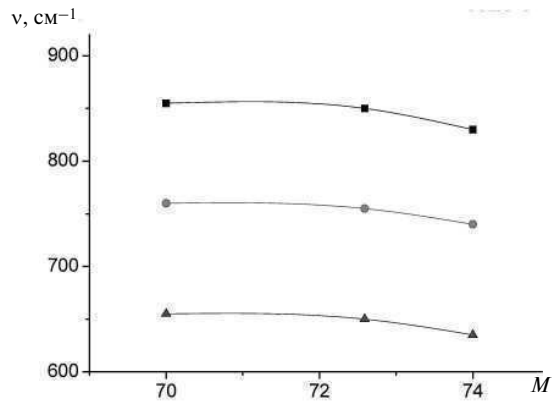


Рис. 2. Зависимость частот ν пиков решеточного поглощения в монокристаллах германия от массового числа (M) (—■— $-1378{,}6\ e^{-0{,}0068\ M}$; —●— $-1172{,}4\ e^{-0{,}0062\ M}$; —▲— $-1084{,}2\ e^{-0{,}0072\ M}$)

Выбор наилучших аппроксимационных зависимостей $\nu(M)$ осуществлен компьютерной программой «Maple» согласно данным об измеряемых величинах. Зависимость частоты пика поглощения от массового числа мы аппроксимировали экспоненциальной зависимостью, хотя недостаточное количество экспериментального материала позволяло использовать и некоторые другие функции.

Влияние изотопного состава на свойства кристаллов соотносят с тем, что изотопический беспорядок нарушает трансляционную инвариантность решетки и приводит к рассеянию фононов.

Зафиксированные нами сдвиги максимумов фононных полос поглощения от изотопа массового числа 74 к изотопу 70 (в пределах 25 $см^{-1}$ для первого пика таблицы, в пределах 20 $см^{-1}$ для второго и третьего пика) невелики, но точно определены. Для алмаза эффект сдвига фононных полос наблюдаются в спектральном диапазоне продольных оптических фононов (LO) и лежит в пределах 50 $см^{-1}$ [5]. Поскольку считается, что изотопическое обогащение более чем 99,99 % по одному из изотопов [5] не приводит к заметному изменению теплопроводности, можно предположить, что для данных максимумов фононных полос поглощения величина сдвига в германии является конечной фиксированной величиной.

Впервые зафиксирована зависимость снижения частоты максимума полосы решеточного поглощения в германии при увеличении массового числа. Величина этого сдвига вполне мала, и в настоящее время заметное практическое применение такого эффекта затруднено. В качестве его использования, например, представляется возможным по положению максимумов полос поглощения проводить экспресс-оценку изотопического состава монокристаллов германия.

Авторы выражают глубокую признательность за предоставленные монокристаллические образцы изотопически чистого германия В.Ю. Баранову, В.И. Ожогину и А.В. Тихомирову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Померанчук, И.Я.** О теплопроводности диэлектриков при температурах меньших дебаевской [Текст] / И.Я. Померанчук // ЖЭТФ.— 1942. Т. 12.— С. 245–254.

2. **Померанчук, И.Я.** Теплопроводность диэлектриков при высоких температурах [Текст] / И.Я. Померанчук // ЖЭТФ.— 1942. Т. 12.— С. 419.

3. **Iton, K.M.** High Purity Isotopically Enriched 70Ge and 74Ge Single Crystals: Isotope Separation, Purification and Growth [Текст] / K.M. Iton, W.L. Hansen, E.E. Haller, J.W. Farmer, V.I. Ozhogin, A. Rudnev, A. Tikhomirov // J.Mater. Res.— 1993. № 6.— P. 1341–1347.

4. **Ожогин, В.И.** Изотопический эффект в теплопроводности монокристаллов германия [Текст] / В.И. Ожогин, А.В. Инюшин, А.Н. Талденков, А.В. Тихомиров, Г.Э. Попов, Ю. Халлер, К. Ито // Письма в ЖЭТФ.— 1996. Т. 63, Вып. 6.— С. 463–467.

5. **Кулеев, И.И.** Ангармонические процессы рассеяния фононов и кинетические эффекты в кристаллах германия и кремния с изотопическим беспорядком [Текст]: Автореф. дис. ... кандидата физико-математических наук / И.И. Кулеев.— Екатеринбург, 2005.— 32 с.

6. **Левинзон, Д.И.** Поглощение ИК-излучения в германии [Текст] / Д.И. Левинзон, Р.Е. Ровинский, В.Е. Рогалин, Е.П. Рыкун, И.С. Ценина, В.А. Шершель // В сб.: Материалы IX совещания по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применению в народном хозяйстве.— Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1982.— С. 123–126.

7. **Kaplunov, I.A.** Measuring the light-attenuation coefficients of germanium and paratellurite crystals [Text] / I.A. Kaplunov, A.I. Kolesnikov, I.V. Talyzin, L.V. Sedova, S.L. Shaĭovich // Journal of Optical Technology. –2005. Vol. 72, № 7.— P. 564–571.

8. **ГОСТ 3520–92.** Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления [Текст].— Введ. 1993–07–01.— М. : Изд-во стандартов, 1992.— 20 с.

9. **Смирнов, Ю.М.** Монокристаллы германия для инфракрасной техники [Текст] / Ю.М. Смирнов, И.А Каплунов // Материаловедение.— 2004. № 5.— С. 48–52.

10. **Уханов, Ю.И.** Оптические свойства полупроводников [Текст] / Ю.И. Уханов.— М.: Наука, 1977.— 368 с.

REFERENCES

1. **Pomeranchuk I.Ya.** On the thermal conductivity of dielectrics below Debye temperature [Tekst] / I.Ya. Pomeranchuk // J. Phys. USSR.— 1942. Vol. 6.— P. 237. (rus.)

2. **Pomeranchuk I.Ya.** Thermal conductivity of dielectrics at high temperatures [Text] // J. Phys. USSR.— 1943. Vol. 7.— P. 197.

3. **Iton K.M., Hansen W.L., Hal-ler E.E., Farmer J.W., Ozhogin V.I., Rudnev A., TikhomirovA.** High Purity Isotopically Enriched 70Ge and 74Ge Single Crystals: Isotope Separation, Purification and Growth [Tekst] // J.Mater. Res.— 1993. № 6.— P. 1341— 1347.

4. **Ozhogin V.I., Inyushkin A.V., Taldenkov A.N., Tikhomirov A.V., Popov G.É., Haller E., Itoh K.** Isotope effect in the thermal conductivity of germanium single crystals [Tekst] // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters.— 1996. Vol. 63. Issue 6.— P. 490–494. (rus.)

5. **Kuleev I.I.** Angarmonicheskie protsessy rasseianiia fononov i kineticheskie effekty v kristallakh germaniia i kremniia s izotopicheskim besporiadkom [Tekst]: Avtoref. dis.... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk.— Ekaterinburg, 2005.— 32 s. (rus.)

6. **D.I. Levinzon, R.E. Rovinskiy, V.E. Rogalin, E.P. Ryikun, I.S. Tsenina, V.A. Shershel.** Pogloschenie IK-izlucheniya v germanii [Tekst] // Materialyi IX soveschaniya po polucheniyu profilirovannyih kristallov i izdeliy sposobom Stepanova i ih primeneniyu v narodnom hozyaystve.— L.: LIYaF, 1982.— S. 123–126. (rus.)

7. **Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Talyzin I.V., Sedova S.L., Shaĭovich L.V.** Measuring the light-attenuation coefficients of germanium and paratellurite crystals [Text] // Journal of Optical Technology. – 2005. Vol. 72, № 7.— P. 564–571.

8. **GOST 3520–92.** Materialy opticheskie. Metody opredeleniia pokazatelei oslableniia [Tekst].— Vved. 1993–07–01.— M. : Izd-vo standartov, 1992.— 20 s.

9. **Smirnov Yu.M. Kaplunov I.A.** Monokristally germaniia dlia infrakrasnoi tekhniki [Tekst] // Materialovedenie.— 2004. T. № 5.— S. 48–52. (rus.)

10. **Ukhanov Iu.I.** Opticheskie svoistva poluprovodnikov [Tekst].— M.: Nauka, 1977.— 368 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОГАЛИН Владимир Ефимович — кандидат физико-математических наук начальник сектора ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”»; 125424, Волоколамское ш., 95 Москва, Россия; e-mail: v-rogalin@mail.ru

ЦЕНИНА Ирина Сергеевна — ведущий инженер ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”»; 125424,Волоколамское ш., 95, Москва, Россия; e-mail:v-rogalin@mail.ru

КАПЛУНОВ Иван Александрович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой прикладной физики Тверского государственного университета; 170100, ул. Желябова, 33, Тверь, Россия; e-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru

AUTHORS

ROGALIN Vladimir E. — Open joint stock company «National Center of Laser Systems and Complexes “Astrophysica”»; 125424, Volokolamskoe sh., 95, Moscow, Russia; e-mail: v-rogalin@mail.ru

TSENINA Irina S. — Open joint stock company «National Center of Laser Systems and Complexes “Astrophysica”»; 125424, Volokolamskoe sh., 95, Moscow, Russia; e-mail: v-rogalin@mail.ru

KAPLUNOV, **Ivan A.** — Tver State University; 170100, Zhelyabova Str. 33, Tver, Russia; e-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 543.426:539.16.04:556.53

В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович

ИССЛЕДОВАНИЕ САМОИНДУКЦИИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА

V.I. Gumenyuk, A.V. Kulinkovich

RESEARCH OF THE SELF-INDUCTION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN IN THE URANIUM COMPOUNDS WATER SOLUTIONS

Показана необходимость создания экспрессного метода контроля урана в природных водах. Исследованы процессы самоиндукции перекисных соединений в водных растворах металлов переменной валентности, включая уран. Экспериментально подтверждены red/ox и концентрационные фазовые неустойчивости в водных ассоциатах ионов металлов переменной валентности, свидетельствующие о туннельном переносе электронов между ассоциатами различного состава. Это позволит использовать полученные закономерности при разработке механизма самоиндукции кислородных соединений в средах с малой электролитической активностью для создания метода экспресс-контроля уранилов в воде.

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ, ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА. СВЯЗАННАЯ ВОДА, СОЕДИНЕНИЯ УРАНА, МЕТАЛЛЫ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ.

Need of creation of an express control method of uranium for natural waters is shown. Processes of a self-induction of perekisny connections in water solutions of metals of variable valency, including uranium are investigated red/ox and concentration phase instability in water associates of ions of metals of variable valency that will allow to use the received regularities when developing the mechanism of a self-induction of oxygen connections in environments with small electrolytic activity for the purpose of creation of a method of express control compounds of uranium in water are experimentally confirmed.

CHEMILUMINESCENT EXPRESS-CONTROL. GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN. CONNECTED WATER. COMPOUNDS OF URANIUM. METALS OF VARIABLE VALENCY.

Биосфера Земли постоянно подвергается действию ионизирующего излучения, в том числе космического альфа-, бета- и гамма-излучения многочисленных рассеянных радионуклидов природного происхождения. Последствия испытаний ядерного оружия и аварий на АЭС также обусловили поступление в окружающее пространство большого количества долгоживущих α-активных радионуклидов, которые особо опасны при поступлении в организм человека.

Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой канцерогенной активности α-излучателей. В исследованиях [1] отмечается, что уран и его соединения относятся к сильнейшим протоплазматическим ядам, чья токсичность может быть сравнима с сулемой. Трансурановые радионуклиды воздействуют на организм человека, а влияние их радиационных свойств становится заметно в более отдаленные сроки.

Анализ допустимых концентраций урана в воде показывает, что предельно допустимое содержание радионуклида составляет микроколичества [2]. Следовательно, одна из важнейших задач в решении проблем радиационной

безопасности — определение зараженности воды и почвы соединениями урана. Однако в настоящее время отсутствуют быстродействующие, легкие в управлении приборы для определения концентрации соединений урана выше допустимых норм [1].

Наиболее устойчивые водорастворимые соединения уранила в воде существуют при $pH = 2{,}0–4{,}2$. В этих условиях соли урана не подвергаются гидролизу и имеют наименьшую сорбционную активность по отношению взвешенных примесных частиц, что позволяет проводить экспресс-контроль природных вод на наличие солей урана.

Анализ возможных механизмов генерации активных форм кислорода (АФК) в воде показывает, что существующие классические представления, основанные на прямых химических образованиях (фотохимический, радиационно-химический и каталитический каналы генерации радикалов), при своем описании не учитывают возможность наработки радикальных форм за счет процессов фазовой трансформации связанной воды. Однако, как следует из приведенного выше, 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 перестройки ассоциатов, во много раз превосходит содержание радикальных форм, получаемых по классическим химическим механизмам генерации. Следовательно, для оценки влияния структурно-физических неустойчивостей ассоциатов среды на самоиндукцию активных форм кислорода необходимо исследовать механизм данного процесса и выявить наиболее информативные показатели, указывающих на наличие в среде соединений урана.

Проведенными исследованиями установлено, что равновесная концентрация перекиси водорода в водном растворе уранилов варьируется под действием геомагнитного поля Земли [3], что свидетельствует о ее преобразовании в энергию АФК в воде. Анализ концентрационной зависимости $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов в водных растворах уранилов от водородного показателя подтверждает наличие в системе неравновесных процессов, для которых характерна фазовая нестабильность, а это указывает на существование в системе фазового перехода, так как интерпретация спектров поглощения ионов урана основана на модели электронных переходов между отдельными уровнями.

В ходе исследования влияния синусоидальных электромагнитных полей на генерацию АФК в водных растворах уранилов было установлено [4], что наблюдаемый характер нелинейной генерации $HO_2^{-(*)}$ свидетельствует о макроскопическом квантовом поведении системы, когда изолированные друг от друга объемы воды ведут себя подобно синхронизированным в фазе или противофазе колебаниям контура. При этом реакция среды на воздействие не только распространяется в прошедшем времени, но и имеет место до воздействия, что, на взгляд авторов, соответствует сущности вихревого магнитного поля как квантовомеханической системы, квантующейся в пространстве и времени.

При исследовании влияния внутренних гравитационных волн и когерентного ИК-излучения гелий-неонового лазера на генерацию активных форм кислорода в водных растворах сульфата уранила было установлено, что действие вихревых электромагнитных волн, как и внутренних гравитационных волн, подавляет генерацию АФК. На основании полученных данных по деформации спектра кинетики хемилюминесценции $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов, обработанных ИК-лазерным излучением, был сделан вывод о том, что излучение ИК-диапазона практически не оказывает влияние на наработку ион-радикалов, что связывается со значительным разбалансом частот излучения и собственных колебаний поляронной системы ассоциата [4].

С целью оценки влияния активности ионов урана на генерацию пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ в водных растворах были проведены исследования по изучению влияния изотопного состава урана и активности его раствора на содержание АФК в водной системе [5]. В ходе исследований было установлено, что радиационно-химические процессы, вызывающие генерацию ион-радикалов в водной среде, имеют кооперативный характер и связаны с электромагнитным возбуждением ион-кристаллических ассоциатов воды и их фазовой трансформацией, сопровождаемой образованием свободных радикалов.

Для изучения генерации АФК в водных растворах уранилов и разработки экспресс-контроля соединений урана в природных водах были проведены исследования по самоиндукции кислородных форм в одно- и многокомпонентных растворах металлов переменной валентности.

В работе [6] показано, что в ион-кристаллических ассоциатах воды, представляющих собой смешанное ион-радикальное состояние в двумерных структурах метастабильных льдов, перенос электронов осуществляется в сопряженных донорно-акцепторных цепочках с малыми потенциальными барьерами, которые регулируются синхронными протонными миграциями. В однородном по составу ассоциате перенос электронов происходит без изменения внутренней энергии, так как потенциальный барьер вследствие обмена протонами по сопряженным двумерным водородным связям оказывается промодулированным ими. При этом реализуются сверхтекучие состояния не только электронов (электронный конденсат), но и протонов (атомный конденсат), поддерживающие спаренное состояние в силу обменных процессов с термостатом (внешней средой). Подчеркнем, что основным условием сверхтекучей конденсации частиц в связанных состояниях воды является гигантский электрический потенциал двумерной границы раздела фаз, направленный ортогонально плоскости сопряженной структуры и достигающей 10^7 В/см.

Данные представления могут быть распространены на ионные формы вещества в воде, так как диссоциированные состояния растворенного в воде вещества существуют на ассоциатах воды, замещая в них активные центры (протоны и гидроксилы) наполовину: 50 % гидроксильных ион-радикалов замещаются соответствующими ион-радикалами аниона и 50 % протоний ион-радикалов — ион-радикалами положительного знака полярности. Это означает, что принятую в настоящее время символьную запись для ионов в водных средах необходимо представить в новом виде:

старая запись — Na^+; $Fe^{+2}...SO_4^{-2}$ и т. п.;

новая запись — $Na^{+(*)}$; $Fe^{++(*)}...SO_4^{-\ -(*)}$ и т. п.

Звездочка в круглых скобках соотносит свое действие на один заряд перед ней, что следует рассматривать как попеременное существование окисленной и восстановленной форм иона (половина времени — одна форма, половина — другая):

Na^*и Fe^{+*} (по аналогии с H^* в составе $H^{+(*)}$) являются связанными радикалами в атомарной (натрий) и ионной (железо) формах. Необходимо учитывать, что ион-радикал существует только на фазе двумерных аллотропных льдов. По этой причине изменения в ионных формах соединений, как и иные формы проявления неустойчивостей ионных форм, следует рассматривать как фазовые превращения в истинной кристаллической структуре вещества. Исчезновение кристаллической фазы должно соотноситься с устранением условий существования стабильных ионов, т. е. превращением ионной (по устоявшейся терминологии) формы в стабильное нейтральное молекулярное состояние.

В привычных представлениях радикал Na^* воспринимается как незаряженный (нулевой валентности) атом. Однако данный атом находится во внешних условиях, сильно отличных от нормальных условий при отсутствии электрического потенциала, и потому состояние с нулевой валентностью оказывается метастабильным. Стабильным соединением натрия мог бы быть его ион Na^+, но он локализован в кластере несферической формы и имеет возможность взаимодействия с туннелирующим вдоль цепей сопряжения электроном в составе протоний ион-радикала:

$$H^+ ..... Fe^{+(*)}$$
$$\uparrow\downarrow$$
$$H^* ..... Fe^{++},$$

что создает состояние «свипирующей» потенциальной ямы.

Как следует из приведенного соотношения, электронный обмен в примесных ион-радикалах осуществляется не от атома к атому примеси, а реализуется через протоний ион-радикал или гидроксильный ион-радикал. Именно этим обстоятельством могут быть объяснены практически эквимольные числа переноса катионов и водорода, анионов и кислорода в растворах электролитов [7].

Флуктуирующая валентность ионов впервые обнаружена на фосфородиэфирных мостиках в нуклеотидах (механизм flip-flop). Существование распределенных атомов с различной конфигурацией валентных электронов, между которыми происходит быстрый (с частотой $10^{14}\,с^{-1}$) обмен в результате непрерывного изменения на единицу числа электронов в 4*f*-оболочке, также проявляется в кристаллических решетках с редкоземельными соединениями [8].

Ион-радикалы в таких сопряженных структурах не образуют новых связей, а процессы переноса электронов и миграции протонов бездиссипативны. Однако в ходе обменных процессов с энергонасыщенной (по отношению энергий перехода частиц в сверхтекучее состояние) внешней средой связанные состояния частиц могут изменять свою внутреннюю энергию, что в конечном счете проявляется в виде накопления в среде жидкости продуктов трансформации вещества — ион-радикалов, свободных радикалов и молекулярных состояний, а также электромагнитной эмиссии нетепловой природы и эмиссии квантов магнитной энергии электронными парами конденсата ($2e^{-}$).

Рассмотрим процесс обмена энергией на примере реакции самообмена в растворах

$$Fe^{++(*)} + Fe^{+++(*)} \rightarrow Fe^{+++(*)} + Fe^{++(*)}.$$

Отметим важное обстоятельство, которое необходимо учитывать при обсуждении механизма реакций самообмена, связанное с понятием об ион-кристаллических ассоциатах воды. Каждая ион-радикальная форма образует свой ассоциат, поэтому ион-радикалы железа с различной валентностью пространственно отделены друг от друга. При этом реакции самообмена протекают не в самих ассоциатах, а затрагивают значительное пространство между ними. И это обусловливает высокие энергетические барьеры в макроскопическом донорно-акцепторном комплексе, определяющие red/ox потенциал системы.

Для переноса электрона от донора $Fe^{++(*)}$ к акцептору $Fe^{+++(*)}$ необходимо, чтобы в среде ассоциатов произошли флуктуации макроорганизации, в результате которых возникнут соответствующие термодинамические условия для переноса заряда. Очевидно, что интенсивность флуктуаций параметра порядка в ассоциатах возрастает вблизи фазовых переходов. Такие флуктуационные неустойчивости могут возникать в виде особых температурных точек для ассоциатов воды, потенциометрических переходов в ионных формах, а также в концентрационных зависимостях ассоциатов примесей в воде.

Если фазовые превращения в ассоциатах воды, обусловленные критическими температурами и red/ox потенциалами переходов ионных форм соединений, могут быть определены по соответствующим диаграммам [9], то концентрационные фазовые переходы в ионных формах воды в настоящее время практически неизвестны. Исключение составляет работа Богачева [10], в которой впервые исследованы закономерности комплексообразования и ассоциации в концентрированных бинарных системах электролитов. Показано, что бинарные системы в определенных мольных пропорциях оказывают каталитическое действие. Это, по нашим представлениям, связано с увеличением флуктуаций параметра порядка при фазовой перестройке ассоциатов соответствующих типов.

Однако подобные концентрационные перестройки могут происходить и в сильно разбавленных водных и водно-органических растворах. Так, при исследовании электропроводности электролитов в малых концентрациях обнаружены переходы в ассоциатах смешанного состава при концентрациях ~1 ppm. Эти переходы сопровождаются исчезновением ассоциатов одной макроорганизации и появлением ассоциатов другого строения, что проявляется в скачкообразном изменении спектра электропроводности электролита [11].

Известно [1], что содержание урана в водной среде связано с ее кислотностью и минеральным составом, при этом концентрация данного соединения в воде может варьироваться от сотых долей до сотен миллиграмм в литре. Кроме того, на наработку АФК ионами уранила оказывают влияние и анионы, входящие в состав соли урана, поскольку анионы являются поверхностно-активными соединениями для связанных состояний воды.

Первоначально были проведены исследования по генерации АФК в водных растворах соли металла постоянной валентности.

Для определения изменения концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ и ин-

тенсивности хемилюминесценции водного раствора соли постоянной валентности нами были исследованы растворы $MgSO_4$ концентрацией $1{,}54\cdot10^{-4}$; $3{,}02\cdot10^{-4}$; $4{,}53\cdot10^{-4}$; $6{,}04\cdot10^{-4}$; $7{,}56\times\times10^{-4}$ моль/л в течение суток. Данные сравнивались со значениями $C_{HO_2^{-(*)}}$ и интенсивностью хемилюминесценции дистиллированной воды. В ходе исследований было установлено, что концентрация пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ и интенсивность хемилюминесценции на протяжении всего эксперимента практически равны нулю и свидетельствуют об отсутствии генерации активных форм кислорода в водных растворах металлов постоянной валентности. В случае незначительных всплесков роста концентрации $HO_2^{-(*)}$ в водных растворах $MgSO_4$ аналогичные изменения $C_{HO_2^{-(*)}}$ наблюдались и в дистиллированной воде, что указывает на генерацию $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов за счет изменения геомагнитной активности Земли.

Таким образом, экспериментальное подтверждение отсутствия генерации активных форм кислорода в водных растворах металлов постоянной валентности свидетельствует о нехимических каналах генерации $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов в водных растворах металлов переменной валентности.

Известно [1], что наиболее стабильными солями уранила в водных растворах являются соли сильных кислот, а из них сульфат уранила UO_2SO_4. Исходя из этого все дальнейшие исследования проводились с использованием сульфата уранила.

С целью изучения влияния концентрации урана на генерацию АФК в водной среде было исследовано влияние содержания уранил-иона на интенсивность и форму спектра ХЛ. Для этого растворы с разным содержанием урана ($7\cdot10^{-6}$–$7\cdot10^{-4}$ моль/л) подкислялись до $pH = 2{,}0$ для предотвращения гидролиза уранил-ионов. Растворы выдерживались в течение суток для стабилизации системы и затем анализировались хемилюминесцентным методом. Результаты исследований представлены на рис. 1. Как следует из зависимости, в данном интервале концентраций наибольшая величина интенсивности хемилюминесценции наблюдается при $3{,}02\cdot10^{-5}$ и $5{,}29\cdot10^{-4}$ моль/л, что обусловлено резонансной передачей энергии ассоциированного комплекса «сульфат уранила — вода». Эти данные коррелируются с результатами исследований работы [12], где в спектре оптического поглощения UO_2^{2+} в 1 М $HClO_4$ установлены электронные переходы в атоме урана как *f*-элемента VI группы периодической системы. На наш взгляд, переход одной ионной формы урана в другую осуществляется через фазовый переход в ион-кристаллических ассоциатах воды (перестройка структуры), связанных с ионами урана. В момент фазового перехода происходит возбуждение электронной структуры ассоциата с образованием сольватных электронов, синтезирующих АФК.

Таким образом, при исследовании генерации АФК в однокомпонентных растворах соединений урана как металла переменной валентности

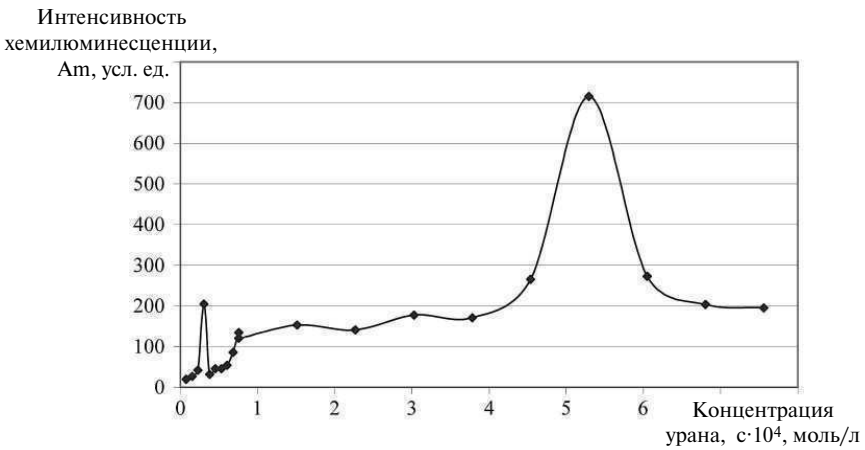


Рис. 1. Зависимость интенсивности хемилюминесценции от концентрации сульфата уранила в воде при $pH = 2{,}0$

установлено, что с изменением параметров системы (концентрация *pH*) в момент перехода одной ионной формы металла в другую происходит резкое увеличение концентрации $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов и интенсивности хемилюминесценции. Это свидетельствует о фазовом переходе при критических значениях red/ox потенциала среды. Данное свойство можно использовать при разработке методики экспресс-контроля соединений урана в природных водах. Поэтому дальнейшие наши исследования были направлены на изучение самоиндукции АФК в многокомпонентных водных растворах металлов переменной валентности.

Известно [2], что из металлов переменной валентности в природных водах чаще всего встречаются железо, медь, хром. Их содержание в водных системах намного превосходит содержание других элементов, способных генерировать активные кислородные формы. Однако наиболее часто из перечисленных металлов в значительных количествах встречается лишь железо, которое в случае идентификации соединений урана по генерации АФК может мешать его количественному определению. В связи с этим нами были исследованы двухкомпонентные водные растворы, содержащие уран и железо в разных соотношениях. При этом во всех исследованиях приготовление растворов осуществлялось строго по указанной выше методике.

В начале исследований было проведено изучение генерации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ в водном растворе, содержащем ионы урана и железа в соотношении 1:100 в зависимости от водородного показателя. Анализ зависимости, представленной на рис. 2, показывает, что максимальная интенсивность хемилюминесценции наблюдается в интервале $pH = 2{,}0–4{,}0$. При этом на кривой прослеживаются четыре максимума — два явных (при *pH* равных 2,8 и 3,5) и два неявных (при *pH* — 1,8; 4,1). На наш взгляд, эти пики соответствуют фазовым переходам одной ионной формы металла переменной валентности в другую. Поскольку генерирующая способность АФК ионами железа в воде намного превышает уран, максимумы кривой при $pH = 2{,}8$; 3,5 можно отнести к переходам железа из одной ионной формы в другую, а при $pH = 1{,}8$; 4,1 — к переходам ионов урана. Более четко идентифицировать максимумы можно лишь после исследования зависимости генерации АФК в водных растворах сульфата железа и уранила от *pH* при их раздельном присутствии в растворе.

Из представленной на рис. 2 зависимости следует также, что максимальная интенсивность хемилюминесценции железа, как уже отмечено, наблюдается при $pH = 2{,}0–4{,}0$. Однако, при $pH = 3{,}0$ и выше происходит гидролиз уранил-ионов в водной среде, а при $pH < 2{,}0$ интенсивность ХЛ падает. Следовательно, дальнейшее изучение генерации АФК в водных растворах сульфата уранила можно исследовать только в интервале $pH = 2{,}0–3{,}0$.

Дальнейшие наши исследования были направлены на изучение ингибирующей способ-

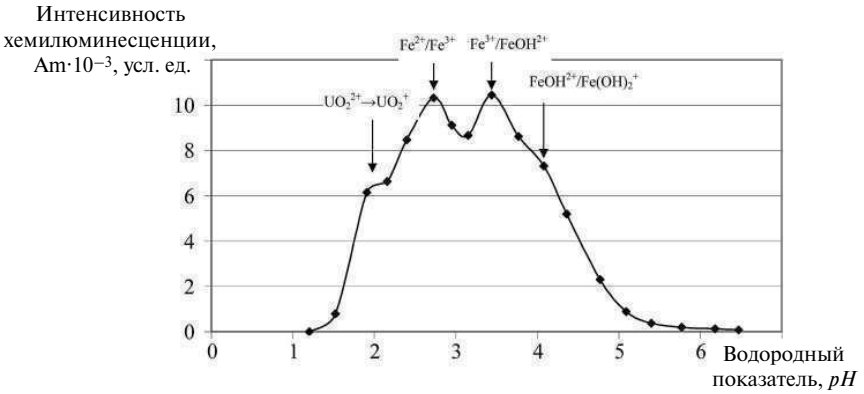


Рис. 2. Зависимость интенсивности хемилюминесценции водного раствора сульфата железа с концентрацией $8{,}06 \cdot 10^{-6}$ моль/л в присутствии сульфата уранила концентрацией $7{,}56 \cdot 10^{-4}$ моль/л от водородного показателя

ности ионов урана по отношению к генерирующей способности АФК ионами железа в двухкомпонентных водных растворах при постоянной концентрации одного из металлов.

Так, изучение изменения интенсивности ХЛ при изменении содержания железа в бикомпонентной системе «железо — уран» (C_U = const) показало, что увеличение концентрации железа в растворе приводит к возрастанию интенсивности ХЛ (рис. 3). Однако изменение содержания урана в данной системе при постоянной концентрации железа (1,5 ПДК — максимальная концентрация железа в природных водах [2]) приводит к снижению содержания $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов в водном растворе (рис. 4). Анализ данной зависимости показывает, что интенсивность ХЛ до концентрации урана $3{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/л снижается, а при более высоком содержании урана практически стабилизируется. Следовательно, при высоких концентрациях урана в воде генерирующая способность активных форм кислорода железом стабилизируется на более низком уровне. На наш взгляд, это связано прежде всего с тем, что при многократном превышении концентрации урана над концентрацией железа в воде происходит взаимное подавление активности электронных структур различных по составу ассоциатов и вследствие этого практически полностью подавляется генерация АФК и $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалов ионами железа. В свою очередь, уран как металл переменной валентности сам генерирует $HO_2^{-(*)}$-ион-радикалы, что и наблюдается на рис. 4.

Таким образом, исследование ингибирующей способности процесса самоиндукции ион-радикалов в многокомпонентных водных средах

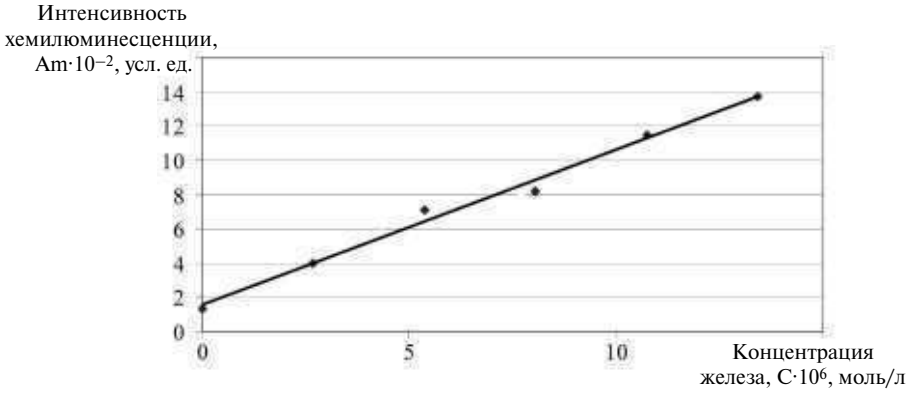


Рис. 3. Зависимость интенсивности хемилюминесценции водного раствора сульфата уранила с концентрацией $7{,}56 \cdot 10^{-4}$ моль/л в присутствии ионов железа различной концентрации при $pH = 3{,}50$

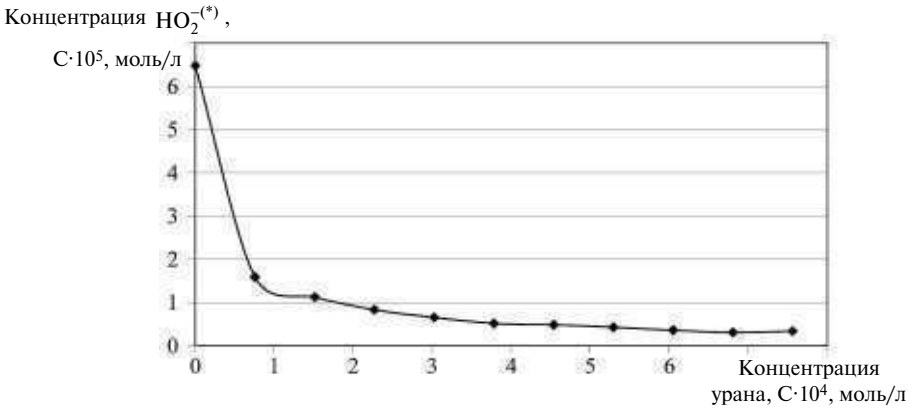


Рис. 4. Зависимость концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ от концентрации урана в воде в присутствии ионов железа с концентрацией $8{,}06 \cdot 10^{-6}$ моль/л

на примере системы «сульфат уранила — сульфат железа» показывает, что генерация АФК происходит эффективнее в однокомпонентных системах. В случае взаимного присутствия ионов металлов переменной валентности в растворе осуществляется подавление генерирующей способности одного иона другим, что свидетельствует о конкуренции электронных структур ассоциатов различного состава и возможности идентификации одного иона металла в присутствии другого по интенсивности подавления генерации АФК в растворе.

Согласно теоретическим положениям ион-кристаллической ассоциации между ассоциатами в воде протекают процессы обмена (туннелирование) связанных электронов. При преодолении связанными электронами туннельных барьеров образуются нормальные электроны, являющиеся источником активных форм кислорода и водорода в воде. Наиболее стабильным соединением из АФК в воде является пергидроксильный ион-радикал $HO_2^{-(*)}$.

Интенсивность процессов диссоциативного распада куперовских пар и, следовательно, образования $HO_2^{-(*)}$ связана с интенсивностью флуктуаций энтропии системы $<\Delta S>$, которые максимальны в точках фазовых переходов различного рода [7].

Следовательно, появляется возможность обнаружения в воде фазовых неустойчивостей в макроорганизации ассоциатов по концентрации $HO_2^{-(*)}$ в воде, образующейся в результате преобразований сольватированного электрона. При этом подобные фазовые неустойчивости могут определяться критическими значениями температуры, водородным показателем (в red/ox системах) и концентрацией примесных ионов в воде.

Для исследования фазовых неустойчивостей в растворах ионов металлов переменной валентности использовалась методика хемилюминесцентного определения $HO_2^{-(*)}$ в воде и водных растворах. Приготовленные растворы веществ с заданной концентрацией, *pH* и ионной силой помещались в пробирки одного диаметра и с одинаковым составом. Измерение концентрации $HO_2^{-(*)}$ в исследуемых растворах осуществлялось последовательно по трем—пяти сериям (для снижения влияния вариаций геомагнитного поля Земли).

Полученные зависимости (рис. 5) демонстрируют сложный, но устойчивый по величине *pH* или концентрации ионов в воде характер наработки (самоиндукции) $HO_2^{-(*)}$ в растворах солей металлов переменной валентности.

Изменения концентрации $HO_2^{-(*)}$ в растворе ионов $UO_2^{++(*)}$ характеризуются острой вершиной при pH ≈ 2,5, что соответствует pH перехода $UO_2^{++(*)} \rightarrow UO_2^{+(*)}$ (потенциал перехода составляет +0,17 В). Аналогичная зависимость для $Fe^{+++(*)}$ имеет трехвершинное распределение при *pH* = 3,0; 3,9; 4,9. Данные пики, вероятно, соответствуют переходам Fe^{+2}/Fe^{+3}; $Fe^{+3}/FeOH^{+2}$; $FeOH^{+2}/Fe(OH)_2^{+}$ [9].

Наряду с зависимостью от водородного показателя среды в растворах (с одинаковым *pH*) имеют место резкие изменения наработки $HO_2^{-(*)}$. В растворе с переменной концентрацией соли урана в присутствии ионов железа постоянной концентрации отмечаются всплески самоиндукции перекиси водорода при следующих концентрациях: $2{,}5\cdot10^{-6}$; $4{,}6\cdot10^{-6}$; $7{,}8\cdot10^{-6}$; $9{,}6\cdot10^{-6}$; $1{,}14\cdot10^{-5}$; $5{,}3\cdot10^{-4}$ моль/л (рис. 6). При этом полученные значения критических концентраций в диапазоне 10^{-5}—10^{-6} моль/л соотносятся как 1,84:1,69:1,23:1,19.

Исследование тонкой структуры концентрационной зависимости самоиндукции $HO_2^{-(*)}$) в диапазоне 10^{-5}—10^{-6} моль/л (рис. 7) показывает, что при длительном выстаивании раствора в условиях изоляции от атмосферных газов тонкая структура не только сохраняется, но еще более усиливается.

Однако с увеличением концентрации $HO_2^{-(*)}$ происходит незначительный сдвиг кривой в сторону меньших концентраций соли урана. Подобный сдвиг точек концентрационных фазовых неустойчивостей не противоречит представлениям об ассоциатах, так как ассоциаты различных ионов существуют раздельно, о чем свидетельствуют данные по спектрам электропроводности электролитов [6]. Раздельное существование ассоциатов (в диапазоне концентраций ассоциатов фиксированного размера) предполагает их конкуренцию за свободную воду. В случае предельного насыщения ассоциатов свободной водой возникает концентрационная фазовая неустойчивость, в результате которой ассоциаты претерпевают изменения (деление, изменение состава и др.).

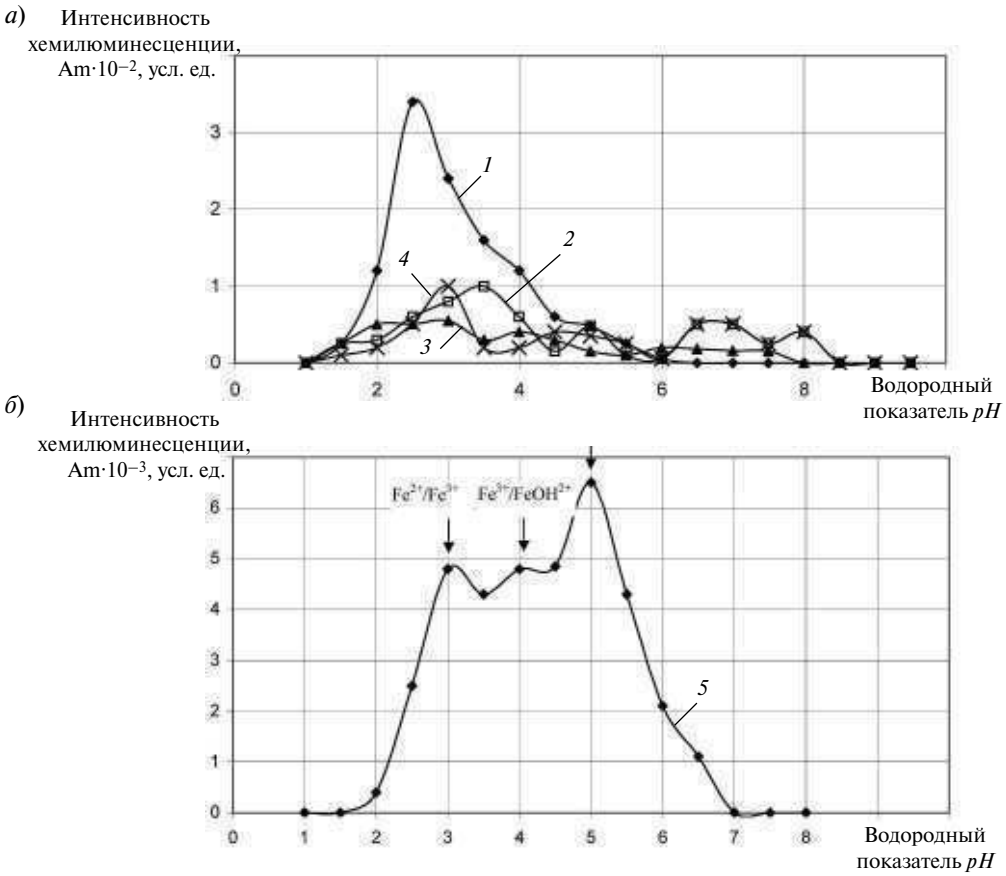


Рис. 5. Изменение равновесных значений концентрации $HO_2^{-(*)}$ в водном растворе солей металлов переменной валентности в зависимости от значений водородного показателя среды: *1* — UO_2SO_4 (C = 7,5·10⁻⁴ моль/л); *2* — $Cr_2(SO_4)_3$ (C = 1,92·10⁻⁵ моль/л); *3* — $CuSO_4$ (C = 7,56·10⁻⁴ моль/л); *4* — дистиллированная вода; *5* — $Fe_2(SO_4)_3$ (C = 8,06·10⁻⁶ моль/л)

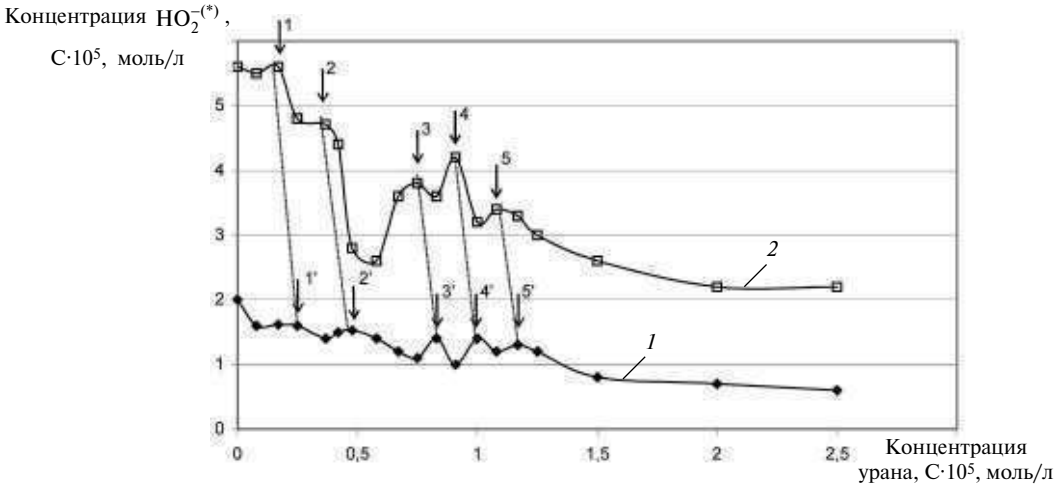


Рис. 6. Зависимость концентрации пергидроксильного ион-радикала $HO_2^{-(*)}$ от концентрации урана в воде в присутствии ионов железа при *pH* = 2,50: *1* — раствор UO_2SO_4 в дистиллированной воде; *2* — раствор UO_2SO_4 в водопроводной воде; 1–5' — положение максимумов концентраций $HO_2^{-(*)}$, соответствующих точкам концентрационных фазовых переходов

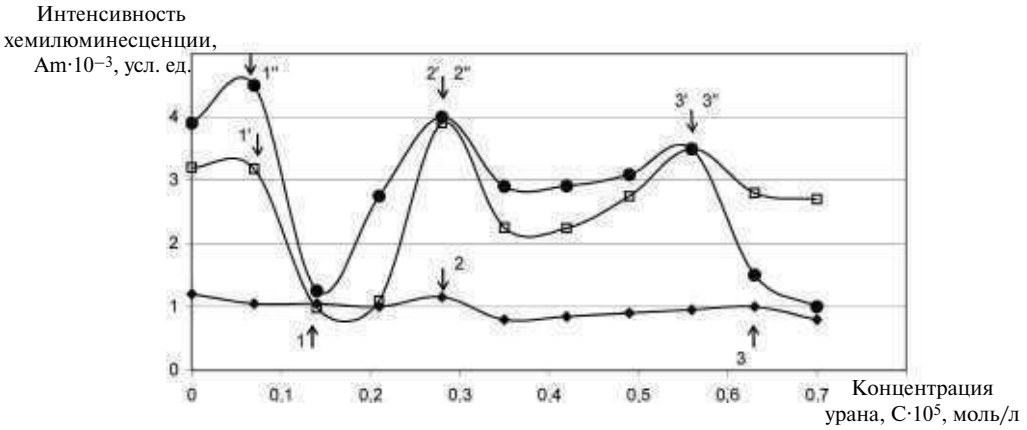


Рис. 7. Зависимость интенсивности хемилюминесценции водного раствора сульфата уранила в присутствии сульфата железа концентрацией $8{,}06\cdot10^{-6}$ моль/л при $pH = 2{,}50$

(—◆— через сутки; —⊟— через 30 суток; —●— через 80 суток)

Процесс перестройки ассоциатов сопровождается скачкообразным изменением в спектре электропроводности электролита. Полученные выше экспериментальные данные свидетельствуют также о том, что подобная фазовая неустойчивость проявляется и в самоиндукции $HO_2^{-(*)}$.

Таким образом, экспериментальное подтверждение red/ox и концентрационных фазовых неустойчивостей в водных ассоциатах ионов металлов переменной валентности, проявляющихся в форме самоиндукции АФК в растворе, свидетельствует о справедливости предложенного представления о механизме туннельного переноса электронов между ассоциатами различного состава Это позволяет использовать полученные закономерности при установлении механизма самоиндукции $HO_2^{-(*)}$ в средах с малой электролитической активностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бекман, И.Н.** Уран [Текст]: Учебное пособие / И.Н. Бекман.— М.: Изд-во МГУ, 2009.— 300 с.

2. Справочник помощника санитарного врача и помощника эпидемиолога [Текст] / Под ред. Д.П. Никитина, А.И. Заиченко.— М.: Медицина, 1990.— 512 с.

3. **Гуменюк, В.И.** Влияние естественных электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах уранилов [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 4 (159).— С. 210–220.

4. **Кулинкович А.В.** Образование активных форм кислорода в водных растворах солей урана при воздействии электромагнитных полей [Текст] / А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 2-2(147).— С. 249–258.

5. **Кулинкович, А.В.** Кооперативный характер генерации перекисных соединений при радиолизе водных растворов уранилов [Текст] / А.В. Кулинкович В.И. Гуменюк, // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 2 (171).— С. 248–260.

6. Вода — космическое явление [Текст] / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАЕН.— М.,: Изд-во РАЕН, 2002.— С. 427.

7. **Антропов, Л.И.** Теоретическая электрохимия [Текст] / Л.И. Антропов.— М.: Высшая школа, 1975.— 576 с.

8. **Вайнштейн, Э.Е.** Явление флуктуирующей валентности атомов редкоземельных элементов в соединениях [Текст] / Э.Е. Вайнштейн, Ю.Б. Падерко, С.М. Блохин, Ф.А.Кузнецов // Научные открытия (сборник кратких описаний, 2000 г.).— Диплом № 147 на открытие / РАЕН.— М., 2000.— 48 с.

9. Справочник химика. Химическое равновесие и кинетика. Т. 3 [Текст].— М.: Мир, 1964.— 1004 с.

10. **Богачев, Ю.С.** Спектрально-структурные закономерности формирования водородных связей в концентрированных водных и органических системах [Текст]: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. / Ю.С. Богачев.— М., 1992.— 46 с.

11. **Ло, Ш.** Наноструктуры в очень разбавленных водных растворах [Текст] / Ш. Ло, В. Ли // Российский химический журнал.— 1999. Т. 43, № 5.— С. 40–48.

12. Химия актиноидов [Текст]: в трех томах. Т. 1 / Пер. с англ.; Под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга, Л. Морсса.— М.: Мир, 1991.— С. 525.

REFERENCES

1. **Bekman I.N.** Uran [Tekst]: Uchebnoe posobie.— Izd-vo M.: MGU, 2009.— 300 s. (rus.)

2. Spravochnik pomoshchnika sanitarnogo vracha i pomoshchnika epidemiologa [Tekst] / Pod red. D.P. Nikitina, A.I. Zaichenko. M.: Meditsina.— 1990.— 512 s. (rus.)

3. **Gumeniuk V.I., Kulinkovich A.V.** Vliianie estestvennykh elektromagnit-nykh polei na generatsiiu aktivnykh form kisloroda v vodnykh rastvorakh uranilov [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. № 4 (159).— S. 210–220. (rus.)

4. **Kulinkovich A.V.** Obrazovanie aktivnykh form kisloroda v vodnykh ras-tvorakh solei urana pri vozdeistvii elektromagnitnykh polei [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2012. №2-2 (147).— S. 249–258. (rus.)

5. **Kulinkovich A.V., Gumeniuk V.I.** Kooperativnyi kharakter generatsii perekisnykh soedinenii pri radiolize vodnykh rastvorov uranilov [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. № 2 (171).— S. 248–260. (rus.)

6. Voda — kosmicheskoe iavlenie [Tekst] / Pod red. Yu.A. Rakhmanina, V.K. Kondratova; RAEN.— M.: Izd-vo RAEN, 2002.— S. 427. (rus.)

7. **Antropov L.I.** Teoreticheskaia elektrokhimiia [Tekst].— M.: Vysshaia shkola, 1975.— 576 s. (rus.)

8. **Vainshtein E.E., Paderko Yu.B., Blokhin S.M., Kuznetsov F.A.** Yavlenie fluktuiruiushchei valentnosti atomov redkozemel'nykh elementov v soedineniiakh [Tekst].— Nauchnye otkrytiia (sbornik kratkikh opisanii, 2000 g.). Diplom № 147 na otkrytie / RAEN.— M., 2000.— 48 s. (rus.)

9. Spravochnik khimika. Khimicheskoe ravnovesie i kinetika [Tekst].— T. 3.— M.: Mir, 1964.— 1004 s. (rus.)

10. **Bogachev Yu.S.** Spektral'no–strukturnye zakonomernosti formirova-niia vodorodnykh sviazei v kontsentrirovannykh vodnykh i organicheskikh sistemakh [Tekst]: Avtoref. dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk / Yu.S. Bogachev.— M., 1992.— 46 s. (rus.)

11. **Lo Sh., Li V.** Nanostruktury v ochen' razbavlennykh vodnykh rastvorakh [Tekst] // Rossiiskii khimicheskii zhurnal.— 1999. T. 43, № 5.— S. 40–48. (rus.)

12. Khimiia aktinoidov: V 3 t. T. 1 / Per. s angl.; Pod red. Dzh. Katsa, G. Sibborga, L. Morssa.— M.: Mir, 1991.— S. 525. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

КУЛИНКОВИЧ Алексей Викторович — докторант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: geochem@mail.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasiliy I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

KULINKOVICH Alexey V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: geochem@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 371.315

В.И. Гуменюк, А.М. Кармишин, В.В. Синицын

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРАЖЕННЫХ ПО СТЕПЕНЯМ ТЯЖЕСТИ ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЯХ

V.I. Gumenyuk, A.M. Karmishin, V.V. Sinitsyn

DISTRIBUTION AFFECTED BY SEVERITY WITH OF TECHNOGENIC ACCIDENT

Рассматриваются вопросы различного представления структуры пораженных по степени поражения при техногенных авариях. Даются общие интегральные представления, позволяющие оценивать структуру пораженных, а также аналитические выражения для частных случаев.

ТЕХНОГЕННАЯ АВАРИЯ. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ОБЪЕКТЫ. СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ ПОРАЖЕНИЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРАЖЕННЫХ ПО СТЕПЕНЯМ ТЯЖЕСТИ. СИРИЯ. ХИМИЧЕСКОЕ ОРУЖИЕ. ЗАРИН.

The article observes the issues of various representations of distribution of contaminated by a value of severity of contamination during anthropogenic accidents. The generic integral representations are given for estimation of contamination structure and their analytical expressions in particular cases.

TECHNOGENIC ACCIDENT. ELEMENTARY OBJECTS. SEVERITY DEGREE OF CONTAMINATION. DISTRIBUTION OF CONTAMINATED BY A VALUE OF SEVERITY. SYRIA. CHEMICAL WEAPONS. ZARIN.

Из экспериментальных данных и теоретических исследований известно, что реализация поражающего действия техногенных аварий носит случайный характер. Одна из причин, определяющая стохастический характер поражающего действия техногенных аварий на персонал промышленных объектов и население, — их биологическая неоднородность (вариабельность) к действию того или иного поражающего фактора, возникающего при аварии. Стохастический характер поражающего действия техногенных аварий усиливается из-за неравномерности поля поражающего фактора (полей поражающих факторов при их комбинированном действии). В силу стохастического характера поражающего действия при техногенной аварии количество пораженного населения (персонал объекта), а также наблюдаемые у него степени тяжести поражения могут быть различны.

Можно утверждать, что и степень разрушения элементов инфраструктуры, а также степени повреждения техники также могут быть различны. В дальнейшем одинаковые группы населения (различающиеся по возрасту, полу, состоянию здоровья и т. п.), однотипные элементы инфраструктуры, техники и т. п. будем называть обобщенным термином элементарный объект, т. е. объект, который можно рассматривать только в одном из двух состояний при техногенной аварии: поражен или не поражен [1].

Умение оценивать структуру пораженных (возможную структуру пораженных) позволяет решать ряд практически важных задач, среди которых можно выделить следующие [1–6]:

научно обоснованная оценка возможных последствий техногенных аварий, а также диверсионно-террористических актов, необходимая для принятия управленческих решений по их снижению;

обоснование технических решений и (на их основе) организационных мероприятий по снижению опасности техногенных аварий;

оценка сил и средств, необходимых для ликвидации последствий аварий (диверсионно-террористических актов), в том числе для спасения жизней пострадавших;

обоснование требований к системе защиты и ликвидации последствий техногенных аварий, в том числе их оперативности ее функционирования.

Кроме того, структура пораженных при техногенных авариях является одной из групп исходных данных для обоснования методов и созданных на их основе методик оценивания экономического ущерба.

Известно, что степень поражения делят (на качественном уровне) по тяжести состояния организма человека на четыре степени [1]: I степень тяжести поражения, или легкая; II степень тяжести поражения, или средняя; III степень тяжести поражения, или тяжелая; IV степень тяжести поражения, или крайне тяжелая.

Сложились некоторые особенности при классификации пораженных. В результате действия токсичных химических веществ при авариях химически опасных объектов или диверсионно-террористических актах с применением токсичных химических веществ (как в метро в Токио,1996 г.) в токсикологии не рассматривается третья степень тяжести поражения, однако введены эффекты поражения легче первой степени тяжести — первичные, или начальные, эффекты поражения, которые называются пороговыми. Таким образом, при действии токсичных химических веществ градация пораженных на четыре группы осталась, однако она несколько не совпадает с общепринятой градацией (классификацией) по степеням тяжести поражения.

Отметим, что градация по четырем степеням тяжести не поражений, а разрушений (здания, строения и т. п.) или повреждений (техника) осталась. В данном случае степень тяжести разрушений или повреждений определяется тем, какой вид ремонта необходим для восстановления объектов инфраструктуры и техники: текущий; средний; капитальный; это когда восстановление объекта не целесообразно — IV степень тяжести.

Методы описания структуры пораженных начали развиваться примерно 20 лет назад в работах ученых Военной академии химической защиты [1], при этом в рассмотрение и был введен термин «структура пораженных».

В настоящее время под структурой пораженных элементарных объектов понимается их распределение по степеням тяжести поражения [1, 2, 4–6].

Представление структуры пораженных может быть сделано четырьмя различными способами (вариантами) [1, 2]:

как доля элементарных объектов, получивших поражение не ниже заданной степени тяжести $П_{>i}$, от общего числа подвергшихся воздействию поражающих факторов;

как доля элементарных объектов, получивших поражение заданной степени тяжести $П_i$, от общего числа подвергшихся воздействию поражающих факторов;

как доля элементарных объектов, получивших поражение не ниже заданной степени тяжести $G_{>i}$, от общего числа пораженных,;

как доля элементарных объектов, получивших поражение заданной степени тяжести G_i, от общего числа пораженных.

Рассмотрим первый вариант представления структуры пораженных, к которому можно прийти, рассмотрев общую площадь поражающего действия техногенной аварии ($S_п$) и плотность распределения на ней элементарных объектов, $f_п(x, y) = f_п(S)$, м$^{-2}$.

Знание общей площади поражающего действия аварии (то есть площади, за пределами которой поражающим действием аварии с достаточной для практики точностью можно пренебречь) и плотности распределения элементарных объектов на ней позволяет найти долю элементарных объектов, получивших поражение не ниже заданной (i-й) степени тяжести.

Рассмотрим элементарную площадку $dS = dxdy$, на которой будет находиться некоторое количество элементарных объектов dN. Очевидно, что dN можно определить через плотность распределения элементарных объектов и общее количество N_0 подвергшихся воздействию поражающих факторов аварии в районе расположения потенциально опасного промышленного объекта:

$$dN = N_0 f_п(S)dS = N_0 f_п(x,y)dx\,dy. \qquad (1)$$

При техногенной аварии на рассматриваемой элементарной площадке dS будет сформирована некоторая величина поражающего фактора $ПФ(S)$, или $ПФ(x, y)$, которая и определит вероятность поражения $P(S) = G(S) = P(x,y) = G(x,y)$ не ниже заданной (рассматриваемой) степени тяжести поражения элементарного объекта. Тогда количество элементарных объектов $dN_{>i}$, получивших поражения не ниже заданной степени тяжести, на элементарной площадке dS, составит

$$dN_{>i} = N_0 G(S) f_{\text{п}}(S) dS = \\ = N_0 G(x,y) f_{\text{п}}(x,y) dx\, dy. \qquad (2)$$

Суммируя количество элементарных объектов по всем элементарным площадкам в пределах площади поражающего действия техногенной аварии, по определению найдем общее количество подвергшихся воздействию поражающего фактора аварии:

$$\int_0^{N_0} dN = N_0 \int_0^{S_n} f_n(S) dS = \\ = N_0 \iint_{S_n} f_n(x,y) dx dy = N_0. \qquad (3)$$

Аналогично, суммируя элементарные объекты, получившие поражения не ниже *i*-й степени тяжести, по всем элементарным площадкам *dS*, получим их общее количество $N_{>i}$:

$$N_{>i} = \int_0^{V} dN_{>i} = N_0 \int_0^{S_{\text{п}}} G(S) f_{\text{п}}(S) dS = \\ = N_0 \iint_{S_{\text{п}}} G(x,y) f_{\text{п}}(x,y) dx dy. \qquad (4)$$

Отметим, что в соотношении (4) $G(x,y)$ есть не что иное, как координатный закон поражения — наиболее полный пространственный показатель опасности техногенной аварии [4–6].

Тогда на основании выражений (3) и (4) несложно оценить долю элементарных объектов, получивших поражения не ниже заданной степени тяжести, от общего числа подвергшихся воздействию техногенной аварии:

$$\Pi_{>i} = \frac{\int_0^{S_{\text{п}}} G_{>i}(x,y) f_{\text{п}}(S) dS}{\int_0^{S_{\text{п}}} f_{\text{п}}(S) dS} = \\ = \int_0^{S_{\text{п}}} G_{>i}(x,y) f_{\text{п}}(S) dS. \qquad (5)$$

В общем случае соотношение (5) может быть рассчитано численными методами, однако при некоторых ограничениях и допущениях возможны и аналитические решения. Так, при равномерном распределении элементарных объектов на общей площади поражающего действия техногенной аварии выражение (5) примет вид

$$\Pi_{>i} = \frac{\int_0^{S_{\text{п}}} G_{>i}(x,y) f_{\text{п}}(S) dS}{S_{\text{п}}} = \frac{S_{0(>i)}}{S_{\text{п}}}, \qquad (6)$$

где $S_{0(>i)}$ — интегральный показатель опасности техногенной аварии — приведенная зона поражения [5, 6], м^2;

Для некоторого типа аварий (таких, как взрывы конденсированных взрывчатых веществ, выбросы токсичных химических веществ в виде пара и тонкодисперсного аэрозоля) показано [1], что выражение (2) принимает вид

$$\Pi_{>i} = \left(\frac{\text{ПФ}_{50(>i)}}{\text{ПФ}_{50(>1)}} \right)^{-r} \overline{\text{ПФ}}_{\text{гр}}^{\,r} e^{\frac{r^2}{4k}}, \qquad (7)$$

где $\text{ПФ}_{50(>i)}$, $\text{ПФ}_{50(>1)}$ — медианное значение величины поражающего фактора, вызывающего у элементарного объекта поражение не ниже *i*-й и первой (пороговой) степени тяжести для токсичных химических веществ [1, 7–11]; k — параметр факторного закона поражения [1, 7–11]; r — параметр поля поражающего фактора [1, 2, 12]; $\overline{\text{ПФ}}_{\text{гр}}$ — граничное значение величины поражающего фактора, при котором с достаточной для практики точностью можно пренебречь поражениями не ниже первой степени тяжести (не ниже пороговых при авариях химически опасных объектов),

$$\overline{\text{ПФ}}_{\text{гр}} = \frac{\text{ПФ}}{\text{ПФ}_{50(>1)}}.$$

Структуру пораженных не ниже *i*-й степени тяжести по входящим в нее степеням тяжести поражения можно представить так:

Поражение не ниже	*Включает степень тяжести поражения*
первой степени $\Pi_{>1}$	I, II, III, IV
второй степени $\Pi_{>2}$	II, III, IV
третьей степени $\Pi_{>3}$	III, IV
четвертой степени $\Pi_{>4}$	IV

На основании этих данных несложно получить и второй вариант структуры пораженных — в виде доли Π_i элементарных объектов, получивших поражение заданной степени тяжести от общего числа подвергшихся воздействию.

Для определения доли объектов, получивших поражение заданной степени тяжести, необходимо из доли объектов, подвергшихся воз-

действию и получивших поражение не ниже i-й степени тяжести, вычесть долю объектов, получивших поражение не ниже (i+1)-й степени тяжести:

$$\Pi_i = \Pi_{>i} - \Pi_{i+1}. \quad (8)$$

Получим

$$\Pi_i = \frac{\Pi\Phi_{50(>i)}^{-r} - \Pi\Phi_{50(>i+1)}^{-r}}{\Pi\Phi_{50(>1)}^{-r}} \Pi\Phi_{\text{гр}}^{r} e^{\frac{r^2}{4k}}. \quad (9)$$

Отметим следующее свойство функции Π_i: сумма Π_i равна доле $\Pi_{>1}$пораженных не ниже первой степени тяжести.

Действительно:

$$\sum_{i=1}^{4} \Pi_i = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4 =$$

$$= (\Pi_{>1} - \Pi_{>2}) + (\Pi_{>2} - \Pi_{>3}) + (\Pi_{>3} - \Pi_{>4}) +$$

$$+ (\Pi_{>4} - \Pi_{>5}).$$

Раскрывая скобки, получим

$$\sum_{i=1}^{4} \Pi_i = \Pi_{>1} - \Pi_{>5}.$$

Поскольку пятая степень тяжести поражения в рассмотрение не вводится, то $\Pi_{>5}$ равно нулю. Тогда из последнего уравнения непосредственно следует

$$\sum_{i=1}^{4} \Pi_i = \Pi_{>1}.$$

Перейдем теперь к рассмотрению следующего варианта представления структуры пораженных — в виде доли $G_{>i}$ элементарных объектов, получивших поражение не ниже заданной степени тяжести, от общего числа пораженных.

Для этого необходимо долю $\Pi_{>i}$ объектов, получивших поражение не ниже заданной степени тяжести, разделить на долю объектов, получивших поражение не ниже первой степени тяжести:

$$G_{>i} = \frac{\Pi_{>i}}{\Pi_{>1}}. \quad (10)$$

Выполнив необходимые действия, получим

$$G_{>i} = \left(\frac{\Pi\Phi_{50(>i)}}{\Pi\Phi_{50(>1)}} \right)^{-r}. \quad (11)$$

Отметим следующее свойство функции $G_{>1}$, которое непосредственно следует из (6) и (7): доля пораженных не ниже первой степени тяжести от общего числа пораженных равна единице.

Рассмотрим определение последнего варианта структуры пораженных — в виде доли объектов, получивших поражение заданной степени тяжести G_1, от общего числа пораженных. Для этого необходимо из доли $G_{>i}$ объектов, получивших поражение не ниже i-й степени тяжести, вычесть долю $G_{>i+1}$объектов, получивших поражение не ниже (i+1)-й степени тяжести:

$$G_i = G_{>i} - G_{>i+1}. \quad (12)$$

С учетом (10) будет

$$G_i = \frac{\Pi\Phi_{50(>i)}^{-r} - \Pi\Phi_{50(>i+1)}^{-r}}{\Pi\Phi_{50(>1)}^{-r}}. \quad (13)$$

Свойство функции $G_{>i}$: сумма G_i равна единице. Доказательство:

$$\sum_{i=1}^{4} G_i = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 =$$

$$= (G_{>1} - G_{>2}) + (G_{>2} - G_{>3}) + (G_{>3} - G_{>4}) +$$

$$+ (G_{>4} - G_{>5}).$$

Раскрывая скобки, получим

$$\sum_{i=1}^{4} G_i = G_{>1}.$$

Но выше было доказано, что $G_{>1} = 1$. Отсюда сразу следует

$$\sum_{i=1}^{4} G_i = 1.$$

Таким образом, в некоторых случаях (воздушные ударные волны, образующиеся при авариях взрывоопасных объектов; ингаляционное воздействие токсичных химических веществ при авариях химически опасных объектов) структура пораженных выражается через параметры факторных законов поражения и параметры поля поражающего фактора. Во всех остальных случаях необходим численный расчет первого варианта структуры пораженных по общему соотношению (5) с использованием математических моделей, описывающих формирование полей поражающих факторов и факторных законов поражения.

Структура пораженных, %, при применении химических боеприпасов, снаряженных отравляющим веществом зарин (изотермия)

Категории структуры пораженных	Поражения, %			
	Пороговые (PCt_{50})	I степени тяжести (ECt_{50})	II степени тяжести (ICt_{50})	Летальные (LCt_{50})
$П_{\geq i}$	10,6	1,3	0,7	0,03
$П_i$	9,3	0,6	0,67	0,03
$G_{\geq i}$	100	12,3	6,6	0,3
G_i	87,7	5,7	6,3	0,3

Рассмотренные методы оценивания структуры пораженных можно усилить, если координатный закон поражения рассматривать с учетом времени наступления тех или иных поражений. В этом случае можно получить динамику формирования структуры пораженных, которая и позволит в перспективе обосновать требования по оперативности осуществления мероприятий защиты при возникновении техногенной аварии потенциально опасного промышленного объекта.

Оценим структуру пораженных применительно к ситуации в Сирии, где в августе 2013 года предположительно было применено химическое оружие и погибло около 1500 человек. Токсикологические характеристики отравляющего вещества зарин, которое предположительно было применено, приводятся во многих изданиях, в частности в [1].

В таблице приведены все четыре варианта структуры пораженных, которые могут быть полезны при проведении экспертизы по вопросу о действительном применении химического оружия.

Из данных, представленных в таблице, следует, что количество летальных поражений примерно в 20 раз меньше, чем количество пораженных второй степени тяжести, т. е. пораженных, которым требуется длительная госпитализации и лечение (в среднем не меньше 2 недель). Таким образом, исходя из заявленного уровня летальных поражений, длительная госпитализации должна была потребоваться примерно 30000 человек. О таком количестве госпитализированных в результате «применения химического оружия» (в полном смысле этого слова) информация отсутствует, что приводит к вполне определенным выводам. Таким образом, структура пораженных позволяет объективно оценить, было ли применение оружия или нет в конкретном случае.

Методы оценки приведенной зоны поражения при авариях взрывоопасных объектов (взрывы конденсированных взрывчатых веществ и газовоздушных смесей) описаны, например, в [12].

Необходимо отметить, что уже разработаны методы оценивания комбинированных поражений не ниже заданной степени тяжести при действии поражающих факторов различных или одинаковых по природе, но имеющих различные биомишени в организме человека (различные механизмы поражающего действия) [7–11]. Комбинированное действие поражающих факторов — наиболее реальный сценарий проявления опасности техногенных аварий.

Эти модели учитывают как эффекты усиления совместного поражающего действия (синергизм), независимого действия, так и ослабления (антагонизм) при применении, например, медицинских средств защиты населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кармишин, А.М.** Теория поражающего действия ОМП [Текст] / А.М. Кармишин, О.П. Кравченко, М.В. Гагарин.— М.: ВАХЗ, 1995.— 150 с.

2. **Кармишин, А.М.** Структура пораженных при техногенных авариях [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин, В.М. Шишин // Сб.

матер. IX НПК (14–15 мая 2009 г.) «Проблемы прогнозирования ЧС». – М.: Центр «Антистихия», 2009.— С. 230–236.

3. **Кармишин, А.М.** Графоаналитический метод моделирования эвакуации при пожаре [Текст] / А.М. Кармишин, А.И. Карнюшкин, В.М. Шишин // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Матер. междунар. научно-практ. конф. 20 марта 2012 г.— М.: АГПС МЧС России, 2012.— С. 278–279.

4. **Кармишин, А.М.** Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий [Текст] / А.М. Кармишин, А.И. Карнюшкин, В.А. Киреев // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. VIII научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления.— СПб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009.— С. 199–210.

5. **Кармишин, А.М.** Оценка пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, В.И. Гуменюк // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: Сб. научных тр. V Всерос. научно-практ. конф.— СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013.— С. 70–77.

6. **Кармишин, А.М.** О количественных показателях опасности техногенных аварий [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, В.И. Гуменюк // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 2(171). С. 281–288.

7. **Кармишин, А.М.** Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев.— Монография, изд. 2-ое, перераб. и доп.— М.: ООО «АПР», 2011.— 330 с.

8. **Кармишин, А.М.** Токсикологические характеристики физиологически активных веществ [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин, В.Ф. Резничек // Безопасность в техносфере.— 2012. №4.— М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.— С. 42–46.

9. **Кармишин, А.М.** К вопросу оценки токсичности химически опасных веществ при чрезвычайных ситуациях химической природы [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, С.В. Заонегин, В.Д. Гладких [и др.] // Химическая и биологическая безопасность: Специальный выпуск, посвященный Федеральной целевой программе «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009— 20014 годы)». ФМБА.— М., 2012.— С. 117–121.

10. **Кармишин, А.М.** Оценка опасности воздействия опасных факторов пожара [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Тезисы докладов XXI Международной научно-практической конференции. Ч. 1 – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.— С. 16–21.

11. **Кармишин, А.М.** К вопросу об оценке опасных факторов пожара [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин [и др.] // Проблемы прогнозирования ЧС.— IX НПК 14–15 мая 2009 г. Проблемы прогнозирования ЧС. – М.: Центр «Антистихия» 2009.— С. 158–163.

12. **Кармишин, А.М.** Оценка показателей опасности при авариях взрывоопасных объектов [Текст] / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Сб. матер. X научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций». 5–6 октября 2010 г. Доклады и выступления.— М.: Центр «Антистихия», 2010.— С. 207–213.

REFERENCES

1. **Karmishin A.M., Kravchenko O.P., Gagarin M.V.** Teoriia porazhaiushchego deistviia OMP [Tekst].— M.: VAKhZ, 1995.— 150 s. (rus.)

2. **Karmishin A.M., Kireev V.A. Karniushkin A.I., Shishin V.M.** Struktura porazhennykh pri tekhnogennykh avariiakh [Tekst] // Sbornik materialov IX NPK.— 14–15 maia 2009 g. Problemy prognozirovaniia ChS.— M.: Tsentr «Antistikhiia» 2009.— S. 230–236. (rus.)

3. **Karmishin A.M., Karniushkin A.I., Shishin V.M.** Grafoanaliticheskii metod modelirovaniia evakuatsii pri pozhare [Tekst] // Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovatsii. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 20 marta 2012 g.— M.: AGPS MChS Rossii, 2012.— S. 278–279. (rus.)

4. **Karmishin A.M., Karniushkin A.I., Kireev V.A.** Aktual'nye problemy otsenki prostranstvenno-vremennykh pokazatelei opasnosti tekhnogennykh avarii/ stat'ia [Tekst] // Problemy prognozirovaniia chrezvychainykh situatsii. VIII nauchno-prakticheskaia konferentsiia. 8–10 oktiabria 2008 g. Doklady i vystupleniia.— SPb.: Izd-vo UGPS MChS Rossii, 2009.— S. 199–210. (rus.)

5. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumeniuk V.I.** Otsenka prostranstvenno-vremennykh pokazatelei opasnosti tekhnogennykh avarii [Tekst] // Bezopasnost' v chrezvychainykh situatsiiakh: sbornik nauchnykh trudov V vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.— SPb.: Izd-vo politekhn. un-ta, 2013.— S. 70–77. (rus.)

6. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumeniuk V.I.** O kolichestvennykh pokazateliakh opasnosti tekhnogennykh avarii [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. № 2(171).— S. 281–288. (rus.)

7. **Karmishin A.M., Kireev V.A.** Matematicheskie metody farmakologii, toksikologii i radiobiologii [Tekst] // Monografiia.— Izd. 2-e, pererab. i dop.— M.: OOO «APR», 2011.— 330 s. (rus.)

8. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karniushkin A.I., Reznichek V.F.** Toksikologicheskie kharakteristiki fiziologicheski aktivnykh veshchestv [Tekst] // Bezopasnost' v tekhnosfere.— 2012. №4.— M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2012.— S. 42–46. (rus.)

9. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Zaonegin S.V., Gladkikh V.D. [i dr.].** K voprosu otsenki toksichnosti khimicheski opasnykh veshchestv pri chrezvychainykh situatsiiakh khimicheskoi prirody [Tekst] // Khimicheskaia i biologicheskaia bezopasnost': Spetsial'nyi vypusk, posviashchennyi Federal'noi tselevoi programme «Natsional'naia sistema khimicheskoi i biologicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii (2009— 20014 gody)». FMBA.— M., 2012.— S. 117–121. (rus.)

10. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karniushkin A.I.** Otsenka opasnosti vozdeistviia opasnykh faktorov pozhara [Tekst] // Aktual'nye problemy pozharnoi bezopasnosti: Tezisy dokladov XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konf., Ch. 1 – M.: FGU VNIIPO MChS Rossii, 2009.— S. 16–21. (rus.)

11. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karniushkin A.I. [i dr.].** K voprosu ob otsenke opasnykh faktorov pozhara. Problemy prognozirovaniia ChS. [Tekst].— IX NPK. 14–15 maia 2009 g. Problemy prognozirovaniia ChS. – M.: Tsentr «Antistikhiia», 2009.— S. 158–163. (rus.)

12. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karniushkin A.I.** Otsenka pokazatelei opasnosti pri avariiakh vzryvoopasnykh ob»ektov [Tekst] // Sb. mater. X nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy prognozirovaniia chrezvychainykh situatsii. Otsenka riskov vozniknoveniia chrezvychainykh situatsii». 5–6 oktiabria 2010 g. Doklady i vystupleniia.— M.: Tsentr «Antistikhiia», 2010.— S. 207–213 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

СИНИЦЫН Виталий Васильевич — кандидат военных наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasiliy I. — Head of Chair «Management and Protection in Emergency Situations» (MPES), Doctor of Science, Professor; St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

KARMISHIN Alexander M. — Doctor of Science, Professor; Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

SINITSYN Vitaly V. — Candidate of Military Science, Professor; Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 378.147:004:81

М.А. Акопова, Н.А. Кабанова

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОМПЕТЕНТНОСТЬ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА ВУЗА

M.A. Akopova, N.A. Kabanova

INFORMATION METHODICAL COMPETENCE OF TEACHERS OF FOREIGN LANGUAGES UNIVERSITY

В статье описываются условия осуществления профессиональной деятельности преподавателя иностранных языков технического вуза, а также обосновывается необходимость развития информационно-методической компетентности преподавателя. Приводится определение понятия компьютерная лингводидактика. Уточняется определение информационно-методической компетентности преподавателя иностранных языков в техническом вузе, ее структура и содержание. Приводятся данные исследований авторов статьи, касающихся использования информационных технологий в обучении иностранным языкам.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛИНГВОДИДАКТИКА. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОМПЕТЕНТНОСТЬ. КОГНИТИВНЫЙ АСПЕКТ. ОПЕРАЦИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТ. ЦЕННОСТНО-МОТИВАЦИОННЫЙ АСПЕКТ КОМПЕТЕНТНОСТИ.

The factors and framework of professional activities of a foreign language university teacher are described. The necessity of developing the competency in IT and methodology of a foreign language teacher at technical universities is proved in the article. The definition of CALL, as well as IT and methodology competency is specified. The research data concerning using IT in foreign language teaching at universities are provided.

COMPUTER-ASSISTED LANGUAGE LEARNING. IT AND METHODOLOGY COMPETENCY. COGNITIVE ASPECT. OPERATIONAL ASPECT. MOTIVATIONAL AND CONATIVE ASPECTS OF COMPETENCY.

Гуманизация высшего образования предполагает общую для всего образовательного пространства гуманитарно-ориентированную цель образования: возможность повысить культуру обучаемых и их информационную компетентность [1].

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) содержит описание так называемых инструментальных компетенций, одна из которых предполагает способность выпускника (бакалавра) «к письменной и устной общей и профессиональной коммуникации на государственном (русском) и английском языке (ИК-3)» [2]. В стандарте также подчеркивается: необходимо, чтобы выпускник владел иностранным языком (далее — ИЯ) на уровне, достаточном для разговорного общения, а также для поиска и анализа иностранных источников информации. Коммуникативная компетенция бакалавра по большинству неязыковых направлений, описанная в документе, предполагает, что он должен уметь: использовать иностранный язык в межличностном общении и профессиональной деятельности; выражать свои мысли и мнение на иностранном языке; извлекать необходимую информацию из оригинального текста на иностранном языке по специальности;

обладать навыками публичной речи, аргументации, ведения дискуссии на иностранном языке [3].

Необходимость комплексного развития указанных иноязычных компетенций выпускника технического вуза, а также требования стремительно развивающегося информационного общества, в котором быстро растет объем информации, задают новые ориентиры модернизации российского высшего образования, и важной особенностью здесь является «смещение вектора образовательной деятельности в сторону самостоятельной работы» [4].

Тенденция к увеличению роли самостоятельной работы в иноязычной подготовке приобретает особую актуальность на ступени высшего профессионального образования, поскольку именно в вузе могут быть созданы все условия для самообразования и развития обучаемого, а психологические и возрастные особенности студента создают благоприятную среду для формирования *индивидуальной образовательной траектории*, в том числе в предметной области «иностранный язык».

Мы полагаем, что для достижения названных целей обучения ИЯ в техническом вузе, обеспечения эффективной и целенаправленной самостоятельной работы, а также формирования индивидуальных образовательных траекторий студентов необходимо внедрять в учебный процесс методически обоснованное использование новейших достижений в области применения информационно-компьютерных технологий (ИКТ) в обучении. В этом процессе большая роль отводится *дистанционным образовательным технологиям*, которые согласно принятому в 2012 году Федеральному закону Российской Федерации «О внесении изменений в закон Российской Федерации «Об образовании» в части применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий, а затем и в новой редакции Закона «Об образовании» могут применяться «при реализации образовательных программ независимо от форм получения образования» [5]. Понятие дистанционных образовательных технологий (далее ДОТ; англ. — distant learning technology) закреплено в пп. 5 п. 2 ст. 32 Закона РФ «Об образовании», согласно которому под этим термином понимают «образовательные технологии, реализуемые в основном с применением информационных и телекоммуникационных технологий при опосредованном (на расстоянии) или не полностью опосредованном взаимодействии обучающегося и педагогического работника» [6]. Реализация ДОТ в обучении ИЯ требует применения качественно новых педагогических технологий, имеющих свои особенности, отличающихся от технологий очного (контактное, традиционное) обучения, т. е. существует необходимость разработки и освоения *методики* применения ИКТ в обучении ИЯ. В отечественной науке данным вопросом занимается *компьютерная лингводидактика* (термин введен К.Р. Пиотровской в 1991 году) — область лингводидактики, которая изучает теорию и практику использования компьютерных и сетевых технологий в обучении языку [7]. В зарубежной литературе для обозначения методики применения ИКТ в обучении ИЯ используется термин Computer Assisted Language Learning (CALL) — обучение языкам с помощью компьютера [8]. В конце XX — начале XXI века теоретические вопросы и практические аспекты применения современных информационно-коммуникационных технологий в преподавании языков, в том числе в техническом вузе, нашли свое отражение в работах многих ученых, которые внесли большой вклад в развитие компьютерной лингводидактики как отдельной области научного знания (М.А. Бовтенко, Е.С. Полат, И.И. Халеева и др.) [9, 10].

Проблема применения ИКТ при обучении ИЯ в вузе исследуется отечественными и зарубежными учеными на протяжении нескольких десятилетий [7–10]. Наиболее значимыми для практического преподавания ИЯ в вузе, по нашему мнению, являются прикладные исследования, посвященные комплексному применению современных методов и приемов обучения в условиях использования ИКТ в образовательном процессе [8, 10].

В своих исследованиях, посвященных вопросам компьютерной лингводидактики, [11 и др.] доктор педагогических наук А.Д. Гарцов подчеркивает необходимость предъявления новых требований к профессиональной компетентности преподавателя ИЯ и программам повышения квалификации по адаптации преподавателей к работе в новых условиях информационного общества. Он также подчеркивает, что под воздействием развития электронных, цифровых и телекоммуникационных технологий меняется

образовательная парадигма, происходит формирование цифровой информационно-образовательной среды обучения и переход к новому виду — веб-формату — представления учебного материала, что, в свою очередь, приводит к развитию инновационных методик преподавания иностранных языков. Философия развития ИКТ заключается в создании таких инновационных средств производства (а в сфере образования — средств обучения), которые позволят специалисту (преподавателю) решать основные профессиональные задачи самостоятельно. [11]. Другими словами, возникает необходимость формирования таких профессиональных компетенций преподавателя ИЯ, которые позволят ему максимально автономно осуществлять профессиональную педагогическую деятельность в современных условиях.

При изучении вопроса формирования и развития профессиональных компетенций и компетентностей преподавателя ИЯ мы пришли к выводу, что, несмотря на большое число исследований, до сих пор нет единого подхода к их описанию и классификации. Проанализировав работы ученых (И.А. Зимняя, Т.Е. Исаева, Н.В. Кузьмина, А.К. Маркова, Л.М. Митина, Л.А. Петровская, А.В.Хуторской) по вопросу определения содержания и структуры профессиональной компетентности педагога, мы склонны согласиться с точкой зрения И.А. Зимней, которая рассматривает понятие профессиональной компетентности преподавателя в контексте целостного понятия ключевых компетенций. И.А.Зимняя выделяет три содержательных блока в поле ключевых компетенций:

1. Компетенции, относящиеся к самому человеку как личности, субъекту деятельности и общения (знание и соблюдение норм здорового образа жизни, правил личной гигиены, обихода и т. п.; компетенции — ценностно-смысловой ориентации; интеграции, связанные с расширением и приращением накопленных знаний; гражданственности; самосовершенствования и профессионального развития, языковое и речевое развитие);

2. Компетенции, относящиеся к социальному взаимодействию человека и социальной сферы (компетенции социального взаимодействия с обществом; компетенции общения, в том числе кросскультурного);

3. Компетенции, относящиеся к деятельности человека, — познавательной деятельности в сфере постановки и решения познавательных задач, продуктивного и репродуктивного познания, исследования, интеллектуальной деятельности; такой деятельности, как игра, учение, труд; в области средств и способов деятельности, включая планирование, проектирование, моделирование, прогнозирование; информационных технологий, связанные с приемом, переработкой, выдачей информации; преобразованием информации (чтение, конспектирование), массмедийными и мультимедийными технологиями; в сфере компьютерной грамотности; владение электронной, интернет технологией [12].

И.А.Зимняя в этой же работе отмечает, что компетентности в данном контексте будут включать такие характеристики, как:

«а) *готовность* к проявлению компетентности (т. е. мотивационный аспект);

б) *владение* знанием содержания компетентности (т. е. когнитивный аспект);

в) *опыт* проявления компетентности в разнообразных стандартных и нестандартных ситуациях (т. е. поведенческий аспект);

г) *отношение* к содержанию компетентности и объекту ее приложения (ценностно-смысловой аспект);

д) *эмоционально-волевую* регуляцию процесса и результата проявления компетентности» [12, с. 43].

Компетенции и формирующиеся на их основе компетентности преподавателя ИЯ, связанные с применением ИКТ, затрагивают все виды его профессиональной деятельности и носят надпредметный, междисциплинарный, общеинтеллектуальный характер. Тем не менее мы полагаем, что для качественной и количественной оценки степени сформированности отдельных компетенций в области использования ИКТ при обучении ИЯ, а также для их целенаправленного формирования и развития необходимо выделить их в отдельный блок, имеющий свое название, содержание, структуру, уровни и критерии оценки их сформированности. Оценивая степень сформированности определенной компетенции, мы учитываем, что при выполнении вышеуказанных условий (мотивационный, когнитивный, поведенческий, ценностно-смысловой и эмоционально-волевой аспекты про-

явления [12]) мы получим сформированную на ее основе компетентность.

Анализ научной и методической литературы [13–15 и др.] показал, что компетенции и компетентности, описывающие использование ИКТ в деятельности преподавателя ИЯ, имеют несколько вариантов названий в зависимости от содержания и структуры, которые выделяют авторы исследований. Наиболее часто встречаются практически синонимичные понятия информационной (ИК), информационно-коммуникационной и ИКТ-компетенции и компетентности. Формированию ИК (ИКТ-компетенции) преподавателя ИЯ вуза либо будущего преподавателя ИЯ посвятили свои исследования многие отечественные ученые (Л.А. Леонтьева, М.А. Бовтенко, Е.Н. Соловова, М.Н. Евстигнеев, П.В. Сысоев и др.). В данных исследованиях много внимания уделено обучению преподавателей поиску, обработке, отбору информации, работе с электронными базами данных, словарями, библиотеками, а также с офисными программами и специальными программными средствами (например, конкордансами) и т. п. Однако, по нашему мнению, вопросы применения ИКТ преподавателем ИЯ технического вуза при создании *учебных материалов*, в процессе *управления обучением* ИЯ в информационно-коммуникационной среде вуза, при *организации самостоятельной работы* студентов и многие другие аспекты, связанные с обучением как одной из ключевых профессиональных функций преподавателя, исследован недостаточно. Нам не удалось найти современных, актуальных, полноценных и завершенных научных исследований, посвященных целенаправленному формированию данных компетенций и компетентностей преподавателя ИЯ технического вуза. Неразработанность данной темы, а также тот факт, что при быстром развитии ИКТ необходимо постоянно актуализировать и развивать указанные компетенции и компетентности преподавателя, определили необходимость выделить отдельный блок умений, навыков, способностей, которые мы определили как **информационно-методическую компетентность (ИМК) преподавателя ИЯ технического вуза**.

Под ИМК преподавателя ИЯ технического вуза будем понимать способность и готовность решать проблемы и задачи, возникающие в процессе обучения студентов иностранному языку с использованием информационных и коммуникационных технологий; они *включают умения, навыки, мотивационно-волевые установки, а также субъективный опыт преподавателя ИЯ технического вуза в области подбора, структурирования, создания и применения в преподавательской деятельности учебно-методических материалов, а также управления учебным процессом с помощью ИКТ.*

Уровень сформированности ИМК будет определяться уровнем сформированности отдельных ее составляющих, их взаимосвязанностью и взаимодополняемостью. Для определения условий формирования и развития ИМК следует рассмотреть ее структуру и содержание.

В таблице представлена трактовка структуры профессиональной компетентности, предложенная ведущими российскими учеными [12, 16–19].

Также в соответствии со стратегией модернизации содержания образования можно утверждать, что понятие «компетентность» включает когнитивную (знаниевую), операционально-технологическую (деятельностную) и мотивационную (в ее составе также этическую, социальную и поведенческую, т. е. ценностную) составляющие [20].

Таким образом, проанализировав определения и выделив структурные компоненты компетентности, предложенные различными авторами, мы выделяем следующие *компоненты ИМК как профессиональной компетентности:*

когнитивный (знаниевый) компонент и *операциональный* (деятельностный) компонент (умения, навыки, способы деятельности);

аксиологический (ценностно-мотивационный) компонент (личностный смысл, мотивы, позиции, установки);

личностно-субъективный компонент (опыт профессиональной деятельности по отношению к каждому из компонентов).

Взаимосвязь перечисленных компонентов отражена на рисунке.

Когнитивный и операциональный аспекты ИМК настолько взаимосвязаны, что их содержательное наполнение интегрировано и не может быть разделено при описании данной компетентности. Знание об информации не может существовать отдельно от операций с ней. Специфика работы с ИКТ состоит и в том, что без деятельности, связанной с информацией, невозможно и знание о ней. Таким образом, компо-

Определения структуры профессиональной компетентности

Автор	Определение компетентности	Структурные компоненты компетентности
Л.М. Митина	Знания, умения, навыки, а также способы и приемы их реализации в деятельности, общении, развитии (саморазвитии) личности	Когнитивный (знания), операциональный (умения, приемы реализации в деятельности), личностный (саморазвитие)
И.А. Зимняя	Основывающийся на знаниях, интеллектуально и личностно обусловленный опыт социально-профессиональной жизнедеятельности человека	Когнитивный (знания); личностный (опыт)
Е.В. Бондаревская	Личностно-осознаваемая, вошедшая в субъективный опыт, несущая личностный смысл система знаний, умений, навыков, которая имеет универсальное значение, т. е. может быть использована в различных видах деятельности при решении множества жизненно значимых проблем	Личностный (субъективный опыт); ценностный (личностный смысл); когнитивный (знания); операциональный (умения, навыки)
А.В. Хуторской	Совокупность взаимосвязанных качеств личности (знания, умения, навыки, способы деятельности), задаваемых по отношению к определенному кругу предметов и процессов и необходимых для качественной продуктивной деятельности по отношению к ним. Компетентность — владение, обладание человеком соответствующей компетенцией, включающей его личностное отношение к ней и предмету деятельности	Когнитивный (знания); операциональный (умения, навыки, способы деятельности); личностный (опыт); ценностный (личностное отношение)
Н.Л. Гончарова	Компетентность интегрирует в себе когнитивный (знания), операциональный (способы деятельности и готовность к осуществлению деятельности) и аксиологический (наличие определенных ценностей) аспекты	Когнитивный (знания); операциональный (способы деятельности, готовность); аксиологический (ценности)

ненты содержания и критерии оценки сформированности когнитивного и операционального (КО) компонентов ИМК ($К_n$(КО), где n — номер критерия по порядку) могут быть описаны следующим образом:

$К_1$(КО): способность осуществлять продуманную, структурированную, организованную деятельность по поиску, обработке, передаче, классификации информационного ресурса на ИЯ (например, находящегося в сети интернет), предназначенного для обучения;

$К_2$(КО): умение отбирать и использовать в процессе обучения (на занятиях и при организации самостоятельной работы) иноязычные электронные издания научного и образовательного назначения, находящиеся на локальных носителях информации и в сети интернет;

$К_3$(КО): умение продуцировать структурированную, построенную в соответствии с принципами и методами обучения ИЯ, технически оформленную информацию (информационный ресурс), в том числе с целью усовершенствования информационно-методического обеспечения процесса обучения ИЯ (*информационно-методический ресурс*);

Рис. 1. Структцрные компоненты ИМК преподавателя иностранного языка технического вуза

K_4(КО): умение использовать отобранные в сети интернет и разработанные преподавателем иноязычные ресурсы в таком сочетании, которое позволит решать профессиональные задачи, связанные с обучением, максимально эффективно;

K_5(КО): умение планировать, разрабатывать и проводить диагностирующие, промежуточные и итоговые контрольные мероприятия для оценивания уровня сформированности иноязычной коммуникативной компетенции обучаемых с использованием ИКТ (в частности, ИКС вуза);

K_6(КО): умение организовывать обмен информацией учебного и научного характера (включая общение и совместную работу по созданию и усовершенствованию информационно-методических ресурсов, проектную деятельность, решение учебных задач) между участниками учебного процесса посредством ИКТ, например интернет-сервисов Web 2.0 и/или ИКС вуза.

Говоря об **аксиологическом (ценностно-мотивационном)** компоненте (А) ИМК, следует рассмотреть понятие профессиональной готовности преподавателя к использованию средств ИКТ в процессе обучения студентов. Готовность преподавателя к тому или иному аспекту деятельности В.А. Сластенин определяет как особое психическое состояние, как наличие у субъекта образца структуры определенного действия и постоянную направленность на его выполнение [21]. Готовность отражает требования к свойствам личности и способностям, включая познавательные (например, целеполагание, оценка значимости профессиональных задач), мотивационные (интерес к предмету и его преподаванию, стремление к саморазвитию и самосовершенствованию в профессиональной сфере) и волевые (преодоление трудностей, умение преодолевать кризисные состояния, мобилизовывать свои силы) компоненты личности преподавателя.

Следовательно, опираясь на описанные выше компоненты, критерии оценки сформированности аксиологического компонента ИМК (обозначим их K_n(А), где n — номер критерия по порядку) можно описать следующим образом:

K_1(А): адекватное определение целей и задач, обоснование целесообразности применения ИКТ на занятии или в самостоятельной работе студентов;

K_2(А): проявление интереса к новым технологиям в преподавании ИЯ, поиску новых способы решения задач, связанных с обучением ИЯ;

K_3(А): умение преодолевать трудности, возникающие в процессе освоения ИКТ, разумно планировать свое рабочее время.

Личностно-субъективный компонент (Л) ИМК (то есть опыт профессиональной деятельности по отношению к каждому из компонентов) является по определению субъективной категорией и будет зависеть от многих условий, прежде всего от личности преподавателя и опыта его профессиональной деятельности в целом. Оценка сформированности данного компонента представляет определенную сложность в силу его субъективности, и, по нашему мнению, может быть проведена с помощью:

анкетирования;

сравнительного анализа предыдущего и нового опыта деятельности в преподавании ИЯ с помощью ИКТ (например, оценивание разработанных дидактических материалов и успешности их применения в практической преподавательской деятельности);

составления профессионального портфолио, включающего авторские разработки с использованием ИКТ;

рефлексии (осознания и анализа своего опыта) и самооценивания преподавателем своей профессиональной деятельности.

Критерии оценки сформированности данного компонента (K_n(Л), где n — порядковый номер критерия) будут зависеть от описанных выше компонентов ИМК, поскольку личностно-субъективный компонент включает опыт деятельности преподавателя в целом.

Для оценки сформированности различных компонентов ИМК нами был разработан опрашиваемая анкета, включающая вопросы, посвященные знаниям, умениям, мотивационно-волевым установкам и описанию личного опыта, связанного с применением ИКТ в обучении ИЯ. На момент написания статьи в опросе приняли участие 43 преподавателя ИЯ из вузов Санкт-Петербурга, Москвы, Великого Новгорода, Хабаровска и других городов России (СПбГУ, СПбГПУ, НИУ ИТМО, СПбГУАП, СЗИП, РГПУ им. Герцена, ТвГУ и др.). Целью первой части опроса было выявление условий осуществления профессиональной деятельности преподавателя

ИЯ современного вуза. Результаты опроса показали, что большинство опрошенных преподавателей оценивают свой пользовательский уровень владения компьютерными технологиями как высокий («уверенный пользователь»), а также имеют регулярный доступ к компьютеру дома и на рабочем месте, в том числе и к сети Интернет. Однако, большинство респондентов используют интернет в основном для обмена сообщениями по электронной почте, поиска личностно значимой информации и профессионально значимой информации. Процесс обучения студентов и участие в профессиональных сообществах, общение с коллегами упомянули не более 13 % опрошенных. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что даже при наличии необходимых технических и организационных условий, профессиональный потенциал ИКТ используется преподавателями ИЯ не полностью.

Вторая часть опроса была нацелена на оценку уровня сформированности когнитивно-операционального компонента ИМК, а именно выявление конкретных умений использования ИКТ в процессе обучения студентов. Ряд вопросов, касающихся применения знаний и умений на практике, имел своей целью выявление уровня личностно-субъективного компонента ИМК. Преподаватели в основном используют различные формы ИКТ при подготовке и проведении занятий, однако только 7 % опрошенных указали, что используют авторские материалы (созданные с использованием ИКТ) и материалы собственных дистанционных курсов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в целом большинство преподавателей знают о некоторых возможностях ИКТ, умеют их применять на практике, но уровень используемых технологий остается довольно низким.

Вопросы третьего блока опроса были призваны выявить мотивационно-волевые аспекты ИМК, т. е. сформированность аксиологического компонента. Абсолютное большинство (84 %) опрошенных поддерживают введение дистанционного сопровождения очных занятий по ИЯ в вузе, но при этом меньше половины респондентов готовы начать разрабатывать собственные ресурсы, причем при финансовой и организационной поддержке. Таким образом, мы полагаем, что ценностные установки и мотивация преподавателей ИЯ находятся на уровне осознания преимуществ использования ИКТ, однако немногие демонстрируют готовность активно внедрять их в свою собственную профессиональную деятельность.

Факторы, мешающие, по мнению преподавателей, внедрению ИКТ в процесс обучения ИЯ, показаны на рис. 2

Из этого рисунка видно, что большая часть респондентов считает проблемы финансирования и организационно-методические проблемы более значимыми, чем технические или психологические. Следовательно, необходимо решать вопросы, связанные организацией и стимулированием использования ИКТ в обучении, как на уровне коллектива преподавателей, так и на уровне вуза и системы высшего профессионального образования в целом.

Вопрос формирования ИМК преподавателя ИЯ вуза — актуальная задача на современном этапе развития лингводидактики, она требует дальнейшего осмысления и исследования.

Рис. 2. Факторы, препятствующие внедрению ИКТ в процесс обучения ИЯ

Высокий уровень сформированности данной компетентности будет способствовать повышению качества иноязычной подготовки выпускников вузов, формированию у них ключевых компетенций с помощью современных методов, средств и приемов, что в свою очередь будет способствовать повышению конкурентоспособности выпускников технических вузов России в соответствии с их личными профессиональными потребностями и социальным заказом общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колоницкая, О.Л.** Роль гуманитарной среды в повышении качества подготовки специалиста в техническом вузе [Текст]: Автореф. дисс. ... канд. пед. наук / О.Л. Колоницкая / СПбГПУ.— СПб., 2008 г.— 20 стр.

2. **Федеральный государственный стандарт** высшего профессионального образования (ФГОС ВПО), по направлениям подготовки бакалавриата [Электронный ресурс] // Свободный режим доступа: http:// минобрнауки.рф/документы/924.

3. **Яроцкая, Л.В.** Компетентностный подход к профессионально-ориентированному обучению иностранному языку на разных этапах учебного курса [Текст] / Л.В. Яроцкая // Компетентностный подход как основа совершенствования методики обучения иностранному языку: проблемы и перспективы.— Вестник МГЛУ.— 2008.— Сер.: Лингводидактика.— Вып. 546. С. 79–86.

4. **Андреев, А.А.** Роль и проблемы преподавателя в среде e-Learning [Текст] / А.А. Андреев // Высшее образование в России.— 2010. №8–9.— С. 41–45.

5. Российская газета, Федеральный выпуск №5719 от 2 марта 2012 года. [Электрон. ресурс] // Режим доступа http://www.rg.ru/2012/03/02/elektronnoe-obuchenie-dok.html, свободный.— Дата обращения— 2 июня 2013г.;

6. **Пиотровская, К.Р.** Современная компьютерная лингводидактика [Текст] / К.Р. Пиотровская.— Научно-техническая информация (НТИ). Серия 2. Информационные процессы и системы.— 1991. № 4.— С. 26.

7. **Warschauer, M.** Computer assisted language learning: an introduction [Текст] / M. Warschauer.— Ed. by S. Fotos. Multimedia Language Teaching.— Tokyo, 1996.— P. 3–20.

8. **Бовтенко, М.А.** Компьютерная лингводидактика [Текст] / М.А.Бовтенко.— М., 2005.

9. **Полат, Е.С.** Дистанционное обучение иностранным языкам [Текст] / Е.С. Полат // Дистанционное образование.— 1998. №5.

10. **Гарцов, А.Д.** Электронная лингводидактика в системе инновационного языкового образования [Текст]: дис. ... докт. пед. наук: 13.00.02.— Москва, 2009.

11. **Зимняя, И.А.** Ключевые компетенции— новая парадигма результата современного образования [Текст] / И.А. Зимняя // Компетенции в образовании: опыт проектирования: сб науч. тр. / Под ред. А.В. Хуторского. М.: Изд-во Науч.внедренч. предприятия «ИНЭК», 2007.— С. 33–44.

12. **Бучельников, В.В.** Развитие информационной компетентности преподавателя гуманитарных дисциплин в контексте компетентностного подхода [Текст] / В.В. Бучельников // Успехи современного естествознания.— 2009. № 10.— С. 91–92.

13. **Гендина, Н.И.** Основы информационной культуры [Текст] / Н.И. Гендина // Основы информационной культуры: Сборник метод. матер.— Кемерово, 1999.— С. 6–7.

14. **Лебедева, М.Б.** Что такое ИКТ-компетентность студентов педагогического университета и как ее формировать [Текст] / М.Б. Лебедева, О.Н. Шилова // Информатика и образование.— 2004. №3.— С. 95–99.

15. **Митина, Л.М.** Психология профессионального развития [Текст] / Л.М. Митина.— М., 1998.

16. **Бондаревская, Е.В.** Парадигмальный подход к разработке содержания ключевых педагогических компетенций / [Текст] / Е.В. Бондаревская, С.В. Кульневич // Педагогика.— 2004. № 10.

17. **Хуторской, А.В.** Ключевые компетенции как компонент личностно-ориентированной парадигмы образования [Текст] / А.В. Хуторской // Народное образование.— 2003. № 5.— С. 58–64.

18. **Гончарова, Н.Л.** Категории «компетентность» и «компетенция» в современной образовательной парадигме [Текст] / Н.Л. Гончарова // Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Сер.: Гуманитарные науки.— 2007. № 5.

19. **Пинский, А.А. [и др.].** Стратегия модернизации содержания общего образования. Материалы для разработки документов по обновлению общего образования [Текст] / А.А. Пинский. [и др.]. — М.: Изд-во «Мир книги», 2001.

20. **Сластенин, В.А.** Педагогика [Текст]: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / В.А. Сластенин, И.Ф. Исаев, Е.Н. Шиянов; Под ред. В.А. Сластенина.— М.: Издат. центр «Академия», 2002.— 576 с.

REFERENCES

1. **Kolonitskaia O.L.** The Role of Humanitarian Environment in Quality Improvement of Teaching in Technical Universities [Tekst]: Published summary of a PhD thesis (pedagogy).SPbGPU.— SPb., 2008.— 20 p. (rus.)

2. **Federal State Standard** of Higher Professional Education, Bachelor Degree Programs [internet resource] available free at http://Minobrnauki.rf/documenty/924. (rus.)

3. **Yarotskaia L.V.** Competence approach to professionally-oriented foreign language teaching at different levels of the curriculum [Tekst] / L.V.Yarotskaia // Competence approach as a base of improving foreign language teaching methodology: problems and prospects.— Vestnik MGLU. Linguodidactics Series.— Issue 546. 2008.— P. 79–86. (rus.)

4. **Andreiev A.A.** The role and problems of a teacher in e-learning environment [Text] // Higher Edvation in Russia.— 2010. № 8–9. (rus.)

5. Russian Newspaper, Federal Issue No. 5719 from 02 March 2012. Available free at http://www.rg.ru/2012/03/02/elektronnoe-obuchenie-dok.html. Date of reference— 2 June 2013. (rus.)

6. **Piotrovskaia K.R.** Contemporary computer linguodidactics [Tekst] // Information in science and technology (NTI). Series 2. Information processes and systems.— 1991. № 4.— P. 26 (rus.)

7. **Warschauer M.** Computer assisted language learning: an introduction [Tekst] // Ed. by S. Fotos. Multimedia Language Teaching.— Tokyo, 1996.— P. 3–20. (rus.)

8. **Bovtenko M.A.** Computer-Assisted Language Learning [Tekst].— M., 2005. (rus.)

9. **Polat E.S.** Distance Learning and Foreign Language Teaching [Tekst] // Distance Education.— 1998. № 5. (rus.)

10. **Gartsov A.D.** Electronic linguodidactics in the system of innovative language teaching [Tekst]: Doctoral Thesis: 13.00.02.— Moscow, 2009. (rus.)

11. **Zimniaia I.A.** Key competences as a new paradigm of the outcomes of education [Tekst] // Competences in education: experience in design: scientific papers collection / Ed. by A.V. Khutorskoi.— M.: Scientific Enterprise INEK.— 2007.— P. 33–44. (rus.)

12. **Buchelnikov V.V.** The Development of information competency of a Humanities teacher in the context of competence approach [Tekst] // Developments of Modern Natural Sciences.— 2009.— № 10.— P. 91–92. (rus.)

13. **Gendina N.I.** Fundamentals of Information Culture [Tekst] // Fundamentals of Information Culture: Methodology collection.— Kemerovo, 1999.— P. 6–7. (rus.)

14. **Lebedeva M.B., Shilova O.N.** What is IT competence of students of pedagogical university and how it can be developed [Tekst] // Informatics and Education.— 2004. № 3.— P. 95–99. (rus.)

15. **Mitina L.M.** Psychology of Professional Development [Tekst].— M., 1998. (rus.)

16. **Bondarevskaia E.V., Kulnevitch S.V.** Paradigm approach to the development of the content of key pedagogical competences [Tekst] / Pedagogika.— 2004. № 10. (rus.)

17. **Khutorskoi A.V.** Key competences as part of learner-centered educational paradigm [Tekst] // Narodnoie Obrazovanie.— 2003. № 5. P. 58–64. (rus.)

18. **Goncharova N.L.** The concepts of competence and competency in modern educational paradigm [Tekst] // Scientific Journal of North. Cauc. STU. Humanities— 2007. № 5. (rus.)

19. **Pinskiy A.A. [et all.].** The Strategy of Modernization of the Content of Secondary Education. The source for developing the documentation of secondary education renovation [Tekst].— M.: Mir knigi, 2001. (rus.)

20. **Slastenin V.A. [et all.].** Pedagogy: textbook for university students [Tekst] / Ed. by V.A. Slastenin.— Moscow, «Academia» Publishing House, 2002.— 576 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АКОПОВА Мария Алексеевна — доктор педагогических наук профессор заведующая кафедрой лингводидактики и перевода, директор Института прикладной лингвистики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: lingua@mail.spbstu.ru

КАБАНОВА Надежда Александровна — старший преподаватель кафедры лингводидактики и перевода Института прикладной лингвистики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kabanova@bk.ru

AUTHORS

AKOPOVA Maria A. St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail:

KABANOVA Nadezhda A. St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kabanova@bk.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 331.108.26

В.А. Базжина, В.В. Лобатюк

ЗАКРЕПЛЕНИЕ МОЛОДЕЖИ В ВУЗАХ КАК ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО КАДРОВОГО РЕЗЕРВА

V.A. Bazzhina, V.V. Lobatyuk

ATTACHING OF YOUNG PEOPLE IN THE UNIVERSITIES AS A BASIS OF SCIENTIFIC-PEDAGOGICAL PERSONNEL RESERVE

В статье рассматриваются аспекты управления трудовым потенциалом вуза, проанализирован опыт по внедрению ведущими российскими университетами системы кадрового резерва. Представлены результаты социологического исследования, проведенного с целью выявления важности мер по привлечению и закреплению молодежи в вузах, изложены основные понятия системы молодежного научно-педагогического кадрового резерва Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ТРУДОВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ВУЗА. НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ КАДРОВЫЙ РЕЗЕРВ. МОТИВАЦИЯ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ. МОЛОДЕЖНАЯ ПОЛИТИКА ВУЗА. ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВУЗА.

The paper discusses the aspects of the HR management in a university. An experience of the implementation of a personnel reserve system by the leading Russian universities is analysed. The results of the survey performed in order to identify the importance of measures to attract and fasten young people in high schools are presented. The basic concepts of the System of Youth Research and Teaching Personnel Reserve in St. Petersburg State Polytechnical University are described.

HR MANAGEMENT OF UNIVERSITY. SYSTEM OF YOUTH RESEARCH AND TEACHING PERSONNEL. MOTIVATION RESEARCH AND TEACHING STAFF. YOUTH POLICY UNIVERSITY. COMPETITIVENESS OF THE UNIVERSITY.

Результаты исследования системы управления персоналом в российских вузах свидетельствуют об активизации работы с кадровым резервом. Известно, что в каждой организации есть свой порядок приема, увольнения, назначения окладной и премиальной части оплаты труда, применения поощрений и наказаний. Однако в основе эффективной системы управления персоналом лежит кадровая политика, базирующаяся на программе создания оптимального резерва кадров на выдвижение. Традиционно такой резерв рассматривается как система выращивания кадров с целью дальнейшего повышения по иерархической лестнице административно-управленческого аппарата. Анализ ситуации в российских вузах показывает, что необходимо более активно заниматься продвижением и развитием научно-педагогических кадров, созданием условий для реализации их трудового потенциала. Трудовой потенциал представляет собой обобщающую характеристику меры и качества совокупной способности к труду трудовых ресурсов, их динамизм как непрерывный, развивающийся, многоплановый процесс, характеризующий скрытые, не проявившие еще себя возможности или способности в соответствующих сферах жизнедеятельности [1, с. 21]. От степени его реализации у научно-педагогического работника зависит эффективность работы вуза в целом, т. е. уровень образованности студентов, научная активность преподавателей и другие показатели.

Суть кадровых сложностей в данный переходный период для системы высшего образования в России состоит в уменьшении самого продуктивного возрастного слоя исследователей — 30–40-летних. Среди всех отечественных ученых когорта 30–39-летних составляла

в 2012 году всего 15 %, средний возраст кандидатов наук был 53 года, а докторов наук — 61 год. При этом доля исследователей до 29 лет в последние годы неуклонно растет и приближается к 20 %. Из чего можно сделать вывод, что большой процент молодых людей покидает вуз вскоре после защиты кандидатской диссертации [2, С. 45–47].

Опыт ведущих российских университетов показывает, что привлечение и удержание молодых, перспективных научных кадров относится к задачам стратегически важным и должны находиться в зоне пристального внимания руководства вуза. Целенаправленная работа в данной области позволяет обеспечить академическую привлекательность университета, рост показателей вуза, повышение результативности специалистов, снижение потерь из-за текучести персонала и недостатка квалифицированных кадров, а также повышение удовлетворенности работников за счет прозрачности карьерных, профессиональных и финансовых перспектив.

Значимость перечисленных выше мер подтверждается программами, связанными с повышением конкурентоспособности ведущих университетов России. Санкт-Петербургского государственного политехнического университета вошел в число 15 вузов России, ставших победителями конкурсного отбора на право получения субсидии Минобрнауки России в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров [3]. Конкурс стал одним из мероприятий по реализации положений Указа Президента России «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки». Особое внимание в программах повышения конкурентоспособности вузов уделяется работе с молодыми учеными, в частности мероприятиям по привлечению в вузы молодых ученых, имеющих опыт работы в ведущих иностранных и российских университетах и научных организациях, по интенсификации международной и внутрироссийской академической мобильности научно-педагогических работников, совершенствованию деятельности аспирантуры и докторантуры [4].

В некоторых ведущих вузах России работа с молодыми учеными базируется на формировании кадрового резерва. Рассмотрим наиболее эффективные системы кадрового резерва, применяемые в российских вузах, причем общая направленность идей их создания схожа, а устройство организации и функционирования различаются. Так, например, в МГУ целями данной системы являются: укрепление кадрового потенциала посредством отбора и поддержки молодых талантливых сотрудников, аспирантов, докторантов в области образования, науки, инноваций и организационной работы и формирования индивидуальных профессиональных траекторий работников МГУ (создание базы данных, анализ профессиональных траекторий). Участниками могут стать кандидаты наук до 35 лет и доктора наук до 40 лет включительно. Если же говорить о порядке создания, то комиссия ученого совета МГУ по кадрам и стратегии развития рассматривает представления подразделений и формирует состав кадрового резерва, численность которого колеблется около 100 человек. Срок нахождения в кадровом резерве — один год с правом продления, результаты могут быть отмечены грамотой, благодарностью, выплатой премии или назначением стимулирующей надбавки [5].

Существуют и другие модели кадрового резерва, например, в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича и Северо-Восточном федеральном университете имени М.К. Аммосова к каждому резервисту прикрепляется куратор, который разрабатывает план работы на год и контролирует его выполнение. При этом в Северо-Восточном федеральном университете имени М.К. Аммосова наставником может быть назначен сотрудник с опытом работы от восьми лет, который получает надбавку в размере 15–25 % от оклада в зависимости от количества резервистов. Участие в кадровом резерве предусматривает обучение, стажировки и временное исполнение обязанностей, а после истечения года кандидат принимается на резервируемую должность или, если план не выполняется, ему может быть отказано в этом. Резервисту оплата не производится [6]. В СПбГУТ имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, наоборот, премируются резервисты, выплачивается надбавка, равная одному окладу, а кураторы не получают материального поощрения.

Наибольший срок нахождения в кадровом резерве — пять лет — применяется в Санкт-

Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, Северном федеральном университете и Томском политехническом университете, что сказывается и на содержании применяемых систем [7, 8] Работа проводится по плану, в котором предусматриваются конкретные мероприятия по следующим направлениям: учеба в рамках принятой в университете системы обучения, переподготовка и повышение квалификации сотрудников; обучение по программам, ориентированным на подготовку резерва; стажировка на резервной должности; временное замещение отсутствующих руководителей и специалистов на период их командировок, отпусков и т. п., а также реализация проектной программы развития участника кадрового резерва. На каждого резервиста совместно научным руководителем и заведующим кафедрой составляется план-график на пять лет, согласованный с директором института, и согласно этому составляется индивидуальный план на год. Ежегодно деятельность резервистов оценивается кадровой комиссией и принимается решение о продлении работы с данным сотрудником [9].

В настоящее время система кадрового резерва создается и в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете. В рамках разработки системы кадрового резерва в апреле—мае 2013 года проводилось пилотное исследование с целью выявления важности мер по привлечению и закреплению молодежи в вузах. В основу положен метод социологического опроса в форме анонимного анкетирования сотрудников в возрасте до 35 лет, имеющих степень кандидата наук, и до 40 лет, имеющих степень доктора наук, оформленных по основному месту работы в СПбГПУ. В опроснике были поставлены закрытые и открытые вопросы, что позволило исследовательской группе выяснить мнение респондентов по ряду актуальных вопросов. Выбор данной категории сотрудников обосновывается тем, что лица, имеющие на момент 35-летия степень кандидата наук или до 40-летия — доктора наук, являются наиболее активными исследователями. Если при этом они выбрали в качестве основного места СПбГПУ и успешно прошли конкурсный отбор, то они наиболее заинтересованы в дальнейшей активной работе в рамках данного учреждения.

Всего было опрошено 25 сотрудников четырех институтов университета: института гуманитарного образования, инженерно-экономического института, инженерно-строительного института, института энергетики и транспортных систем. Выборка образовывалась следующим образом: были отобраны в случайном порядке четыре института (что составляет около 30 % от их общего количествава), в которых опрашивалась половина молодых кандидатов и докторов наук, наиболее активно участвующих в конкурсах грантов различных уровней. Таким образом, респондентами стали успешные молодые сотрудники СПбГПУ. Из 25 опрошенных было 15 мужчин и 10 женщин, средний возраст которых составил 29 лет. Самым молодым участникам было по 27 лет, самым старшим — по 39 лет.

К основным результатам исследования относится, в частности, компиляция и анализ мнений о степени важности мер по привлечению молодых кандидатов и докторов наук к работе в вузе, которые оценивались как «наименее значимые» — «наиболее значимые» по пятибалльной шкале. Анализ показал, что все опрошенные сотрудники считают наиболее значимой мерой увеличение размера оплаты труда. Далее следуют такие меры как улучшение жилищных условий и материальной базы для проведения научных исследований, что было отмечено в 50 % анкет. Также популярны (поддержали 45 % опрошенных): расширение персональной грантовой поддержки научной деятельности молодых ученых; развитие системы стажировок и временных позиций PostDoc в ведущих зарубежных и российских научно-образовательных центрах. Наименее значимыми мерами оказались расширение возможностей участия в научно-технических проектах мирового масштаба и в конференциях различного уровня. При этом половина респондентов отметила, что знает о применении в СПбГПУ таких мер по привлечению и удержанию молодых ученых, как надбавки из внебюджетных средств институтов, гранты, оплата труда по НИОКР и оплата зарубежных командировок (проезд, проживание). Привлечение молодых ученых к исследовательским проектам и кадрово-административный рост отметили как известные им треть опрошенных сотрудников, а поддержание научных инициатив и наличие социальных программ указали лишь 10 %. Опи-

сывая причины, по которым СПбГПУ был выбран в качестве основного места работы, 80 % респондентов указали возможность самореализации и удобный рабочий график, 30 % — интересную творческую среду и престиж работы, 10 % — инерцию, зарубежные командировки и возможности карьерного роста. Респондентам был задан вопрос о стимулирования активной научной деятельности за счет введения дополнительной ежемесячной выплаты. Положительно ответили 95 % опрошенных, указав при этом различные суммы в диапазоне от 10 до 100 тысяч рублей, усредненный показатель составил 33,3 тысячи рублей. Большинство респондентов — 95 % — указали основным источником дохода за последний год заработную плату, около 30 % также дополнительно указали на наличие грантов отечественных фондов, хоздоговоров и контрактов с отечественными партнерами, коммерческую деятельность и социальные выплаты [10].

Подводя итоги выборочного исследования, можно сделать вывод о том, что в СПбГПУ созданы условия для активной научной деятельности ученых, при этом, по мнению респондентов, ежемесячная стимулирующая набавка смогла бы увеличить данный показатель. Следовательно, введение системы кадрового резерва, основанной на материальной поддержке сотрудников, наиболее перспективных с точки зрения будущей научно-преподавательской деятельности, способствовало бы созданию условий для закрепления перспективных молодых преподавателей, улучшению качественных показателей профессорско-преподавательского состава и повышению трудового потенциала университета.

На основании проведенного исследования и обобщения опыта ведущих вузов России разработано положение о молодежном кадровом резерве научно-педагогических работников ФГБОУ ВПО «СПбГПУ». Под молодежным кадровым резервом научно-педагогических работников будем понимать группу молодых работников СПбГПУ, специально сформированную в установленном порядке для их систематической целенаправленной подготовки и ориентированию в последующем остаться работать в университете. Планируется, что кадровый резерв будет сформирован из соискателей, являющихся молодыми работниками университета или иных научно-образовательных организаций, а также студентами, аспирантами и докторантами, ориентированными на научно-педагогическую деятельность. То есть резервистами будут сотрудники, которые способны в период нахождения в кадровом резерве защитить диссертацию на соискание ученой степени кандидата или доктора наук, целенаправленно и систематически развивать и повышать квалификацию, а также обладают потенциалом развития относительно будущей научно-преподавательской деятельности в должности доцента, профессора или научного сотрудника. Возрастной ценз для резервистов колеблется от 30 лет (для сотрудников, не имеющих ученой степени) до 45 лет (имеющих ученую степень доктора наук).

Основные цели молодежного кадрового резерва: развитие системы обновления и улучшения качественного состава научно-педагогических кадров, способного обеспечить достижение стратегических целей вуза с учетом перспектив его развития; установление сбалансированности профессионального и возрастного состава научно-педагогических работников; внедрение в практику механизмов планирования карьеры; повышение уровня мотивации к профессиональному росту; адаптация молодых специалистов, обеспечение преемственности профессиональных знаний и опыта путем развития института кураторства и консультирования; создание базы данных потенциальных работников, обеспечивающей потребности университета; предупреждение возникновения дефицита научно-педагогических кадров.

Формирование кадрового резерва будет происходить на конкурсной основе и исходя из потребности в замещении соответствующих должностей, то есть ежегодно на основании предложений руководителей целевых подразделений будет составляться список вакантных резервных позиций. Руководителям подразделений при планировании качественного и количественного состава резервистов рекомендовано учитывать возрастной состав работников, сроки ожидаемого высвобождения персонала (ротация, выход на пенсию и др.), квалификацию работников, планируемую квалификационную структуру подразделения в будущем. Отобранные сотрудники могут подразделяться на

три группы: группа подготовки молодых доцентов, молодых профессоров и научных сотрудников. Срок пребывания в кадровом резерве составит два года для группы подготовки молодых доцентов и три года для групп подготовки молодых профессоров и научных сотрудников с возможностью продления пребывания до одного года. То есть в целом при успешной работе молодой ученый может иметь поддержку со стороны вуза в течение трех лет. Ежеквартально планируется проводить проверку выполнения показателей индивидуального плана, а раз в полгода — аттестацию резервистов с принятием решения о продолжении дальнейшей работы.

Внедрение системы молодежного научно-педагогического кадрового резерва в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете позволит более рационально использовать человеческие ресурсы вуза путем совершенствования деятельности по подбору и расстановке кадров, планированию карьеры и обеспечит молодых ученых дополнительными возможностями в университете. К планируемым результатам внедрения системы молодежного кадрового резерва относятся: создание условий для научно-педагогической карьеры специалистов с высоким потенциалом; уменьшение расходов на поиск, обучение и адаптацию новых работников; закрепление талантливых и перспективных молодых аспирантов и докторантов; повышение показателей научно-педагогической деятельности университета путем задействования резервистов на различных направлениях работы. Развитие перечисленных достижений, безусловно, поможет Санкт-Петербургскому государственному политехническому университету добиться повышения показателей, ориентированных на успешную работу в рамках программы повышения конкурентоспособности на международном уровне.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования РФ «Разработка и апробация системы молодежного кадрового резерва научно-педагогических работников «ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» (л. с. 0100901301, рег. ном. 6.8247.3013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кибанов, А.Я.** Управление трудовыми ресурсами [Текст]: Учебник / А.Я. Кибанов, Е.А. Митрофанова, И.А. Эсаулова.— М.: ИНФРА-М, 2009.— 284 с.

2. Индикаторы науки: 2012: статистический сборник [Текст]— М.: Изд-во Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 2012.— 392 с.

3. Указ Президента РФ от 07.05.2012 N 599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки» [Электронный ресурс].— Сайт Президента Росии.— URL: http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx?1;1610850 (дата обращения: 01.10.2013)

4. «Программа 5 в 100» [Электронный ресурс].— Сайт ФГБОУ ВПО «СПбГПУ».— URL: http://www.spbstu.ru/f2h/index.asp (дата обращения: 01.10.2013)

5. Приказ от 26 апреля 2011 года № 312 «Об утверждении положения о кадровом резерве Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова» [Электронный ресурс].— Сайт МГУ.— URL: http://www.msu.ru/projects/kadr/ (дата обращения: 01.10.2013)

6. Приказ № 930-ОД от 01.12.2011 [Электронный ресурс].— Сайт Северо-Восточного федерального университета им. Амосова.— URL: http://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/up/kadrovyy-rezerv/dokumenty/ (дата обращения: 01.10.2013)

7. Положение о системе работы с кадровым резервом [Электронный ресурс].— Сайт НИУ ИТМО.— URL: http://kr.ifmo.ru/stat/3/norm_base.html (дата обращения: 01.10.2013)

8. **Базжина, В.А.** Исследование мер по закреплению молодежи в вузах как основа формирования научно-педагогического кадрового резерва (на примере СПбГПУ) [Текст] / В.А. Базжина, В.В. Лобатюк // Студенты и молодые ученые — инновационной России: материалы работ молодежной научной конференции.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013.— С. 242–244.

9. Порядок формирования кадрового резерва [Электронный ресурс].— Сайт Национального исследовательского Томского политехнического университета.— URL: http://past.tpu.ru/html/r-form.htm (дата обращения: 01.10.2013)

10. **Лобатюк, В.В.** Управление трудовым потенциалом вуза: молодежный научно-педагогический кадровый резерв [Текст] / В.А. Базжина, В.В. Лобатюк // Управление социальными инновациями:опыт, проблемы и перспективы: сб. статей IV Междунар. научно-практ. конф.— М.: Изд-во РУДН, 2013.— С. 332–339.

REFERENCES

1. **Kibanov A.Ia., Mitrofanova E.A., Esaulova I.A.** Upravlenie trudovymi resursami [Tekst]: Uchebnik.— M.: INFRA-M, 2009.— 284 p. (rus.)

2. Indikatory nauki: 2012: statisticheskii sbornik [Tekst]— M.: Natsional'nyi issledovatel'skii universitet «Vysshaia shkola ekonomiki», 2012.— 392 p. (rus.)

3. Ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2012 N 599 «O merakh po realizatsii gosudarstvennoi politiki v oblasti obrazovaniia i nauki».[Elektronnyi resurs].— Sait Prezident Rosii.— URL: http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx?1;1610850 (accessed 01.10.2013) (rus.)

4. «Programma 5 v 100» [Elektronnyi resurs].— Sait FGBOU VPO «SPbGPU».— URL: http://www.spbstu.ru/f2h/index.asp (accessed 01.10.2013) (rus.)

5. Prikaz ot 26 aprelia 2011 goda № 312 «Ob utverzhdenii polozheniia o kadrovom rezerve Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V.Lomonosova» [Elektronnyi resurs].— Sait MGU.— URL: http://www.msu.ru/projects/kadr/ (accessed 01.10.2013) (rus.)

6. Prikaz № 930-OD ot 01.12.2011 [Elektronnyi resurs].— Sait Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. ammosova.— URL: http://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye podrazdeleniya/up/kadrovyy-rezerv/dokumenty/ (accessed 01.10.2013) (rus.)

7. Polozhenie o sisteme raboty s kadrovym rezervom [Elektronnyi resurs].— Sait NIU ITMO.— URL: http://kr.ifmo.ru/stat/3/norm_base.html (accessed 01.10.2013) (rus.)

8. **Bazzhina V.A., Lobatiuk V.V.** Issledovanie mer po zakrepleniiu molodezhi v vuzakh kak osnova formirovaniia nauchno-pedagogicheskogo kadrovogo rezerva (na primere SPbGPU) [Tekst] // Studenty i molodye uchenye-innovatsionnoi Rossii: materialy rabot molodezhnoi nauchnoi konferentsii.— SPb.: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2013.— P. 242–244. (rus.)

9. Poriadok formirovaniia kadrovogo rezerva [Elektronnyi resurs]— Sait Natsional'nogo issledo-vatel'skogo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.— URL: http://past.tpu.ru/html/r-form.htm (accessed 01.10.2013) (rus.)

10. **Bazzhina V.A., Lobatiuk V.V.** Upravlenie trudovym potentsialom vuza: molodezhnyi nauchno-pedagogicheskii kadrovyi rezerv [Tekst] // Upravlenie sotsial'nymi innovatsiiami:opyt, problemy i perspektivy: sbornik statei IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.— M.: Izd-vo RUDN, 2013.— S. 332–339. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАЗЖИНА Виктория Андреевна — кандидат экономических наук заведующая кафедрой политической экономии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vabazzhina@mail.ru

ЛОБАТЮК Виктория Валерьевна — кандидат социологических наук доцент кафедры философии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vlobatyuk@yandex.ru

AUTHORS

BAZZHINA Victoria A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vabazzhina@mail.ru

LOBATYUK Victoria V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vlobatyuk@yandex.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

ХРОНИКА СОБЫТИЙ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИХАИЛА СЕРГЕЕВИЧА СОЛОМЕНЦЕВА (1913–2008)

THE 100TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH MIKHAIL SOLOMENTSEV (1913–2008)

В статье освещается жизненный путь государственного деятеля Соломенцева М.С. В связи с его 100-летней датой со дня рождения.
СОЛОМЕНЦЕВ М.С. ВЫПУСКНИК ЛПИ (СПБГПУ). 100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ. ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА МИНИСТРОВ РФ. ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИТЕТА НАРОДНОГО КОНТРОЛЯ СССР. ПОЧЕТНЫЙ ПЕНСИОНЕР. АВТОР КНИГИ «Я ВЕРЮ В РОССИЮ».

The article highlights the life path statesman Solomentseva M.S. In connection with its 100-year of the birth date.
SOLOMENTSEV M.S. GRADUATE LPI (SPBSPU). 100 YEARS SINCE THE BIRTH. CHAIRMAN OF THE BOARD MINISTERS RUSSIAN FEDERATION. CHAIRMAN OF THE USSR PEOPLE'S CONTROL COMMITTEE. HONORED PENSIONER. AUTHOR OF «I BELIEVE IN RUSSIA».

В числе выпускников Ленинградского политехнического института / Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, особенно ярко проявивших себя на государственном поприще, — председатель Правительства Российской Федерации в составе СССР М.С. Соломенцев, питомец механико-машиностроительного факультета. Он всегда хранил добрую память о своей alma-mater, учителях и сокурсниках. Участвуя в торжествах по случаю 100-летнего юбилея СПбГПУ в 2002 году, он, отвечая на вопросы, сказал: «Ленинградский политехнический институт, как и город Ленинград, дали мне основу на всю мою жизнь, сформировав меня как личность во всех смыслах».

Михаил Сергеевич Соломенцев

25 октября исполнилось 100 лет со дня рождения Михаила Сергеевича Соломенцева. После окончания школы в городе Елец Михаил Соломенцев по комсомольскому набору был зачислен в Ленинградское военно-морское училище имени М.В. Фрунзе и собирался стать моряком подводником. Но в конце второго курса заболел и по состоянию здоровья был отчислен. В 1935 году он поступил в Ленинградский индустриальный институт. Так в те годы назывался Ленинградский политехнический институт, ныне — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

В 1940 году М.С. Соломенцев закончил механико-машиностроительный факультет ЛПИ, защитив с отличием дипломный проект. Дальнейший его жизненный путь был типичным для многих инженерно-технических работников, чья, как сейчас принято говорить, деловая карьера предусматривала последовательное продвижение по всем ступеням служебной лестницы, и то, как человек проявлял себя на каждой из них в деловом отношении, определяло его дальнейший рост. Особенное внимание уделялось молодым кадрам и их профессиональным знаниям.

По распределению (эта практика определения на работу выпускников вузов существовала все годы советской системы высшего образова-

ния) М. Соломенцев вместе со своей сокурсницей, Надеждой Николаевной, на которой он женился после окончания третьего курса, приехал в г. Липецк на завод оборонной промышленности и был принят на работу в качестве сменного мастера. Уже через полгода, в возрасте 27-ми лет, он был назначен заместителем начальника цеха. С началом Великой Отечественной войны он был эвакуирован вместе с заводом на Урал.

Личные качества и профессиональная инженерная подготовка М. Соломенцева обращали на него внимание руководителей промышленности. В результате за десятилетие с 1948 года по 1959 год М.С. Соломенцев прошел путь от главного инженера Златоустовского завода №259 и директора станкостроительного завода в г. Челябинске (1949–54 гг.) до председателя Челябинского совнархоза.

На XXII съезде КПСС был избран членом Центрального комитета партии и в 1966 году стал секретарем и заведующим отделом тяжелой промышленности ЦК КПСС.

В 1971 году М.С. Соломенцев был назначен Председателем Совета Министров РСФСР. Говорят, что Л.И. Брежнев при назначении сказал в личной беседе: «У нас нет отдельной компартии Российской Федерации, есть только КПСС — партия всей страны, и я как Генеральный секретарь возглавляю также и партийные организации России. Прошу тебя быть моим заместителем по Российской Федерации». Таким образом, если Л.И. Брежнев был первым лицом во всей стране, то М.С. Соломенцев был первым лицом в Российской Федерации. М.С. Соломенцев сдержанно относился к показной стороне политической деятельности, стремился оставаться в стороне от политики, направляя все усилия на решение хозяйственных и социальных вопросов в Российской Федерации. Это, а также личная скромность привели к тому, что фигура Соломенцева была не очень заметна на фоне некоторых других, как говорится, «бывших на слуху», крупных деятелей КПСС.

Председатель Совмина М.С. Соломенцев оставался патриотом России и активно отстаивал интересы Российской Федерации. На этом посту он проработал до 1983 года — 12 лет! Никто из других деятелей советских времен не занимал так долго подобный пост. С именем Соломенцева связано строительство дома Совмина, который сейчас называют «Белым домом» (привычка, распространенная у некоторых современных чиновников, во всем копировать своего хозяина — Соединенные Штаты Америки). Именно Соломенцев приложил усилия к тому, чтобы на завершение строительства были выделены средства из союзного бюджета; начатое ранее, но законсервированное строительство этого дома было доведено до конца, и он был передан по своему назначению.

Несмотря на высокие государственные посты, М.С. Соломенцев всегда уважительно относился к окружавшим его коллегам. Отмечают, что даже на провинившихся он никогда не повышал голоса, умел выслушать собеседника, но при необходимости мог твердо и убежденно отстаивать свою точку зрения на тот или иной хозяйственный или политический вопрос.

Будучи на посту Председателя Совмина он охотно поддерживал связи с «родным» Ленинградским политехническим институтом, встречался с руководителями института, был в курсе его задач и проблем.

С 1983-го по 1988 год М.С. Соломенцев работал на посту председателя Комитета партийного контроля при ЦК КПСС. Этот комитет, наделенный очень широкими правами и полномочиями, был призван пресекать и предотвращать всякие нарушения законности и партийных норм, имел функции, до некоторой степени сходные с современной Счетной палатой, но обладал значительно большими возможностями для их практической реализации. На этом посту Соломенцев ставил первой задачей не карательные мероприятия, применяемые к нарушителям, а превентивную работу по предотвращению правовых, экономических и хозяйственных нарушений.

М.С. Соломенцеву дважды было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда. Его деятельность отмечена пятью орденами Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Красной Звезды и медалями.

В 1988 году М.С. Горбачев, придя к руководству КПСС и страной, отправил М.С. Соломенцева вместе с другими руководителями-ветеранами партии на пенсию.

Будучи пенсионером, Михаил Сергеевич продолжал вести активный образ жизни, любил кататься по Москве-реке на водных лыжах, встречался со своими бывшими коллегами, жил в семье своего внука в квартире, которую он получил в «доме ЦК», приехав в Москву на работу, еще в 1966 году. Уже после крушения Советского Союза на вопрос любопытных журналистов, какая у него была зарплата на посту Председателя Совета Министров, он сказал: «Я получал 1200 руб. в месяц, и эти деньги сразу переводились на сберкнижку, а если жене были нужны для домашних хозяйственных нужд наличные, я получал их в пакете из кассы через своего секретаря». Других источников дохода он, естественно, не имел. (Заметим, что месячная зарплата профессора в вузе в те годы составляла 400 руб., а в сумме с распространенной зарплатой за работы по совместительству при выполнении хоздоговорных научно-исследовательских работ — около 600 рублей.)

Внук Соломенцева, Михаил Юрьевич Соломенцев, пишет в воспоминаниях о своем знаменитом деде: «Дед был исключительно порядочным и честным человеком. Никогда ничего лишнего не имел и всех близких призывал к скромности, никогда матом не ругался, никто не видел его в подпитии».

Незадолго до своей кончины М.С. Соломенцев написал книгу, в которой изложил свой взгляд на трагические последствия горбачевско-ельцинского реформирования страны. Он не воспринял перевод развития страны на капиталистический путь. Книга называется «Я верю в Россию». Она издана трехтысячным тиражом, но ее уже давно нет в продаже. И только будущее может показать, кто оказался прав перед Историей.

Умер Михаил Сергеевич Соломенцев 15 февраля 2008 года. Похоронен в Москве.

М.С. Соломенцев своей деятельностью на высоких государственных постах и личными качествами, несомненно, заслужил добрую память о себе в стенах своей alma-mater. Выпускники Политеха, подобные Михаилу Сергеевичу Соломенцеву, своим вкладом в науку, государственное строительство или в политику, безусловно, создают и составляют славу нашего Политехнического университета. И эта слава будет жить до тех пор, пока люди будут хранить память о своих предшественниках. В этом — наш долг перед прошлым.

Статью подготовил профессор Ю.М. Исаев, по рекомендации комиссии по историческому и культурному наследию СПбГПУ

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ИСАЕВ Юрий Митрофанович — кандидат технических наук профессор кафедры турбин, гидравлических машин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29; e-mail: ymi30@mail.ru

AUTHORS

ISAEV Yurii M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ymi30@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

Ю.С. Васильев, Ф.Г. Рутберг

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ИГОРЯ АЛЕКСЕЕВИЧА ГЛЕБОВА (1914–2002)

Yu.S. Vasilyev, F.G. Rutberg

THE 100TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH IGOR A. GLEBOV (1914–2002)

Академик Игорь Алексеевич Глебов — выдающийся ученый-электроэнергетик СССР. В 1938 году окончил Ленинградский индустриальный институт. Участник Великой Отечественной войны, прошедший путь от командира артиллерийской батареи до начальника разведывательного отделения Первой гвардейской армии. В послевоенный период И.А. Глебов за свои научные достижения был избран действительным членом Академии наук СССР.

ГЛЕБОВ. АКАДЕМИК. АН СССР. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ЛАУРЕАТ. ГЕРОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА.

Academician Igor A. Glebov outstanding utilities sector USSR. In 1938 he graduated the Leningrad Industrial Institute. Member of the Great Patriotic War, where he started as an artillery battery commander to head of the intelligence department the first guards army. In the postwar period, I.A. Glebov per his scientific achievements, was elected a full member of the Academy of Sciences of the USSR.

GLEBOV. ACADEMICIAN. ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR. UTILITIES SECTOR. LAUREATE. HERO OF SOCIALIST LABOR.

Игорь Алексеевич родился в Санкт-Петербурге 21(08) января 1914 года в семье крестьян, сезонных рабочих из Вологодской губернии. В 1931 году после окончания с отличием средней школы учился на рабфаке Ленинградского электромеханического института (ЛЭМИ), а в 1932 году как студент рабфака, успешно сдав приемные испытания, поступает на 1-й курс ЛЭМИ на специальность «Тепловые электрические станции». С 1-го октября 1932 года он — студент ЛЭМИ. В процессе всей учебы имел отличную успеваемость. После объединения в 1934 году отраслевых втузов он учится на электромеханическом факультете Ленинградского индустриального института (ЛИИ), где преподавали в то время Б.И. Доманский, В.В. Болотов и др. В январе 1938 года окончил ЛИИ с отличием по специальности гидроэлектрические станции, защитив диплом на тему «Замена турбин и автоматизация Волховской ГЭС». После окончания института работал в Кольской энергосистеме на Туломской ГЭС инженером по автоматизации. В январе 1939 года он был зачислен в аспирантуру на электромеханический факультет ЛИИ на кафедру электрических станций (руководитель проф. В.В. Болотов). За время пребывания в аспирантуре И.А. Глебов успешно выполнил учебный план и подготовил для защиты кандидатскую

Глебов Игорь Алексеевич

диссертацию на тему «Исследование переходных процессов в насыщенных индуктивных компенсаторах, применяемых для повышения статической устойчивости». Но 22 июня 1941 г. началась Великая Отечественная война, и, как пишет в своей автобиографии И.А. Глебов: «В июле 1941 года я был мобилизован в ряды Советской Армии. Участвовал в боях на Волховском, Юго-Западном, третьем, первом и четвертом Украинских фронтах в должностях от командира артиллерийской батареи до начальника разведывательного отделения 1-й гвардейской армии». Войну он закончил в звании майора; за успешное выполнение боевых заданий командования был награжден орденами Александра Невского, Красного Знамени, Отечественной войны 1-й степени, Красной Звезды и медалями.

После демобилизации в августе 1946 года из рядов Советской Армии он вернулся в родной город уже не один, а вместе с дочерью и женой Екатериной Даниловной, с которой познакомился на фронте. Они поженились 19 мая 1945 года, а в 1995 году отпраздновали золотую свадьбу. Как в семейной жизни, так и в науке он всегда мог найти правильное и благородное решение любых проблем.

Выполненная перед войной диссертация, как и многие другие вещи, были использованы на отопление жилья во время блокады города. Восстанавливать старое ему не хотелось, и он стал работать над новой темой. Его знакомство с заведующим кафедрой Ленинградского института авиационного приборостроения (ЛИАП) профессором Д.А. Завалишиным определила дальнейшую судьбу И.А. Глебова как ученого, под его руководством он написал и в 1949 году успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование синхронного генератора с ионным преобразователем в цепи возбуждения». Эта работа получила дальнейшее практическое развитие на заводе «Электросила» и была внедрена вначале на Нижне-Свирской, а затем на Волжской ГЭС.

До 1961 года основная деятельность И.А. Глебова была связана с преподавательской работой и подготовкой инженерных кадров. В ЛИАПе он читал курс лекций по электрическим машинам. В 1953 году Игорь Алексеевич был избран по конкурсу доцентом, а затем заведующим кафедрой энергетики Ленинградского технологического института пищевой промышленности. Здесь он создал наиболее современную на тот период электротехническую лабораторию, читал курсы лекций по электротехнике для механиков и технологов и в то же время уделял много времени работе со студентами.

В середине 50-х годов академик М.П. Костенко пригласил его на работу в Институт электромеханики АН СССР (с 1969 года — Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения) старшим научным сотрудником. Здесь он прошел путь от заведующего лабораторией до директора института. Под руководством И.А. Глебова институт стал научно-техническим центром страны по электромашиностроению. Сам он был назначен генеральным конструктором по этому направлению работ.

В 1964 году И.А. Глебов успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование систем возбуждения мощных синхронных генераторов с управляемыми преобразователями». В 1974 году он был избран членом-корреспондентом, а в 1976 году — действительным членом (академиком) АН СССР.

За годы работы И.А. Глебова в институте под его руководством и при его непосредственном участии была создана уникальная экспериментальная база, сделавшая ВНИИэлектромаш лидером в области электромашиностроения не только в нашей стране, но и за рубежом. Были успешно решены важнейшие научно-технические задачи, стоявшие как перед городом Ленинградом, так и перед всей страной. Вот только некоторые из них: создание и внедрение принципиально новых систем возбуждения с полупроводниковыми преобразователями для турбо- и гидрогенераторов; разработка серий турбогенераторов, двигателей постоянного тока и вентильных двигателей переменного тока; создание инерционных накопителей энергии для термоядерного синтеза; испытание в энергосистеме нового сверхпроводникового турбогенератора. Большинство этих работ специалисты института под руководством И.А. Глебова выполнили впервые в мировой практике.

Академик И.А. Глебов принимал самое активное участие в разработках института по повышению обороноспособности нашего военно-морского флота — созданию некоторых образцов оружия для защиты надводных кораблей.

Следует подчеркнуть, что при определении объемов своих научных и общественных задач Игорь Алексеевич всегда ориентировался на их максимум. Это правило он установил для себя еще в период Великой Отечественной войны — работать без выходных и отпусков, с полной отдачей и непрерывно, без какой-либо раскачки. Это его качество удивляло всех, кто с ним соприкасался. Таков уж был этот выдающийся человек, великая личность, отдававшая целиком себя служению Отечеству. И в то же время он был бескорыстен и скромен, внимателен к людям, вникал в их заботы, помогал в личных делах, с душой участвовал в общественной работе различных организаций, особенно молодежных. И молодые специалисты видели в нем наставника, мудрого руководителя и считали его образцом для выбора своего жизненного пути. А когда его спрашивали об отпуске и выходных, он обычно отвечал, что этого не требуется, когда есть любимая работа,

В связи с развитием работ института в области электрофизики научно-исследовательский отдел, занимавшийся данным направлением, по инициативе И.А. Глебова получил статус отдельного юридического лица и в 1992 году был преобразован в Институт проблем электрофизики РАН, которым в настоящее время руководит один из учеников И.А. Глебова — академик Ф.Г. Рутберг. На базе другого отдела, занимавшегося крупным электромашиностроением для электроэнергетики, при поддержке И.А. Глебова был создан Отдел электроэнергетических проблем РАН. Этот отдел (на правах института) возглавлял другой ученик И.А. Глебова — академик Я.Б. Данилевич.

На посту директора института И.А. Глебов работал с 1973 по 2000 год. Подготовка научных кадров, организованная им в институте, созданные под его руководством комплексы современных экспериментальных стендов позволили институту (ныне федеральное государственное унитарное предприятие «НИИэлектромаш») успешно вести работу в новых экономических условиях.

Научная деятельность И.А. Глебова в эти годы вышла за стены возглавляемого им института. В 1979 году он был назначен уполномоченным президиума АН СССР по Ленинграду и Северо-Западному региону, а позднее — руководителем Межведомственного координационного совета (МКС) АН СССР в Ленинграде. Впервые постановлением Президиума АН СССР перед академическими организациями были поставлены задачи не только в области естественных и общественных, но и технических наук. В составе МКС работало 17 специализированных научных советов. В качестве базовых организаций для деятельности советов были определены крупнейшие научно-исследовательские и учебные институты Ленинграда.

В 1983 году был образован Ленинградский научный центр Академии наук СССР под председательством И.А. Глебова, ставшего к этому времени выдающимся организатором науки и технического прогресса не только в городе, но и в стране. Об этом свидетельствует и тот факт, что академик И.А. Глебов, являясь депутатом Верховного Совета СССР двух созывов, возглавлял в нем Комиссию по науке и технике одной из палат советского парламента в течение 10 лет.

Благодаря творческим связям Ленинградского научного центра и Немецкого исследовательского общества после доклада И.А. Глебова в Бонне о последствиях пожара в Библиотеке Академии наук в 1988 году Общество выделило помощь библиотеке в сумме 100 тыс. немецких марок.

Академик И.А. Глебов постоянно поддерживал строительство защитных сооружений города от наводнений, участвовал в решении ряда технических проблем и в многочисленных дискуссиях с противниками строительства. Важность завершения работ по защитным сооружениям обсуждалась и на последней встрече И.А. Глебова с губернатором города В.А. Яковлевым в конце 2001 года.

Хотелось бы отметить большую международную деятельность академика И.А. Глебова, заслуги которого в области электроэнергетического машиностроения были хорошо известны зарубежным ученым и инженерам. У него сложились научные и творческие контакты с ведущими зарубежными фирмами и специалистами в области крупных электрических машин. Его приглашали для чтения лекций и выступлений с докладами на престижные международные конференции и совещания. Всех слушателей буквально покоряли его природные скромность

и обаяние, умение о сложных вопросах говорить доходчиво, без какого-либо превосходства над слушающей аудиторией, способность терпеливо выслушивать другие мнения и находить веские доказательства в подтверждение своей точки зрения. В середине 60-х годов И.А. Глебов был руководителем группы советских специалистов, читавших лекции для инженеров Египта по электротехническому оборудованию Асуанской ГЭС. Впоследствии он неоднократно приглашался руководством ГЭС для консультаций. За участие в работах по Асуанской ГЭС в 1971 году он был награжден правительством Египта орденом «Отличие» 1 степени.

В 1968 году русский ученый И. А. Глебов был избран первым и единственным от СССР президентом научно-исследовательского комитета по электрическим машинам Международного Совета по большим электроэнергетическим системам (СИГРЭ). Он вел эту исключительно трудную работу в период с 1968 по 1976 год. После этого в течение восьми лет руководил рабочей группой СИГРЭ по использованию явления сверхпроводимости в электротехнике. Успешной международной работе И.А. Глебова способствовал не только его высочайший авторитет среди зарубежных специалистов, но и владение английским, немецким и французским языками. Французский язык он выучил в годы работы в СИГРЭ. В 1998 году ему было присвоено почетное звание «Выдающийся член СИГРЭ».

В конце 80-х годов к нему неоднократно обращались с просьбой возглавить не один комитет, а всю организацию СИГРЭ, но Игорь Алексеевич отказался категорически, поскольку эта работа требовала расстаться с научными исследованиями и жить в основном за рубежом. Такую же точку зрения он высказал и в связи с предложением возглавить Международный электротехнический комитет.

После расформирования в 1963 году Отделения технических наук АН СССР была нарушена связь между отдельными направлениями инженерных знаний. Академик И.А. Глебов с группой ученых провел большую работу по созданию Инженерной академии. После распада СССР она преобразовалась в Инженерные академии Содружества Независимых Государств, в том числе в Российской Федерации — в Российскую инженерную академию. В этих условиях была образована Международная инженерная академия, И.А. Глебов — почетный член Российской и Международной инженерных академий. Он был избран почетным членом Белорусской и Казахской инженерных академий и иностранным членом Инженерной академии Грузии. В 1991 году была образована Санкт-Петербургская инженерная академия, ее президентом был избран профессор А.И. Федотов, а почетным президентом — академик И.А. Глебов.

Развал СССР сопровождался ликвидацией большинства отраслевых министерств. Академик И.А. Глебов был одним из инициаторов образования общественных академий по отдельным отраслям науки и техники с целью сохранения научных и творческих связей специалистов, в частности Академии электротехнических наук РФ и Международной академии электротехнических наук. В рамках этих академий он провел большую работу как ответственный редактор и один из авторов книги «История электротехники», изданной в 1999 году.

В последние годы его жизни под его редакцией велась большая работа по изданию «Электротехнической энциклопедии» в пяти томах (первый том издан в 2002 году). Кстати, финансирование этого фундаментального труда руководством РАО «ЕЭС России» состоялось во многом благодаря высокому авторитету И.А. Глебова у энергетиков России.

Академик И.А. Глебов внес большой вклад в работу научно-технических обществ города и области. С 1976 по 1991 год он был председателем Ленинградского областного правления НТО (Научно-техническое общество) и заместителем председателя Всесоюзного совета НТО. До последних своих дней президентом Союза ученых, инженеров и специалистов производства Санкт-Петербурга и Ленинградской области. С 1991 года было проведено три съезда Обществ и Союза по наиболее важным проблемам научно-технического прогресса и экономики. Так, например, съезд 1993 года был посвящен проблеме «Выход из экономического кризиса в Санкт-Петербурге: проблемы и решения», а съезд в 1996 году проходил по теме «Концепция развития Санкт-Петербурга».

И.А. Глебов вел большую научную и организационную работу как советник президиума

Российской академии наук, регулярно выезжал в Москву на заседания президиума РАН, при этом всегда оставался не пассивным слушателем, а активным участником проходивших там дискуссий.

В последние годы И.А. Глебов был председателем комиссий конкурса «Инновации Северо-Запада России — энергосбережению» и конкурса на звание «Почетный инженер Санкт-Петербурга».

В 1999–2002 годах академик РАН, доктор технических наук И.А. Глебов работал профессором кафедры «Возобновляемые источники энергии и гидроэнергетика» в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и был советником ректора СПбГПУ по энергетике.

Как директор ВНИИэлектромаш, располагавшегося в зданиях бывшего Новодевичьего монастыря, И.А. Глебов сумел сохранить от намечавшегося сноса церковь Казанской Божьей Матери и передать ее Санкт-Петербургской епархии. На посту председателя Научного центра города, председателя Комиссии по науке и технике Верховного Совета СССР он оказывал помощь в вопросах финансирования не только важнейших научно-технических проблем, но и в организации строительства больницы Академии наук, способствовал сооружению памятника М.В. Ломоносову на Университетской набережной, участвовал в создании музея памяти Г.К. Жукова в одном из лицеев Санкт-Петербурга. Был председателем оргкомитета по возрождению музея обороны Ленинграда. Эта работа завершилась открытием музея в 1989 году. С момента образования Клуба кавалеров ордена Александра Невского был активнейшим членом президиума и проводил большую воспитательную работу в школах города, участвовал в работе ветеранской организации 1-й гвардейской армии.

В нашем городе под руководством И.А. Глебова сложилась научная школа по проблемам электрических машин, электроэнергетики и электрофизики. Из ее состава были избраны четыре члена АН СССР и РАН. В 1997 и 2000 годах были получены гранты Президента РФ в поддержку этой научной школы, позволившие не только проводить исследования и разработки по важным для страны научным направлениям, но и привлечь к работе талантливую молодежь.

Научная и организационная деятельность И.А. Глебова отражена в публикациях, количество которых превышает 750; им получены 45 патентов и авторских свидетельств на изобретения. О его научных работах и деятельности, а также о работах, в которых он принимал участие, опубликовано более 300 статей в газетах и журналах.

За уникальные научные исследования в 1968 году И.А. Глебову была присуждена Государственная премия СССР, в 1976 году — премия П.Н. Яблочкова АН СССР, в 1988 году он был удостоен Государственной премии Украины. В 1987 году Международный фонд им. А. Топфера (г. Гамбург, Германия) присудил И.А. Глебову премию А.П. Карпинского за выдающиеся работы в области электромашиностроения и электроэнергетики, способствующие развитию творческих связей между специалистами Европы. В 1997 году он был награжден серебряной медалью Международной инженерной академии, удостоен почетного знака «Ветеран энергетики».

Достижения в области научной и научно-организационной деятельности И.А. Глебова и его участие в Великой Отечественной войне оценены высокими правительственными наградами: орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Дружбы Народов, Отечественной войны 1-й степени. В 1981 году ему присвоено звание Героя Социалистического Труда, а в 1994 году — звание Заслуженного деятеля науки и техники РФ. В 1999 году он был награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени.

Международный астрономический союз в 1999 году, отмечая выдающиеся заслуги Игоря Алексеевича в российской и мировой науке, присвоил планете M^a 6108 Солнечной системы имя Glebov. Планета открыта в 1971 году. Имя планеты Glebov занесено в международное научное издание «Эфемериды малых планет»».

Посмертно И.А. Глебов стал лауреатом Государственной премии РФ 2001 года в области науки и техники за создание серии высокоэффективных взрывопожаробезопасных турбогенераторов с полным водяным охлаждением для тепловых и атомных электростанций и Премии Правительства РФ 2002 года в области науки и техники за создание новых типов электрических машин на основе высокотемпературных сверхпроводников.

В 2002 году И.А. Глебов стал лауреатом Золотой Книги Санкт-Петербурга.

Кавалер ордена Александра Невского Игорь Алексеевич Глебов навсегда останется в памяти потомков гордостью отечественной науки.

10 июня 2004 года в Санкт-Петербурге на Никольском кладбище Александро-Невской лавры состоялось открытие прекрасного памятника Игорю Алексеевичу Глебову.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук профессор президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, академик РАН; 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29; e-mail: president@spbstu.ru

РУТБЕРГ Филипп Григорьевич — доктор технических наук профессор директор Института электрофизики и электроэнергетики РАН; академик РАН; 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д.18; e-mail: rc@iperas.nw.ru

AUTHORS

VASILYEV Yury S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru

RUTBERG Filipp G. — Institute of Electrophysics and Electric Power RAS; 191186, Dvorcovaya nab. 18, St. Petersburg, Russia; e-mail: rc@iperas.nw.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

И.К.Утехина, А.И.Кугушев

И.Д. КУГУШЕВ — СОЗДАТЕЛЬ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

I.C. Utehina, A.I. Kugushev

I.D. KUGUSHEV — FOUNDER OF SCIENTIFIC-PEDAGOGICAL SCHOOL

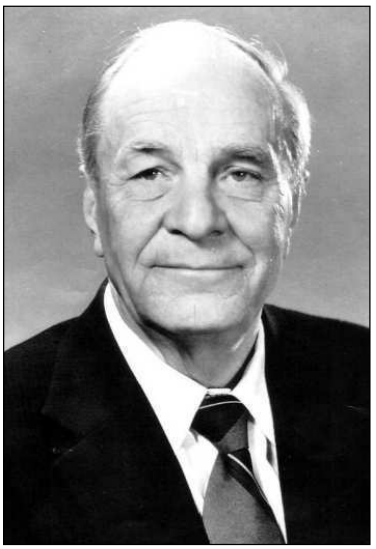
Сообщается о трудовой деятельности заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора И.Д. Кугушева, известного специалиста в области целлюлозно-бумажного производства, в коллективе ЛПИ им. М.И. Калинина, о становлении его как ученого и педагога. Его трудовой путь от лаборанта до ректора института, сочетавший как научно-преподавательскую, так и общественную деятельность, приведен как пример формирования научных и педагогических кадров советского периода.

КУГУШЕВ И.Д. ПОДГОТОВКА КАДРОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. БУМАЖНЫЕ МАШИНЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ.

Reported labor activity in collective LPI . M.I. Kalinin and development as a scientist and teacher, Honored Scientist of the RSFSR, professor Kugusheva I.D., a renowned expert in the field of pulp and paper production. As an example of the formation of scientific and pedagogical staff of the Soviet period is given his career as a laboratory assistant to the rector of the Institute, combining both research and teaching, and social activities.

KUGUSHEV I.D. TRAINING OF PULP AND PAPER INDUSTRY. PAPER MACHINE DESIGN PULP AND PAPER EQUIPMENT. CHEMICAL PROCESSING OF WOOD.

Илья Дмитриевич Кугушев (1914–1995) — известный в СССР ученый в области технологии производства бумаги и целлюлозно-бумажного производства. Участник вооруженного конфликта на озере Хасан, Великой Отечественной войны. Кавалер орденов Отечественной войны, Красной звезды, Дружбы народов. Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, отличник в области высшего образования СССР, почетный член Научно-технического общества бумажной и деревообрабатывающей промышленности. Выпускник 1949 года механико-машиностроительного факультета Ленинградского политехнического института имени М.И. Калинина. В ЛПИ имени Калинина с 1949 по 1967 год прошел трудовой путь от лаборанта до профессора. Основатель в институте научного направления по эксплуатации и конструированию бумагоделательных машин. В 1968–1970 годах — заведующий кафедрой, а с 1970 по 1977 год ректор уже Ленинградского технологического института целлюлозно-бумажной промышленности (ЛТИЦБП). В его трудах и в работах возглавляемых им коллективов получили развитие новые научные направления по технологии



Илья Дмитриевич Кугушев

глубокой химической переработки древесины, реологии волокнистых суспензий и новые подходы к проектированию целлюлозно-бумажного оборудования.

Помимо выпускников и сотрудников ЛПИ имени М.И. Калинина, завоевавших мировую славу советской науке, следует помнить и многочисленную группу ученых, руководителей и организаторов науки, высшей школы и производства союзного уровня — директоров, ректоров, руководителей предприятий, вузов и исследовательских институтов. В огромной степени благодаря их самоотверженному труду были созданы в СССР вторая в мире по объему экономика, прославленные советская наука и высшая школа. К этому передовому отряду строителей советской цивилизации в полной мере следует отнести и известного поколению политехников середины прошлого века доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Илью Дмитриевича Кугушева.

Родился Илья Дмитриевич в 1914 году в Петрограде, его мать была врачом, а отец инженером. После 7 классов ленинградской школы — геолого-разведывательный техникум, служба в армии, а после окончания второго курса Ленинградского политехнического института повторный, уже добровольный призыв — началась Великая Отечественная война. Как и у многих фронтовиков, его судьба в науке и педагогике складывалась с явной потерей, как принято сейчас говорить, стартовых возможностей, с опорой на жизненный опыт. И.Д. Кугушев, начав учебу в 1939 году, окончил механико-машиностроительный факультет ЛПИ имени М.И.Калинина по специальности «Машины и оборудование химических производств (бумажные машины)» в 1949 году, в возрасте 35 лет. Но за плечами, помимо институтского диплома с отличием, у него был и опыт работы с 17 лет коллектором и прорабом в четырех геолого-разведывательных партиях (от Урала, Алтая до Кара-кумов), участие механиком-водителем танка в конфликте на озере Хасан, работа конструктором в судоремонтных мастерских, удостоенная двух орденов и медалей служба старшим авиамехаником в блокадном Ленинграде. Как человек с активным, деятельным характером еще студентом, сталинским стипендиатом, он избирался в партийный комитет, был заместителем секретаря парткома института, депутатом Ленинградского горсовета. Активно участвуя в партийной работе и депутатской деятельности, Илья Дмитриевич всегда рассматривал их как необходимую общественную нагрузку при первоочередной задаче профессионального роста как педагога и инженера. Для этого он до конца своих дней оставался верен двум выработанным навыкам — постоянного, главным образом книжного, самообразования (именуемого на языке современного менеджмента непрерывным совершенствованием) и активным обменом приобретенными знаниями, обеспечивающим их систематизацию и внедрение.

Студентом, с 1947 года Илья Дмитриевич начал работу в лаборатории кафедры теории машин и механизмов, осваивая выбранную им тогда на всю жизнь профессию «бумажника». По окончании ЛПИ имени М.И. Калинина Илья Дмитриевич принимает решение заниматься научно-педагогической деятельностью, остается в институте, где в течение первых пяти лет работает старшим лаборантом, ассистентом кафедры теории машин и механизмов. Одновременно с работой на кафедре шла работа над кандидатской диссертацией, завершившаяся защитой в 1954 году, в возрасте 40 лет. В период работы над диссертацией Илья Дмитриевич выработал характерную для настоящего ученого привычку беспрерывного поддержания в голове решаемых научных проблем, с остановкой, а то и без остановки на период сна. Такого же подхода к решению поставленных задач он добивался и от своих учеников. Благодаря этому правилу Илья Дмитриевич через 5 лет после окончания института защищает кандидатскую диссертацию, еще через год получает ученое звание доцента, через 9 лет после кандидатской заканчивает докторскую, через 4 года после которой получает ученое звание профессора.

Под руководством И.Д. Кугушева в институте была создана лаборатория бумагоделательных машин, где проводились лабораторные занятия со студентами. Он продолжил начатые со студенческих лет научно-исследовательские работы на предприятиях бумажной промышленности Ленинграда — фабриках «Коммунар», «Госзнак», на заводе имени Второй пятилетки. По мере профессионального роста и расширения научных связей института в 1956–1960 го-

дах, Илья Дмитриевич уже осуществлял научное руководство проводимыми в НИИбуммаш и Проектбуммаш разработками методик расчета составных частей бумагоделательных машин и анализом процессов обезвоживания бумажных масс. Тесную связь производства, педагогики и науки в сочетании с ориентацией на лучшие мировые технические решения в области производства бумаги он считал обязательным условием и конструирования новых машин, и учебного процесса.

С 1956 года И.Д. Кугушев, доцент кафедры машин, автоматов и полуавтоматов, по разработанной совместно с профессором Н.И.Колчиным программе приступил к чтению лекций по новому курсу — «Основы, расчет и конструирование бумагоделательных машин».

Сохраняя активность и в общественной жизни института, И.Д. Кугушев неоднократно избирался в партийный комитет, дважды был секретарем парткома. Организующей силой строительства социализма в СССР была Коммунистическая партия, и рядовые партийные комитеты, не обремененные партийной бюрократией, отвечали этому требованию. Сформированный в институте не без участия И.Д. Кугушева партийный комитет, чуткий и внимательный к людям, проблемам института, был руководящей силой и поддержкой трудовых и педагогических коллективов в период послевоенного восстановления. В те годы требовались внимание к людям и поддержка в них веры в провозглашенные идеи строительства нового общества, братства и сотрудничества. Лучшим вариантом привлечения масс на такое строительство был метод личного примера, самоотверженного отношения к работе и открытости людям. Как вспоминают однокурсники и коллеги Ильи Дмитриевича, по любым, в том числе по личным вопросам, всегда, рассчитывая на помощь, можно было «обращаться к Илье». Общественная и партийная работа, с одной стороны, отрывала от основной, но с другой, всегда придавала Илье Дмитриевичу энергию, ориентированную на интересы дела, исследовательскую работу, которую он за работу не считал, а просто жил ею. Задорным и энергичным, увлеченным работой, окруженным друзьями и готовым искренне откликнуться на просьбу любого запомнился он послевоенному поколению политехников. Конечно, он был не одинок, готовые к самопожертвованию безбожные люди, жившие по божьим законам, составляли не жизненно важное меньшинство, а значительную часть советского общества. Рядом с Ильей Дмитриевичем всегда оставались поддерживавшие его и сыгравшие важную роль в его жизни друзья политехники — Г.В. Карпов, Р.Ф. Рябошлык, Н.Ф. Утехин, Н.С. Яблонский и другие.

В 60-е годы, помимо авторитета в научном и производственном сообществе «бумажников» в масштабе Ленинграда и страны, у профессора И.Д. Кугушева появляются многочисленные ученики на территории СССР, от Сибири до Кавказа, а впоследствии и за рубежом. С 1965 года он являлся председателем Северо-Западного Совета по координации и планированию научно-исследовательских работ по техническим и естественным наукам Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР.

После закрытия в ЛПИ имени М.И. Калинина в 1967 году специализации по бумагоделательным машинам И.Д. Кугушев, уже сформированный институтом как авторитетный в своей области специалист, избирается на должность профессора кафедры технологии резины и машин по переработке полимерных материалов Ленинградского технологического института имени Ленсовета. С 1968 года он возглавляет там кафедру машин автоматизированных систем, а в 1970 году его назначают ректором ЛТИ целлюлозно-бумажной промышленности.

В этой должности в полной мере проявились методические навыки, знания и опыт, полученные Ильей Дмитриевичем на научно-педагогической и общественной работе в ЛПИ имени М.И.Калинина. В ЛТИ ЦБП он, наконец, реализует свою давнюю мечту по созданию учебной бумагоделательной машины, о чем писала газета «Ленинградская правда» 6 мая 1970 года в статье «Мечта профессора И.Д. Кугушева и как она осуществилась».

Как специалист в области производства бумаги и создания бумагоделательных машин, И.Д.Кугушев завершал свою деятельность заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, почетным членом Научно-технического общества бумажной и деревообрабатывающей промышленности, неоднократным лауреатом премий ВДНХ СССР. Как ректор И.Д. Кугушев стал

создателем в ЛТИ целлюлозно-бумажной промышленности первой в стране школы подготовки инженеров-экологов, мощной отечественной научной школы в области технологических процессов и оборудования целлюлозно-бумажного производства, выпускники которой возглавили исследовательские, учебные институты и кафедры в разных регионах страны, а за рубежом (Вьетнам, КНДР) работают в правительственных органах.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

УТЕХИНА Инна Константиновна — старший преподаватель Ленинградского политехнического института имени М.И. Калинина в 50–70-х годах; 197343, Санкт-Петербург, Ланское шоссе, д. 63; e-mail: d.npprif@mail.ru.

КУГУШЕВ Александр Ильич — кандидат технических наук старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»; 197045, Ушаковская набережная 17/1, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: d.npprif@mail.ru

AUTHORS

UTEHINA Inna C. — LPI named after M. I. Kalinin; 197343, St. Petersburg, Lanskoye highway, 63; e-mail: d.npprif@mail.ru**KUGUSHEV Alexander I.** — Military Educational and Scientific Center of the Navy «Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov»; 197045, Ushakovskaya Quay, 17/1, St. Petersburg, Russia; e-mail: d.npprif@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

УДК 621.01:531.8

А.Н. Евграфов, Д.П. Козликин

ЛЕОНИД ВЛАДИМИРОВИЧ АССУР

A.N. Evgrafov, D.P. Kozlikin

LEONID VLADIMIROVICH ASSUR

В статье приведены краткие биографические сведения из жизни Л.В. Ассура, рассмотрены идеи, лежащие в основе его главного научного труда, и прослежено развитие этих идей трудами отечественных и зарубежных ученых.

ЛЕОНИД АССУР. ГРУППА АССУРА. СТРУКТУРА МЕХАНИЗМОВ. СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ.

This article presents biographical notes on Russian scholar L.V. Assur, gives an overview of his ideas that form the basis of his main scientific work, and highlights the development of Assur's ideas in the works of Russian and foreign researchers.

LEONID ASSUR. ASSUR GROUP. STRUCTURE OF MECHANISMS. SYNTHESIS OF MECHANISMS.

Статья посвящена выдающемуся ученому, работавшему в Санкт-Петербургском (Петроградском) политехническом институте. Его главный научный труд через 30 лет после смерти автора был переиздан издательством АН СССР «Наука» в почетнейшей серии «Классики науки» [1] и стал известен в широких научных кругах. Основные структурные единицы, из которых состоят механизмы, стали называть его именем — группами Л.В. Ассура; все остальные группы называют неассуровыми группами. Число работ, посвященных исследованию свойств этих структур, с годами только растет. В предлагаемой статье приведены краткие биографические сведения из жизни Ассура, рассмотрены идеи, лежащие в основе его главного научного труда, и прослежено развитие этих идей трудами отечественных и зарубежных ученых.

Биографические сведения. Леонид Владимирович Ассур родился 31 марта 1878 года в г. Рыбинске Ярославской губернии [2]. Отец Леонида, Владимир Федорович Ассур, работал служащим в управлении железной дороги. У Леонида было два младших брата (рис. 1): Андрей (родился в 1881 году) и Владимир (родился в 1883 году). Мать, Людмила Андреевна, умерла, когда Леониду было семь лет.

Позже Ассуры переехали в Гродно, где в 1897 году Леонид закончил Гродненскую гимназию с золотой медалью. Он хорошо знал латынь, греческий, французский, немецкий и английский языки, играл на фортепиано, сочинял музыку.

В том же 1897 году Леонид поступил в Московский университет на математическое отделение физико-математического факультета. Механику преподавал в то время профессор Н.Е. Жуковский (1847–1921). Именно идеи Н.Е. Жуковского подтолкнули Ассура к решению топологических задач.

Рис. 1. На фото: Леонид, Владимир, Владимир Федорович, Андрей
(Из архива Т. Рауш — правнучки Л.В. Ассура. Публикуется впервые)

В 1901 году Леонид Ассур окончил Московский университет. По рекомендации Н.Е. Жуковского он сразу поступил на второй курс механического отделения Московского технического училища (сейчас — Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана). Это был не единичный случай, когда будущий инженер-механик получал фундаментальную математическую подготовку, но один из тех случаев, который дал блестящий результат.

В 1906 году Ассур закончил Московское техническое училище и получил звание инженера-механика. Большинство технических школ России находилось в тогдашней столице — Санкт-Петербурге, сюда и отправился Ассур в поисках работы. Однако сразу он не смог устроиться на работу преподавателем, как хотел, поэтому поступил на работу в качестве помощника заведующего городскими общественными мостостроительными мастерскими. В его обязанности входила подготовка строительства и материальное обеспечение постройки мостов: Аларчина (через канал Грибоедова), Пантелеймоновского (через Фонтанку) и др.

В справочнике «Весь Санкт-Петербург» имя Л.В. Ассура впервые появилось в 1908 году, где он значился как инженер-механик, проживающий на ул. Бармалеева. В 1909 году Ассур переехал на ул. Широкую, а с 1910 году жил на Английском пр. (с 1952 года называется пр. А. Пархоменко), откуда недалеко было до Политехнического института.

В 1907 году Ученый совет Санкт-Петербургского политехнического института впервые объявил прием на механическое отделение. Появились вакансии, и Л.В. Ассур получил приглашение на работу в институт в качестве преподавателя машиностроительного черчения на механическом отделении. В следующем, 1908 году Ассуру поручили вести занятия по теоретической механике и по прикладной механике. Лекции по прикладной механике читал профессор В.Л. Кирпичев (1845–1913), а лекции по теоретической механике — профессор И.В. Мещерский (1859–1935). С 1907 года И.В. Мещерский начал составлять задачи по теоретической механике, которые имели конкретное техническое содержание. К этой работе был привлечен и Ассур. Составленный сборник задач имел исключительный успех: он переиздавался 50 раз (50-е издание вышло в 2010 году).

В.Л. Кирпичев организовал в Политехническом институте научно-технический кружок. В 1908–1909 гг. на заседании этого кружка Л.В. Ассур прочитал два доклада: «Аналоги ускорений и их применение к динамическому расчету плоских стержневых систем» и «Основные свойства аналогов ускорений в аналитическом изложении». Полные тексты двух докладов были опубликованы в 1909 году в «Известиях Санкт-Петербургского политехнического института» — соответственно в Т. 9, вып. 2 (с. 735–773), Т. 10, вып. 1 (с. 43–74) и в т. 11, вып. 2 (с. 317–338). В этих работах Ассур пришел к выводу, что «ускорение есть частный случай более общего понятия “аналог ускорения”. Поэтому из всякой теоремы, выведенной для аналогов ускорений, будет вытекать соответствующая теорема для ускорений». Ассур указал на возможности применения своей теории. В частности, он разработал основы графического исследования механизмов с несколькими (!) степенями свободы. Эта задача имеет не только теоретическое, но и практическое значение, особенно в наше время, и Ассуру принадлежит честь первой ее постановки и первого решения.

В 1911 году Леонид Ассур начал сдавать экзамены и одновременно работать над диссертацией на ученую степень адъюнкта. Эта работа — «Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации» — стала основным трудом его жизни.

В 1914 году в «Известиях Санкт-Петербургского политехнического института» была опубликована первая часть работы — «Учение о нормальных многоповодковых цепях и роль их в образовании механизмов» [3]. В 1915 году вышла вторая часть: «Приложение учения о нормальных цепях к общей теории механизмов» [4]. На рис. 2 представлен уникальный экземпляр книги Л.В. Ассура с автографом автора, хранящийся в Фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

13 февраля 1916 году на заседании Ученого совета Санкт-Петербургского политехнического института состоялась защита диссертации Л.В. Ассура. Официальными оппонентами были крупные ученые, занимавшиеся различными вопросами прикладной механики: про-

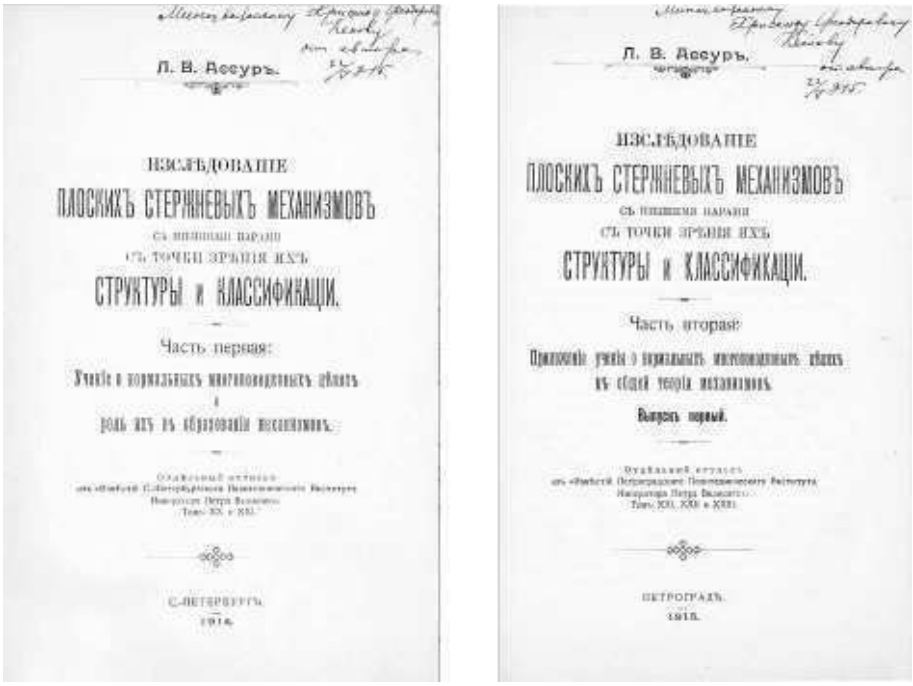


Рис. 2. Титульные листы книги «Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации», части 1 и 2, с автографом автора*

фессор Московского университета и Московского технического училища Н.Е. Жуковский, профессор Казанского университета Д.Н. Зейлигер (1864–1936) и профессор прикладной механики А.А. Радциг (1869–1941). Заметим, что Александр Александрович Радциг в те годы был деканом механического отделения Политехнического института, в сложные 1917–1918 годы — ректором института, а в 1933-го он был избран членом-корреспондентом АН СССР.

Защита Ассура прошла успешно, а диссертанту присвоили ученую степень адъюнкта по кафедре прикладной механики.

После защиты диссертации Леонид Владимирович не мог заниматься научной работой так же интенсивно, как и раньше. В мае 1916 году Ассур был привлечен к работе в Петроградском военно-промышленном комитете помощи фронту. В этом комитете работали инженеры очень высокой квалификации. Ассур руководил проектированием различных систем армейского имущества.

Примерно к этому времени относится фотография, впоследствии многократно перепечатывавшаяся и вошедшая в энциклопедии (рис. 3).

После революции 1917 года и с началом Гражданской войны снабжение Санкт-Петербурга продовольствием и предметами первой необходимости значительно ухудшилось. Часть преподавателей уехала из города. Ассуру пришлось преподавать в двух институтах: в Политехническом и в Лесном (сейчас — Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова). Педагогическая нагрузка значительно возросла, отнимая время от научной работы. Здоровье Леонида Владимировича было подорвано. В июне 1919 года Ассур уехал в Воронеж, где в это время жила его семья. Он собирался вернуться в Санкт-Петербург к началу занятий, но в условиях гражданской войны это не получилось. Здоровье Ассура не улучшалось.

*«Многоуважаемому Хрисанфу Феодоровичу Кетову от автора 22/V 915.». Х.Ф. Кетов (1887–1948) в 1915 году — молодой преподаватель, а с 1930-го — заведующий кафедрой теории механизмов и машин Ленинградского политехнического института (сейчас Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Рис. 3. Л.В. Ассур.
Фотография из архива Т. Рауш.

В мае 1920-го он лег в клинику, где ему были сделаны две операции. 19 мая после второй операции он умер не приходя в сознание.

Л.В. Ассур был женат на Елене Михайловне Миндриной. В уже упоминавшейся монографии [2] ошибочно указана фамилия Миндлина. Эта ошибка не была случайной: Елена Михайловна сознательно изменила в девичьей фамилии одну букву, т.к. она опасалась возможных репрессий: ведь ее отец был состоятельным человеком.

У Ассуров было трое детей: Ольга (1907–1909), Всеволод (1910–1987) и Елена (1913–2001). Ольга трагически погибла в возрасте двух лет (сгорела). Всеволод и Елена прожили долгую жизнь. Елена закончила физико-механический факультет Ленинградского политехнического института. В 1947 году защитила кандидатскую диссертацию (экземпляр диссертации хранится в Фундаментальной библиотеке СПбГПУ), работала доцентом. Всеволод преподавал в Москве, был награжден правительственными наградами. Внуки и правнуки Л.В. Ассура живут в Москве, Санкт-Петербурге и в Париже.

Фактически работа Л.В. Ассура осталась незавершенной. Известно, что Ассур продолжал работать над своей классификацией, но его бумаги были утеряны. По семейной легенде они были куплены в голодные годы за продукты ученым А., но авторы не нашли подтверждения этой легенде.

Развитие идей Ассура. Книга Л.В. Ассура [3, 4] была издана небольшим тиражом. Трактат оказался очень сложным для восприятия, а сам автор умер. Идеи Ассура оказались основательно забыты на несколько лет. Ученые в своих работах упоминали классификацию Ассура, но не использовали ее для решения задач анализа и синтеза механизмов. В российских университетах и институтах структуру механизмов излагали по Ф. Рело (1829–1905). Для классификации механизмов использовали различные варианты классификации Р. Виллиса (1800–1875). Механизмы рассчитывали по-старому: для каждой задачи подбирали свой оригинальный способ. Даже те ученые, которые хорошо знали трактат Ассура, не пользовались его идеями. Н.И. Мерцалов, учитель Ассура, которому он показывал свою диссертацию, считал метод Ассура неэффективным ни для теории, ни для инженерной практики. А.П. Малышев (1879–1962) считал, что работа Ассура написана трудно для восприятия, а разработанные им методы очень сложны. А.А. Радциг (оппонент Ассура при защите диссертации) и А.П. Иванов (ученик Ассура, изучавший у него прикладную механику), в своих учебниках по прикладной механике (1930 г. и 1934 г. соответственно) только упоминали Ассура, но его идеями не пользовались. В 1925 году вышло посмертное издание учебника Д.С. Зернова «Прикладная механика», которое редактировал Х.Ф. Кетов. Но и в этой книге Кетов как редактор книги ограничился только ссылкой на трактат Ассура.

В том, что ситуация с идеями Ассура стала меняться, мы во многом обязаны И.И. Артоболевскому (1905–1977), Н.Г. Бруевичу (1896–1987), В.В. Добровольскому (1880–1956). В 1930-е годы будущие академики работали на кафедре механики в Военно-воздушной академии в Москве.

И.И. Артоболевский узнал о работе Ассура в 1928 году из статьи А.П. Малышева. Молодой ученый понял, какие большие возможности для построения общей теории механизмов открывает теория Ассура. Впервые структуру и классификацию механизмов «по Ассуру» Артоболевский изложил в Московском институте химического машиностроения, а несколько позже — в Московском университете.

Н.Г. Бруевич в 1935 году опубликовал статью [5]. Используя методы Ассура, Бруевич разрабо-

тал метод решения задач кинематики с помощью векторных уравнений.

В.В. Добровольский в 1936 году на заседании семинара по теории механизмов при Техническом комитете Академии наук выступил с докладом «Основные принципы классификации и структуры механизмов», в котором изложил основные идеи Ассура.

В 1937 году И.И. Артоболевский опубликовал монографию [6], в которой при изложении структуры и классификации механизмов использовал идеи Ассура.

В 1938 году была разработана и утверждена программа обучения студентов по курсу «Теория механизмов и машин» с учетом исследований Ассура. Это потребовало создания новых учебников. В 1939-м вышел первый учебник «Теория механизмов и машин» [7], написанный в соответствии с новой программой. Авторы учебника — сотрудники Ленинградского политехнического института Х.Ф. Кетов (ему Ассур подарил экземпляр своего трактата) и Н.И. Колчин (1894–1975). Первый раздел учебника посвящен исследованию структуры и классификации механизмов по Ассуру.

В 1939 году Артоболевский опубликовал монографию «Структура, кинематика и кинетостатика многозвенных плоских механизмов» [9]. В ней он непосредственно развивает теорию Ассура. Кроме исследования структуры механизмов, книга содержит решение задачи об определении положений групп. Графические методы, примененные и усовершенствованные Ассуром, здесь дополнены аналитическим методом векторных уравнений. Разработанный графоаналитический метод оказался нагляднее, удобнее и точнее графического метода. Классификация Ассура была распространена на механизмы, включающие в себя поступательные и высшие кинематические пары. Анализ кинетостатики Артоболевский довел до групп третьего класса высших порядков.

В 1940 году вышло первое издание учебника И.И. Артоболевского «Теория механизмов и машин» [9]. Касаясь структуры и классификации механизмов, автор написал: «В период с 1914-го по 1918 год появляется исключительная по глубине своего анализа работа по классификации плоских механизмов, принадлежащая русскому ученому Ассуру. В этой работе излагается классификация плоских механизмов, тесно увязанная с методами их кинематического и кинетостатического анализа. Классификация, предложенная Ассуром, охватывает почти все существующие в технике плоские механизмы. Эта работа должна быть расценена как работа исключительного значения, давшая богатейший материал для ряда последующих исследований русских ученых».

Принцип построения классификации Ассура использовал В.В. Добровольский. Свои идеи он изложил в работах «Основные принципы рациональной классификации механизмов» [10] и «Теория механизмов» [11]. Добровольский предложил наслаивать на первоначальный механизм кинематические цепи, которые могут изменять степень свободы механизма. Для таких цепей он впервые использовал термин «неассуровы цепи». В зависимости от того, увеличивает или уменьшает степень свободы присоединяемая цепь, она относится к группе положительного или отрицательного порядка. Тогда Ассурова цепь, не меняющая степень свободы начального механизма, относится к цепям нулевого порядка. Наибольшее распространение имеют группы Ассура, поскольку они кинематически и статически определимы. Целесообразность введения неассуровых цепей Добровольский видел в том, что «они могут соединять несколько механизмов с независимыми движениями в один и, таким образом, служить средством передачи движения между ними». Работа Добровольского примечательна еще и тем, что в ней была предпринята попытка структурного анализа механизма не с одной, а с несколькими степенями свободы.

И.И. Артоболевский тоже продолжал развивать идеи Ассура. В работе «Опыт структурного анализа механизмов» [12] и др. он дал определение структурной группе. Группа — такая кинематическая цепь, которая после ее присоединения крайними свободными элементами пар к стойке будет обладать нулевой степенью подвижности и которая не может быть расчленена на самостоятельные кинематические цепи нулевой степени подвижности. Ассур не различал понятий группы и цепи, он одинаково пользовался обоими понятиями.

В соответствии с классификацией Артоболевского структурные группы Ассура характеризуются двумя признаками: класс и порядок.

Порядок группы соответствует числу элементов кинематических пар, которыми группа присоединяется к звеньям предшествующих групп и к стойке. Класс группы определяется числом кинематических пар, в которые входят звенья, образующие наивысший контур группы.

Г.Г. Баранов (1899–1968) в работе «Классификация, строение, кинематика и кинетостатика плоских механизмов с парами первого рода» [13] предложил другую систему классификации плоских групп Ассура. В соответствии с нею класс *k* группы равен половине числа ее звеньев, так что двухзвенная группа (диада) — это группа первого класса, четырехзвенная группа — группа второго класса и т. д. Все группы класса *k* делятся на порядки так, как это предложено И.И. Артоболевским.

В 1952 году в издательстве Академии наук СССР в серии «Классики науки» под редакцией И.И. Артоболевского было опубликовано 2-е издание книги «Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации» [см.1] (рис. 4).

Книга включала в себя титульный трактат, два дополнения, написанных Ассуром в 1915 и 1918 годах, а также приложение: отзыв Н.Е. Жуковского о трактате Л.В. Ассура, статью Артоболевского «Л.В. Ассур и его работы по теории механизмов», примечания и список научных трудов Ассура. Книга имела довольно большой для научной монографии тираж (2500 экз.). Ассур был признан классиком теории механизмов.

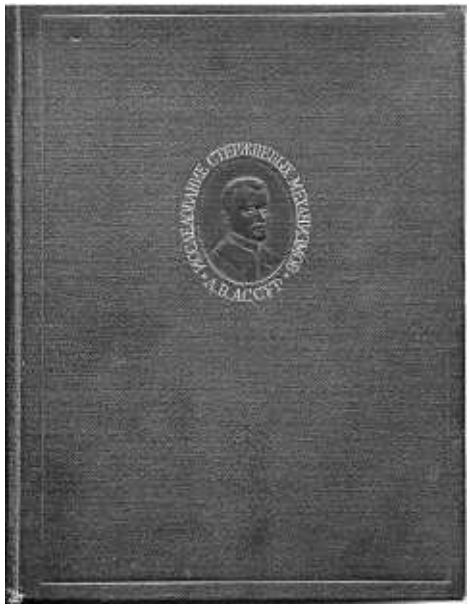


Рис. 4. Обложка книги «Исследование плоских стержневых механизмов...», выпущенной в 1952 г. в серии «Классики науки»

Издание книги пробудило новую волну интереса к идеям Ассура. Классификация Ассура стала исходной системой структурной классификации для дальнейших исследований российской школы теории механизмов и машин. Ее использовали почти во всех учебниках по теории механизмов: С.Н. Кожевников («Теория механизмов и машин», первое издание в 1947 году, переведена на польский, чешский, венгерский и китайский языки), Н.И. Колчин («Механика машин» в 5-ти частях, первое издание в 1948–1957 гг.), Вл.А. Зиновьев («Теория механизмов и машин», первое издание в 1955 году, переведено на английский язык в 1963 году) и др.

Э.Е. Пейсах (1936–2008) предложил уточненное определение группы Ассура, более удобное для структурного анализа механизмов [14]. На основании этого определения он предложил новую классификацию структурных групп Ассура. В ней фигурируют два основных структурных признака — класс и разряд. Кроме того, имеются еще четыре дополнительных структурных признака — число звеньев, число кинематических пар, порядок и число изменяемых замкнутых контуров. Если известны класс и разряд группы, то все четыре дополнительных структурных признака определяются однозначно, то есть они являются зависимыми от двух основных признаков. Каждый механизм можно представить в виде некоторого символьного кода. Рассматривая символьные коды структур и отбрасывая повторяющиеся, можно составить электронные каталоги плоских структурных групп различных классов с вращательными парами. С помощью алгоритма, предложенного в работе [14], и соответствующей программы Пейсах выполнил структурный синтез групп Ассура до шестого класса включительно, т. е. для $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, а также составил электронный каталог групп Ассура для $k = 2, 3, 4, 5$.

В 2000 году в издательстве Springer коллектив авторов — сотрудников СПбГПУ — выпустил книгу «Advanced Theory of Mechanisms and Machines» [15]. В этой книге предложено следующее определение структурной группы.

«Кинематическая цепь с заданными входами называется нормальной *n*-подвижной структурной группой, или просто структурной группой, если число ее независимых входов совпадает с числом степеней подвижности».

Такая структурная группа, как и группа Ассура, является кинематически и статически определимой, а группа Ассура — частный случай этой группы. Наслаивая такие группы (как и группы Ассура) на первоначальный механизм или на стойку, можно получать новые, более сложные механизмы, которые всегда будут кинематически и статически определимы. Многочисленные механизмы современных машин, включая пространственные, многодвигательные, разомкнутые, можно представить в виде цепи из подобных структурных групп. Выделить структурные группы современных многозвенных механизмах бывает достаточно сложно даже для квалифицированных специалистов. В статье Д. Карловского, С. Вишневского и Н. Семеновой «Программа структурного анализа механизмов» [16] приведено описание компьютерной программы. Эта программа автоматически вычленяет в механизме ассуровы и неассуровы структурные группы.

Исследование структурных групп Ассура продолжается и в наши дни как в России, так и за рубежом. Так, В.А. Терешин в работе [17] пришел к выводу, что все возможные десять плоских шестизвенных структурных групп Ассура с вращательными парами порождаются из основных семизвенных групп. М.Д. Ковалев в работе [18] показал, что вопрос о возможности построения устойчивой и однозначно собираемой конструкции достаточно решить для структурных групп Ассура. Л.Т. Дворников в работе [19] обосновал и изложил метод структурной классификации плоских шарнирных групп Ассура на основании семи критериев, а в [20] совместно с Л.Н. Гудимовой предложил метод синтеза структур восьмизвенных групп Ассура.

F.R.E. Crossley и N.Seshachar одни из первых за рубежом предложили решать задачи геометрии плоских групп Ассура с помощью компьютера [21]. В дальнейшем компьютеры использовали не только для анализа групп Ассура, но и для их структурного синтеза [22]. C.Galletti в работе [23] рассмотрел геометрический анализ групп Ассура высоких классов. M.Ceccarelli, описывая в [24] историю создания классификации механизмов, важнейшую роль отводит Ассуру. K.D. Bouzakis с соавторами в работах [25, 26] составил функции положения групп Ассура 3-го и 4-го класса. Новый графо-аналитический метод кинематического анализа рассмотрен в работе G.Calle, A. Díaz, E. Hena, H. Quintero [27]. Геометрический анализ пятизвенной кинематической цепи Ассура выполнил W.Y. Cheng в [28]. Много работ посвящено синтезу групп Ассура. K. Romaniak на 12-м Всемирном конгрессе IFToMM в Безансоне (Франция) сделал доклад о методологии создания групп Ассура [29]. O. Shai, вводя термин «фундаментальный граф Ассура», в работе [30] предлагает выполнить топологический синтез всех плоских механизмов. K. Wohlhart описывает роботы, в схемах которых использованы группы Ассура [31].

Из приведенного обзора источников (на самом деле их значительно больше) можно заключить, что идеи Ассура дали мощный толчок развитию теории механизмов, исследованию как существующих механизмов, так и проектированию новых с использованием самых современных методов, а также и для развитию этих методов. Отметим, что многие публикации используют классификацию Ассура как общеизвестную и общепринятую, без ссылок на первоисточник. Это является своеобразным подтверждением признания заслуг Ассура в области теории механизмов.

Авторы благодарят сотрудников Российской национальной библиотеки, Фундаментальной библиотеки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, а также Сергея Ассура и Татьяну Рауш за предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ассур, Л.В.** Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации [Текст] / Л.В. Ассур / Ред. И.И. Артоболевский.— Изд-во Академии наук СССР, 1952.— 592 с.

2. **Артоболевский, И.И.** Леонид Владимирович Ассур (1878— 1920) [Текст] / И.И. Артоболевский, А.Н. Боголюбов.— М.: Наука, 1971.— 264 с.

3. **Ассур, Л.В.** Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их

структуры и классификации. Часть 1. Учение о нормальных многоповодковых цепях и роль их в образовании механизмов [Текст] / Л.В. Ассур.— Известия Санкт-Петербургского политехнического института, 1914. Т. 20–21; Дополнение ко второй главе первой части.— Там же. 1915. Т. 24.

4. **Ассур, Л.В.** Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. Часть 2. Приложение учения о нормальных цепях к общей теории механизмов [Текст] / Л.В. Ассур.— Известия Санкт-Петербургского политехнического института. 1914. Т. 21–23. Дополнение к первой главе второй части.— Там же. 1918. Т. 24.

5. **Бруевич, Н.Г.** Применение векторных уравнений в кинематике плоских механизмов [Текст] / Н.Г. Бруевич // Материалы Военно-воздушной академии им. Жуковского.— М., 1935.— С. 52–98.

6. **Артоболевский, И.И.** Теория пространственных механизмов. Часть 1 [Текст] / И.И. Артоболевский.— М.-Л.: ОНТИ, 1937.— 235 с.

7. **Кетов, Х.Ф.** Теория механизмов и машин [Текст] / Х.Ф. Кетов, Н.И. Колчин / Под ред. Х.Ф.Кетова.— Л.-М.: Машгиз, 1939.— 608 с.

8. **Артоболевский, И.И.** Структура, кинематика и кинетостатика многозвенных плоских механизмов [Текст] / И.И. Артоболевский.— М.-Л.: ОНТИ, 1939.— 232 с.

9. **Артоболевский, И.И.** Теория механизмов и машин [Текст] / И.И. Артоболевский.— М.-Л.: Гостехиздат, 1940.— 762 с.

10. **Добровольский, В.В.** Основные принципы рациональной классификации механизмов [Текст] / В.В. Добровольский.— В кн. Добровольский В.В., Артоболевский И.И. Структура и классификация механизмов.— М.-Л.: Издательство АН СССР, 1939.— С. 5–48.

11. **Добровольский, В.В.** Теория механизмов. Ч. 1. Плоские механизмы с низшими парами [Текст] / В.В. Добровольский.— М.-Л.: ОНТИ, 1936.— 347 с.

12. **Артоболевский, И.И.** Опыт структурного анализа механизмов. В кн. Добровольский В.В., Артоболевский И.И. Структура и классификация механизмов [Текст] / И.И. Артоболевский.— М.-Л.: Издательство АН СССР, 1939.— С. 49–66.

13. **Баранов, Г.Г.** Классификация, строение, кинематика и кинетостатика плоских механизмов с парами первого рода [Текст] / Г.Г. Баранов.— Труды семинара по теории машин и механизмов. 1952. Том 2, Вып. 46.— С. 15–39.

14. **Пейсах Э.Е.** Классификация плоских групп Ассура [Текст] / Э.Е. Пейсах // Теория механизмов и машин. — 2007. Т. 5, №1.— С. 5–17.

15. **Kolovsky, M.Z.** Advanced Theory of Mechanisms and Machines [Text] / M.Z. Kolovsky, A.N. Evgrafov, Yu.A. Semenov, A.V. Slousch.— Berlin New York: Springer, 2000.— 396 p.

16. **Карловский, Д.А.** Программа структурного анализа механизмов [Текст] / Д.А. Карловский, С.В. Вишневский, Н.С. Семёнова // Теория механизмов и машин.— 2005. Т. 3, №1(5).— С. 67–69.

17. **Терешин, В.А.** Наглядное представление особых положений всех шестизвенных групп Ассура [Текст] / В.А. Терешин // Теория механизмов и машин.— 2003. №2.— С. 15–16.

18. **Ковалев, М.Д.** О декомпозиции шарнирных схем и геометрической устойчивости ферм [Текст] / М.Д. Ковалев //Современное машиностроение. Наука и образование: Матер. 3-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.— С. 779–787.

19. **Дворников, Л.Т.** К вопросу о классификации плоских групп Ассура [Текст] / Л.Т. Дворников // Теория механизмов и машин.— 2008. Т. 6, №2(12).— С. 18–25.

20. **Дворников, Л.Т.** Задача о поиске многообразия восьмизвенных плоских шарнирных групп Ассура [Текст] / Л.Т. Дворников, Л.Н. Гудимова // Теория механизмов и машин.— 2008. Т. 6, №1(11).— С. 15–29.

21. **Crossley, F. R.E.** (1971) Analysis of the displacements of planar Assur groups by computer [Text] / Crossley F. R.E, Seshachar N. // 3° world congress on T.M.M.— 1971.— P. 71–82.

22. **Sun, X-Q.** Method and Realization of Computer-Aided Combination of Assur Groups in Conceptual Design of Planar Linkage Mechanisms [Text] / X-Q. Sun, L. Tang // Reconfigurable Mechanisms and Robots.— 2009 / Dai, J. S., Zoppi, M. and Kong X., Eds.— P. 123–128.

23. **Ceccarelli, M.** Classifications of mechanisms over time [Text] / M. Ceccarelli // Proceedings of International Symposium on History of Machines and Mechanisms. HMM 2004. Kluwer, Dordrecht.— 2004.— P. 285–302.

24. **Galletti C.** On the position analysis of Assur's groups of high class [Text] / C. Galletti // Meccanica.— 1979. № 14, Vol. 1.— P. 6–10.

25. **Bouzakis, K.D.** Position analysis in polynomial form of class-three Assur [Text] / K.D. Bouzakis, G. Mansour, S. Mitsi, I. Popescu // Mechanisms and Machines Theory.— 2008. Vol. 43.— P. 1401–1415.

26. **Bouzakis, K.D.** Position analysis in polynomial form of planar mechanism with an Assur group of class 4 including one prismatic joint [Text] / K.D. Bouzakis, G. Mansour, S. Mitsi // Mechanisms and Machines Theory.— 2004. Vol. 39.— P. 237–245.

27. **Calle, G.** A novel graphical and analytical method for the kinematic analysis of fourth class Assur groups [Text] / G. Calle, A. Díaz, E. Hena, H. Quintero // Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia.— № 60.— P. 81–91.

28. **Cheng, W.Y.** The position analysis of Assur kinematic chain with five links [Text] / W.Y. Cheng // Mechanisms and Machines Theory.— 2005. Vol. 40.— P. 1015–1029.

29. **Romaniak, K.** Methodology of the Assur Groups Creation [Text] / K. Romaniak // 12th IFToMM World Congress. Besancon, France.— 2007.— P. 1–5.

30. **Shai, O.** Topological synthesis of all 2d mechanisms through Assur graphs, Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering [Text] / O. Shai // Conference IDETC/CIE 2010. Montreal, Quebec, Canada.— 2010.— P. 1727–1738.

31. Wohlhart K Robots Based on Assur Group A (3.5), Advances in Robot Kinematics [Text] // Analysis and Design Editors.— 2008.— P. 165–175.

REFERENCES

1. **Assur L.V.** Issledovanie ploskikh sterzhnevykh mekhanizmov s nizshimi parami s tochki zreniia ikh struktury i classifikatsii [Investigation of flat bar mechanisms with low vapors in terms of their structure and classification] [Tekst] // AS USSR Publ.— 1952.— 529 p. (rus.)

2. **Artobolevski I.I., Bogolyubov A.N.** Leonid Vladimirovich Assur (1878–1920) [Tekst].— Moscow, Nauka, 1971.— 264 p. (rus.)

3. **Assur L.V.** Research of a planar linkages with lower pairs on the basis of their structure and classification. Part 1. Teaching about normal multi-arm chains and their role in the formation of mechanisms [Tekst] // The Proceedings of Saint-Petersburg Polytechnical Institute-Vol 20–21. An addition to the second chapter of the first part.— Ibid. 1915. Vol 24. (rus.)

4. **Assur L.V.** Research of a planar linkages with lower pairs on the basis of their structure and classification. Part 2. Application of the teaching on normal chains to the general theory of mechanisms [Tekst] // The Proceedings of Saint-Petersburg Polytechnical Institute Vol 21. An addition to the first chapter of the second part.— Ibid., 1918. Vol. 24. (rus.)

5. **Bruevich N.G.** Primenenie vektornykh uravnenij v kinematike ploskikh mekhanizmov [Application of vector equations in the kinematics of planar mechanisms] [Tekst] // Materials of Air Force Academy named after Zhukovskiy. Moscow, 1935.— P. 52–98. (rus.)

6. **Artobolevski I.I.** Teorija prostranstvennykh mekhanizmov [Theory of spatial mechanisms]. Part 1 [Tekst] // Moscow, Leningrad: ONTI, 1937.— 235 p. (rus.)

7. **Ketov H.F., Kolchin N.I.** Teorija mehanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines] [Tekst].— Leningrad, Moscow: Mashgiz, 1939.— 608 p. (rus.)

8. **Artobolevski I.I.** Struktura, kinematika i kinetostatika mnogozvennykh ploskikh mekhanizmov [Structure, kinematics and kinetostatics of multi-link planar mechanisms] [Tekst].— Moscow, Leningrad: ONTI, 1939.— 232 p. (rus.)

9. **Artobolevski I.I.** Teorija mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines] [Tekst].— Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1940.— 762 p. (rus.)

10. **Dobrovolsky V.V.** Osnovnye principy racional'noj classifikatsii mekhanizmov [Basic principles of rational classification of mechanisms] // V kn.: Dobrovol'skii V. V., Artobolevskii I.I. Struktura i klassifikatsiia mekhanizmov [Structure and classification of mechanisms] [Tekst].— Moscow, Leningrad: AS USSR Publ., 1939.— P. 5–48 (rus.)

11. **Dobrovolsky V.V.** Teorija mekhanizmov. Ch. 1. Ploskie mekhanizmy s nizshimi parami [Theory of mechanisms. Part 1. Planar mechanisms with lower pairs] [Tekst].— Moscow, Leningrad: ONTI, 1936.— 347 p. (rus.)

12. **Artobolevskij I.I.** Opyt strukturnogo analiza mekhanizmov [Experience of structural analysis of the mechanisms]. Dobrovol'skii V. V., Artobolevskii I. I. Struktura i classifikatsiia mekhanizmov [Structure and classification of mechanisms] [Tekst].— Moscow, Leningrad: AS USSR Publ., 1939.— P. 49–66. (rus.)

13. **Baranov G.G.** Classifikatsija, stroenie, kinematika i kinetostatika ploskikh mekhanizmov s parami pervogo roda [Classification, structure, kinematic and kinetostatic of mechanisms with first order pairs] [Tekst] // AS USSR Publ., Mech. Mach. Theory.— Vol. 46.— P. 15–39. (rus.)

14. **Peisach E.E.** Classifikatsija ploskikh grupp Assura [Classification of planar Assur groups] [Tekst] // Theory of mechanisms and machines.— 2007. Vol. 5. № 1.— P. 18–29. (rus.)

15. **Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V.** Advanced Theory of Mechanisms and Machines [Text].— Berlin, New York: Springer, 2000.— 396 p.

16. **Karlovskij D.A., Vishnevskij S.V., Semenova N.S.** Programma strukturnogo analiza mehanizmov [Programm for structural analysis of mechanisms] [Tekst] // Theory of mechanisms and machines.— 2005. Vol. 3, № 1.— P. 67–69. (rus.)

17. **Tereshin V.A.** Nagljadnoe predstavlenie osobykh polozhenij vsekh shestizvennykh grupp Assura [Graphic presentation of singular positions of all possible six links Assure groups] [Tekst] // Theory of mechanisms and machines.— 2003. № 2.— P. 15–16. (rus.)

18. **Kovalev M.D.** O dekompozitsii sharnirnykh skhem i geometricheskoj ustojchivosti ferm [On decomposition of hinged schemes and geometrical stability of trusses] [Tekst] // Modern engineering. Science and education / Edited by M.M.Radkevich and A.N.Evgrafov.— St.-Petersburg, St.-Petersburg Polytechnical University Press, 2013.— P. 779–787. (rus.)

19. **Dvornikov L.T.** K voprosu o klassifikatsii ploskikh grupp Assura [About the structural classification of plain

groups of Assur] [Tekst] // Theory of mechanisms and machines.— 2008. Vol. 6, № 2(12).— P. 18–25. (rus.)

20. **Dvornikov L.T., Gudimova L.N.** Zadacha o poiske mnogoobrazija vos'mizvennykh ploskikh sharnirnykh grupp Assura [Problem of synthesis of eight-link plane Assur groups with revolute joints] [Tekst] // Theory of mechanisms and machines. 2008.— Vol. 6, № 1(11). P. 15–29. (rus.)

21. **Crossley F. R.E, Seshachar N.** Analysis of the displacements of planar Assur groups by computer [Text].— World congress on T.M.M.— P. 71–82.

22. **Sun X-Q., Tang L.** Method and Realization of Computer-Aided Combination of Assur Groups in Conceptual Design of Planar Linkage Mechanisms [Text] // Reconfigurable Mechanisms and Robots.— Dai, J.S., Zoppi, M. and Kong X., Eds.— P. 123–128.

23. **Ceccarelli M.** Classifications of mechanisms over time [Text] // Proceedings of International Symposium on History of Machines and Mechanisms, HMM 2004.— Kluwer, Dordrecht.— P. 285–302.

24. **Galletti C.** On the position analysis of Assur's groups of high class [Text] // Meccanica.— № 14, Vol. 1.— P. 6–10.

25. **Bouzakis K.D., Mansour G., Mitsi S., Popescu I.** Position analysis in polynomial form of class-three Assur [Text] // Mechanisms and Machines Theory.— 2008. Vol. 43.— P. 1401–1415.

26. **Bouzakis K.D., Mansour G., Mitsi S.** Position analysis in polynomial form of planar mechanism with an Assur group of class 4 including one prismatic joint [Text] // Mechanisms and Machines Theory.— 2004. Vol. 39.— P. 237–245.

27. **Calle G., Díaz A., Hena E., Quintero H.** A novel graphical and analytical method for the kinematic analysis of fourth class Assur groups [Tekst] // Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia.— № 60.— P. 81–91.

28. **Cheng W.Y.** The position analysis of Assur kinematic chain with five links [Text] // Mechanisms and Machines Theory.— 2005. Vol. 40.— P. 1015–1029.

29. **Romaniak K.** Methodology of the Assur Groups Creation [Text] // 12th IFToMM World Congress, Besancon, France. P. 1–5.

30. **Shai O.** Topological synthesis of all 2d mechanisms through Assur graphs [Text] // Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010. Montreal, Quebec, Canada.— P. 1727–1738.

31. **Wohlhart K.** Robots Based on Assur Group A (3.5) [Text] // Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design Editors.— 2008.— P. 165–175.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕВГРАФОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук доцент заведующий кафедрой теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: a.evgrafov@spbstu.ru

КОЗЛИКИН Денис Петрович — кандидат технических наук доцент кафедры теории механизмов и машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kodenis@rambler.ru

AUTHORS

EVGRAFOV, Alexander N. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: a.evgrafov@spbstu.ru

KOZLIKIN, Denis P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kodenis@rambler.ru

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013

Научное издание

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 4-1 (183) 2013

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

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

Научный редактор, корректор — канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова*
Технический секретарь — *О.А. Матенев*
Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 25.12.2013. Формат 60□84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 52,0. Тираж 1000. Заказ 350.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Отпечатано в типографии издательства:
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

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

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: http://journals.spbstu.ru.

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:
(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович) или по e-mail: **ntv-nauka@spbstu.ru**