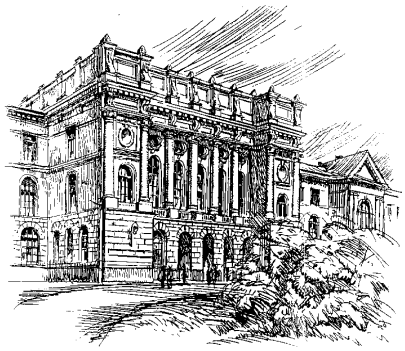
2-1(147)/2012



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

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

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

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

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте http://www.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 серии (812) 294-47-72.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012

Содержание

Фридлянов В.Н., Ерохин В.А., Козырев С.В., Кораблев В.В. *О совершенствовании форм поддержки научных исследований в России и Европейском союзе* 9

Энергетика

Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Попов В.Е., Попов С.Д., Суров А.В. *Возобновляемые источники энергии на основе плазменных процессов* 19

Галышев Ю.В., Зайцев А.Б., Варулин П.А. *Расчетное исследование применения двухфазной характеристики подачи топлива для улучшения показателей автотракторного дизеля* 38

Лапшин К.Л. *Дополнительная мощность турбины, получаемая за счет применения диффузора за последней ступенью* 45

Лисянский А.С., Рассохин В.А., Семакина Е.Ю., Черников В.А. *Оптимизация выходного патрубка ЦНД мощной паровой турбины на базе экспериментальных исследований* 48

Бодров А.И., Вохмянин С.М., Богов И.А., Поршнев Г.П., Стельмакова Н.О. *Влияние конструкции соединения воздуховода с патрубком компрессора ГТЭ-160 на структуру потока и работу системы промывки* 57

Адалев А.С., Булгаков С.А., Кибардин А.С., Кучинский В.Г., Сойкин В.Ф. *Особенности конструкции высокооборотных электрических машин с постоянными магнитами* 64

Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Метелев А.А. *Методика ускоренных испытаний моторных масел на изменение их свойств в течение срока эксплуатации* 71

Васильев Ю.С., Сидоренко Г.И., Фролов В.В. *Методика обоснования параметров малых гидроэлектростанций* 76

Толмачев В.В., Богов И.А. *Экспериментальные исследования вихревого запально-стабилизирующего горелочного модуля для турбоустановок* 85

Аникина И.Д., Поршнев Г.П., Сергеев В.В. *Тепловизионное обследование зданий* 94

Адалев А.С., Кучинский В.Г., Мазилкина Н.С., Попков Е.Н., Фильчков А.И., Чайка В.М. *Отключение межфазных коротких замыканий мощной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов* 98

Ивашинцов Д.А., Иванова Т.В. *Общие вопросы взаимодействия гидроэнергетических объектов и природно-технической системы* 102

Алешина А.С., Поршнев Г.П., Скулкин С.В. *Энергоэффективный менеджмент в промышленности* ... 106

Машиностроение

Панкратов Ю.М. *Автоматизированное проектирование зуборезных долбяков* 111

Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. *Применение комплекса LS-DYNA для расчета канала разряда при электрогидроимпульсной штамповке* 116

Лавровский С.К., Ходак В.В. *Конструкторско-технологическая подготовка машиностроительного предприятия на основе концепции PLM* 121

Коротких М.Т., Ушомирская Л.А., Кириллов Н.Б. *Эффективность технологических процессов изготовления различных деталей с использованием электроконтактно-дугового метода* 124

Мамутов А.В., Мамутов В.С. *Расчеты процессов штамповки подвижными средами при помощи комплекса LS-DYNA* 127

Алексеев Г.А. *Обеспечение качества процесса образования прецизионного регулярного микрорельефа* 131

Манжула К.П. *Взаимосвязь твердости с пределом выносливости металла зоны термического влияния сварного соединения строительной стали* 137

Панкратов Ю.М. *Унификация профилирования обкатных инструментов* 142

Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. *Применение полугорячей деформационно-термической штамповки поковок* 149

Мамутов В.С. *Измерение давления в процессах электрогидроимпульсной штамповки* 152

Физика

Воробьева Т.В., Мелькер А.И., Старовойтов С.А. *Теплота, температура, энтропия* 157

Горобей Н.Н., Лукьяненко А.С. *К вероятностной интерпретации релятивистской квантовой механики* 169

Пальмов В.А. *К двухсотлетию формулы Коши* 175

Воробьева Т.В., Мелькер А.И., Старовойтов С.А. *Информация, энтропия, температура* 182

Электротехника

Сидельников Б.В., Беляев М.А., Суворов И.Л. *Частотное регулирование асинхронного двигателя с целью получения максимального коэффициента полезного действия* 197

Дмитриев М.В., Кияткина М.Р. *Транспозиция экранов кабелей* 202

Кривошеев С.И., Помазов В.С., Шнеерсон Г.А. *Особенности электрического взрыва скин-слоя и формирования ударной волны в мегагаусных магнитных полях* 206

Металлургия и материаловедение

Мертенс К.К., Кузнецов П А. *Исследование физико-механических свойств порошков при импульсном нагружении* 212

Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. *Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки* 217

Кривошеев С.И., Сластенко В.К. *Особенности процесса разрушения при импульсном нагружении* 228

Мертенс К.К., Кузнецов П.А. *Экспериментальное исследование процессов комбинированного электрогидроимпульсного прессования порошков* 234

Природопользование

Масликов В.И., Чусов А.Н., Черемисин А.В., Рыжакова М.Г. *Оценка геоэкологического риска загрязнения атмосферы выбросами полигонов ТБО для выбора мероприятий по рекультивации* 239

Балагула Ю.М., Боронин В.Н., Коровкин Н.В. *Регистрация двигательной активности живых организмов для решения задач электромагнитной экологии* 243

Филимонов А.А. *Корреляционный анализ глобальной сети ботанических садов* 247

Уманец В.Н. *Геоэкологические исследования в области строительства и ЖКХ. История, современное состояние и перспективы* 254

Масликов В.И., Чусов А.Н., Молодцов Д.В., Рыжакова М.Г. *Зональное определение эмиссий биогаза на полигоне ТБО для оценки геоэкологического состояния и обоснования управления процессами разложения отходов при рекультивации* 260

Строительство

Тархов Д.А., Васильев А.Н., Идрисова Д.И. *Нейросетевое моделирование системы мониторинга загрязнений атмосферы и обеспечения безопасных условий труда в строительстве* 266

Тархов Д.А., Васильев А.Н., Тарабанов В.Н., Идрисова Д.И. *Применение нейросетевого моделирования для решения задач обеспечения безопасности труда на строительных машинах при работе в условиях вечной мерзлоты* 272

Моделирование. Математические методы

Никитков Н.В. *Математическая модель износа контактной поверхности зерен алмазных кругов при шлифовании твердых хрупких материалов* 278

Адалев А.С., Кучинский В.Г., Попков Е.Н., Фильчков А.И., Чайка В.М. *Имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов* 283

Качанова Т.Л., Фомин Б.Ф. *Физика открытых систем: генерация системного знания* 291

Агеев В.О., Арасланов А.В., Качанова Т.Л., Туральчук К.А., Фомин Б.Ф., Фомин О.Б. *Генерация системного знания по проблемам социальной напряженности в регионах России* 300

Вопросы психологии

Кругликов В.Н., Оленникова М.В. *Динамические характеристики мотивации и проблемы мотивирования* 309

Вопросы образования

Глухов В.В., Тисенко В.Н., Шадрин А.Д. *Применение стандартов менеджмента для повышения качества подготовки специалистов* 315

Горюнов В.П. *Гуманитарный стержень современного образования* 322

Носкова Т.Н., Павлова Т.Б. *Новые приоритеты педагогической деятельности в образовательной среде современного вуза* 329

Федин Д.В. *Методика прогнозирования и учебно-методическая работа — современный инструментарий управления образовательным процессом* 335

Кругликов В.Н. *Интерактивное обучение в высшей школе* 339

Иванова М.А. *Социологический портрет арабских студентов из стран Ближнего Востока* 346

Харзеева С.Э. *Понимание как когнитивный процесс и как характеристика знаний в компетентностной модели образования* 351

Сущенко В.П., Саракул А.Г., Лесничий В.В. *Теория целостной личности и психосоматическая медицина (Обзор клинико-психологических концепций)* 356

Сведения об авторах, контактные данные 364

Аннотации, ключевые слова 373

Contents

Fridlyanov V.N., Erokhin V.A., Kozyrev S.V., Korablev V V. *Improved forms of support for scientific research in Russia and the European union* 9

Energetics

Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Popov S.D., Surov A.V. *Renewable energy sources basing on plasma processes* 19

Galyshev J.V., Zaytsev A.B., Varulin P.A. *Calculations characteristics of two-phase fuel to improve performance automotive diesel* 38

Lapschin K.L. *Extra turbine power through the use of diffuser after the last stage* 45

Lisyanskii A.S., Rassokhin V.A., Semakina E.Yu., Chernikov V.A. *Optimization of the exhaust pipe of low-pressure cylinder powerful steam turbine based on experimental research* 48

Bodrov A.I., Vokhmyanin S.M., Bogov I.A., Porshnev G.P., Stelmakova N.O. *Analyses of the GTE-160 compressor suction inlet fastener design influence on the stream structure and on the compressor washing system* 57

Adalev A., Bulgakov S., Kibardin A., Kuchinsky V., Soikin V. *Design features of the high-speed electric machines with permanent magnets* 65

Galishev U.V., Shabanov A.U., Zaitsev A.B., Metelev A.A. *Method of accelerated testing of motor oil to change their properties during the term of use* 71

Vasiliev Ju.S., Sidorenko G.I., Frolov V.V. *The technique for a parameters substantiation of small power plants* 76

Tolmachov V.V., Bogov I.A. *Experimental study of vortex glow-stabilizing burners module for turbines* 89

Anikina I.D., Porshnev G.P., Sergeev V.V. *Heat monitoring of buildings* 94

Adalev A.S., Kuchinsky V. G., Mazilkina N. S., Popkov E. N., Filchkov A. I., Chaika V. M. *Breaking of interphase shorts in an electric machine with the permanents magnets excitation* 98

Ivashintsov D.A., Ivanova T.V. *General issues of cooperation between hydropower plants and natural-technical system* 102

Aleshina A.S., Porshnev G.P., Skulkin S.V. *Energy efficient management in industry* 106

Mechanical engineering

Pankratov Yu.M. *Automated design gear cutter* 111

Golovashchenko S.F. Mamutov A.V., Mamutov V.S. *Using LS-DYNA code for computer simulation of discharge channel at electrohydroimpulse stamping* 116

Lavrovsky S.K., Khodak V.V. *Design and technological preparation engineering company based on the concept of PLM* 121

Korotkikh M.T., Ushomirskaya L.A., Kirillov N.B. *Process of manufacturing efficiency of different parts of the use electrocontact-arc method* 124

Mamutov A.V., Mamutov V.S. *Computer simulation of metalforming by movable media using LS-DYNA code* 127

Alexeyev G.A. *Ensuring the quality of the formation of precise regular microrelief* 131

Manzhula K.P. *Relationship hardness and fatigue limit heat affected zone metal welds steel building* 137

Pankratov Yu.M. *Unification of profiling tools flow forming* 142

Radkevich M.M., Fomin D.U. *Applying of semihot deformation-thermal forging of steel pieces* 149

Mamutov V.S. *Measurement of pressure in processes of electrohydroimpulse stamping* 152

Physics

Vorobyeva T.V., Melker A.I., Starovoitov S.A. *Heat, temperature, entropy* 157

Gorobey N.N., Lukyanenko A.S. *On a probabilistic interpretation of relativistic quantum mechanics* 169

Palmov V.A. *Two hundred years aniversary of cauchy formulae* 175

Vorobyeva T.V., Melker A.I., Starovoitov S.A. *Information, entropy, temperature* 182

Electrical engineering

Sidelnikov B.V., Belyaev M.A., Suvorov I.L. *Frequency control of asynchronous motor in order to maximize efficiency* 197

Dmitriev M.V., Kiyatkina M.R. *Cable screen transposition* 202

Krivosheev S.I., Pomazov V.S., Shneerson G.A. *Distinctions of skin layer electric explosion and the shock wave forming in the multimegagauss magnetic field* 206

Metallurgy and materials technology

Mertens K.K., Kuznetcov P.A. *Investigation of physico-mechanical properties of powders under impact loading* 212

Orischenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. *Features of structural changes in heat-resistant alloy 45X26H33C2b2 at operating temperatures. Record 2: Effect of high-temperature exposure* 217

Krivosheev S.I., Slastenko V.K. *Features of process of fracture under dynamic loading* 228

Mertens K.K., Kuznetcov P.A. *Experimental investigation of the combined press powders elektrogidro-impulsnogo* 234

Nature Management

Maslikov V.I., Chusov A.N., Cheremsin A.V., Ryzhakova M. G. *Assessment of geo-ecological risk of atmosphere pollution by MSW landfills emissions for choice of measures for aftercare phase* 239

Balagula Yu., Boronin V., Korovkin N. *Registration of aquatic organisms motional activity for the problems of electromagnetic ecology* 243

Filimonov A.A. *Global botanic gardens network: correlation analysis* 247

Umanets V.N. *Geoecological research in the field of construction and housing. History, current status and prospects* 254

Maslikov V.I., Chusov A.N., Molodtsov D.V., Ryzhakova M.G. *The area-based determination of biogas emission from MSW landfill for the geoecological conditions assessment and substantiation of management of waste decomposition in the process of recultivation* 260

The construction

Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Idrisova D.I. *Neural network modeling of air pollution monitoring system and of securing safe working conditions in constructional industry* 266

Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Tarabanov V.N., Idrisova D.I. *Application of neural network modeling for securing safe working conditions at work by constructional equipment in permafrost zone* 272

Modeling. Mathematical Methods

Nikitkov N.V. *Mathematical model of deterioration of the contact surface of grains of diamond circles at grinding firm fragile materials* 278

Adalev A., Kuchinsky V., Popkov E., Filchkov A., Chaika V. *Simulation model of a six-phase converter driven electric machine excited with permanent magnets* 283

Kachanova T.L., Fomin, B.F. *Physics of open systems: generation of system knowledge* 291

Ageev V.O., Araslanov A.V., Kachanova T.L., Turalchuk K.A., Fomin, B.F., Fomin O.B. *Generation of system knowledge on the problems of social tension in russia's regions* 300

Questions of psychology

Kruglikov V.N, Olennikova M.V. *Dynamic characteristics of motivation and motivation problems* 309

Educational issues

Glukhov V.V., Tisenko V.N., Shadrin A.D. *Application of standards of management for improvement of quality of specialist's training* 315

Goryunov V.P. Humanities core of modern education 322

Noskova T.N., Pavlova T.B. *New priorities in pedagogical activity in the educational environment of modern higher education* 329

Fedin D.V. *The educational and methodical work as modern tools of management of educational process* .. 335

Kruglikov V.N. *Interactive learning in higher education* 339

Ivanova M.A. A *Sociological portrait of arab students from the middle east* 346

Kharzeeva S.E. *Understanding as cognitive process and as knowledge description in competence educational model* 351

Sushchenko V.P., Sarakul A.G., Lesnichiy V.V. *Theory of the wholeperson and psychosomatic medicine* 356

About the authors, contact information 364

Abstracts, key words 373

УДК 00:001:004

В.Н. Фридлянов, В.А. Ерохин,
С.В. Козырев, В.В. Кораблев

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ФОРМ ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИИ И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ

Последние десятилетия явили миру перемены невиданных прежде масштабов, происшедшие в результате качественного прорыва в информационных технологиях и их широкого распространения в обществе. Учитывая глубину и размах технологических и социальных последствий компьютеризации и информатизации различных сфер общественной жизни и экономической деятельности, происходящие изменения нередко называют компьютерной, или информационной, революцией. В результате сегодня мы являемся свидетелями процесса формирования *информационного* общества, приходящего на смену постиндустриальному. Оно основывается на развитии науки, эффективных технологий, новом качестве человеческого капитала, изменении социальной структуры общества, более высоком уровне управления, более рациональном использовании ресурсов и на связанных с этими факторами новых возможностях в производстве, потреблении и снижении удельных затрат ресурсов на выпуск продукции и услуг. В совокупности эти обстоятельства дают новый синергетический эффект, обусловливающий формирование нового общества.

Своим названием понятие «информационное общество» обязано профессору Токийского технологического института Ю. Хаяши, чей термин был использован в появившихся практически одновременно — в Японии и США — работах Ф. Махлупа (1962) и Т. Умесао (1963). Теория информационного общества была развита такими известными авторами, как М. Порат [1], Й. Массуда [2], Т. Стоунер [3], Р. Кац [4], которые использовали для его обозначения такие термины, как «the knowledgeable society», «knowledge society» или «knowledge-value society». Начиная с 1992 года термин стал широко употребляться. Например, концепция «национальной глобальной информационной инфраструктуры» стала популярной в США после известной конференции Национального научного фонда и знаменитого доклада Б. Клинтона и А. Гора. На настоящий момент понятия «информационное общество» и «общество знания» прочно вошли в лексикон современных социологов, политических деятелей и экономистов.

Естественный процесс в ходе формирования информационного общества — это увеличение роли фундаментальной науки. Аналитические исследования (см., например [5, 6] и ссылки, приведенные в этих работах) показывают, что большинство радикальных инноваций в настоящее время основывается на результатах фундаментальных исследований, полученных 30–40 лет назад. О повышении «наукоемкости» современного общества можно судить, в частности, по числу научных публикаций, лежащих в основе патентов, регистрируемых Европейским патентным офисом (European Patent Office) и Патентным офисом США (US Patent and Tra-demark Office) [7]. Поэтому неудивительно, что проблеме эффективности поддержки фундаментальных научных исследований сегодня уделяется все большее внимание во всех развитых странах.

Финансирование фундаментальных научных исследований традиционно рассматривается

в рамках линейной инновационной модели [8], которая утверждает, что открытия в области фундаментальной науки ведут к прикладным исследованиям, а те, в свою очередь, — к созданию новых продуктов и услуг. Основные положения этой модели подтверждаются большим количеством фактов и не подвергаются сомнению. Однако использование данной модели в практической деятельности не всегда приводит к ожидаемым результатам. В частности, в последние десятилетия в европейском обществе получила распространение позиция, утверждающая, что линейная инновационная модель может оказаться неприменимой для отдельно взятой страны. Например, возможен сценарий, при котором результаты фундаментального исследования, полученные в рассматриваемой стране, воплощаются за ее пределами, и, таким образом, инвестиция «теряется». Соответственно, чем меньше экономика, тем больше риск такого сценария.

Как отмечено в статье [9] Ларса Валло, президента Европейской Академии, такая позиция стала популярной среди политического руководства европейских стран около двадцати лет назад, в результате чего баланс финансирования науки стал постепенно смещаться по направлению к концу инновационного процесса, т. е. в сторону прикладных наук. В результате такого смещения в последние годы все большую озабоченность в обществе стали вызывать потеря конкурентоспособности европейской наукой и «утечка мозгов» в США. Можно констатировать, что эти проблемы осознаны европейским политическим руководством. Свидетельством тому являются те структурные изменения, которые предпринимаются для устранения существующего дисбаланса между финансированием фундаментальной и прикладной наук. Анализ этих изменений и последних тенденций в структуре финансирования европейской науки — основная цель настоящей работы.

Следует отметить, что смещение баланса финансирования науки по направлению к концу инновационного процесса наблюдается сейчас и в России. Общими для России и ЕС являются также проблемы повышения эффективности финансирования, конкурентоспособности науки и утечки элитной прослойки научных кадров. В этой связи задачи изучения европейского опыта и адаптации его для российских условий представляются особенно актуальными.

Состояние науки в ЕС и РФ

В последнее время большую озабоченность европейской общественности вызывает утечка высококвалифицированных ученых за пределы ЕС (главным образом, в США), намечающаяся потеря конкурентоспособности европейской науки по сравнению с США и сокращающийся разрыв с азиатскими странами [10,11]. Обратимся к цифрам: совокупность пятнадцати европейских стран (EU-15) несколько превосходит США по общему числу публикаций (по данным за 2003 год EU-15 произвел 37 % мирового объема публикаций, а США — 31 % [5]. Для сравнения: РФ — 2,3 %, Китай — 4,2 % [12]). Тем не менее США превосходят ЕС по общему числу цитирований (что отражает общий эффект исследований и их влияние на состояние науки) и по среднему числу цитирований на одну публикацию (отражает эффект исследований в расчете на одну публикацию) [5]. Помимо этого, США идут впереди по числу публикаций в ряде ключевых направлениий: физике, медицине, химии, науках о жизни. Еще менее выигрышная для Европы картина получается при анализе выдающихся исследований, оказавших большое влияние на современную науку. Анализ 1 % публикаций, имеющих максимальное число цитирований, показывает, что США лидирует практически во всех областях [5]. Процент высокоцитируемых исследований в США оказывается непропорционально большим по сравнению с долей в общем числе публикаций. В итоге США принадлежит треть мировых публикаций, которые получают половину от общего числа мировых цитирований и представляют собой две трети от общего числа выдающихся исследований [5]. Приведенная статистика показывает, что обеспокоенность состоянием европейской науки — обоснованна.

Наиболее часто называемые проблемы европейской системы организации и поддержки науки:

недостаточный уровень финансирования. Так, за 2001 год инвестиции в научные исследо-

вания и разработки (R&D) составили в ЕС-15 — 175 млрд евро (1,84 % ВВП), в США — 315 млрд евро (2,67 % ВВП), в Японии — 143 млрд евро (3,17 % ВВП) [6]. Годовой бюджет Европейского исследовательского совета составляет 1,1 млрд евро, что в 4 раза меньше бюджета Национального научного фонда (National Science Foundation) США (4,4 млрд евро) и в 17 раз меньше бюджета Национального института здоровья (National Institute of Health) США (17,3 млрд евро);

раздробленность усилий и недостаточная эффективность управления наукой. Система организации и уровень финансовой поддержки сильно отличаются в различных странах ЕС, что препятствует свободному перемещению ученых внутри ЕС;

сложность получения постоянной позиции для талантливых молодых ученых. Отсутствие прозрачного механизма роста молодых ученых от момента защиты кандидатской диссертации (PhD) до независимой профессорской позиции. Отсутствие в Европе аналога американской «tenure track» практики (что условно может быть переведено как «академическая позиция с испытательным сроком»: при занятии открытой академической позиции, которая в перспективе является постоянной («tenure»), деятельность ее держателя в течение нескольких лет подвергается независимой экспертной оценке).

Общее состояние науки в РФ вызывает серьезные опасения независимых наблюдателей [13–15]. Неадекватное финансирование и структурные реорганизации в 1990-х годах привели к оттоку наиболее конкурентоспособной части российских ученых за рубеж. По официальной статистике в период с 1991-го по 2002 год Россию покинуло от 0,5 до 0,8 млн ученых и программистов [15]. Результативность российской науки падает. Так, в 1993 году Россия выпускала 3,6 % от общего числа мировых публикаций, в 1998 году — 2,9 %, в 2003 году — 2,3 % [12]. Для сравнения показатели некоторых развивающихся стран за 2003 год: Китай — 4,2 %, Индия — 1,8 %, Тайвань — 1,3 %, Бразилия — 1,2 % [12]. За период 2004–2008 годов России принадлежит 2,6 % мировых публикаций, что меньше, чем у Индии (2,9 %), и в три раза меньше, чем у Китая (8,4 %) [16]. Показательный пример: ежегодный отчет правительства Великобритании по сравнительному анализу показателей научной производительности страны традиционно содержал сравнение с Россией как членом группы G8. В 2008 году, Россия исчезла с графиков отчета и была заменена Китаем [16]. Заключение аналитического отчета [16] содержит вывод: «Российская наука испытывает трудности и не демонстрирует признаков их разрешения». К похожим заключениям приходят и многие отечественные библиографические исследования. В частности, в работе [17] отмечается, что в 2003 году российские научные публикации получили всего 0,76 % мировых цитирований, меньше, чем Китай (1,55 %) и Корея (1,18 %), и чуть больше, чем Индия (0,75 %).

Между тем, было бы неправильно утверждать, что в России не осталось конкурентоспособных ученых. Проект «Кто есть кто в российской науке» [17] выявил 1723 ученых с общим индексом цитируемости более 1000, который является весьма высоким показателем на мировом рынке науки. (Отметим, однако, что не все ученые, входящие в список, могут считаться действительно российскими, так как критерием отбора была принадлежность российскому институту, указанная в статье. Такая принадлежность в ряде случаев оказывается чисто формальной.) Многолетний личный опыт общения с зарубежными коллегами свидетельствует о том, что престиж российской науки достаточно велик, прежде всего в тех областях, в которых Россия традиционно была сильна: физике, математике. Под российской наукой в данном случае следует понимать: а) российскую научную диаспору, проживающую за рубежом (при взгляде снаружи она ассоциируется с российской наукой) и б) конкурентоспособную часть российских ученых, регулярно выезжающих за рубеж и имеющих тесные контакты с западными коллегами.

Кратко сформулируем основные проблемы системы организации российской науки (по материалам российской прессы и нашему мнению):

непрозрачность системы распределения финансирования, неразвитость грантовой системы финансирования, низкое качество экспертной оценки, невовлеченность ученых в систему управления наукой;

возрастная и кадровая проблема. Высокий средний возраст ученых, «разрыв поколений»,

прекращение воспроизводства кадров, отток молодых ученых за рубеж, невозвращение молодых ученых из-за рубежа;

отсутствие системы поощрения и поддержки конкурентоспособной части ученых. По многочисленным признаниям российских ученых мирового уровня, для них получать финансирование за рубежом оказывается проще, чем в России. Таким образом, происходит процесс «выдавливания» за рубеж конкурентоспособной части российской науки;

неэффективность функционирования системы РАН: превращение РАН из научного в административно-хозяйственный механизм, уменьшение числа активно действующих ученых среди членов РАН.

Европейский исследовательский совет

Одной из наиболее заметных попыток решения стоящих перед европейской наукой проблем стало создание в 2007 году Европейского исследовательского совета (ЕИС), European Research Council (ERC). Поддержка научных исследований, осуществляемая ЕИС, реализуется в виде грантов направления «ИДЕИ» Седьмой рамочной программы ЕС. ЕИС — организация нового типа для Евросоюза, что отмечают ряд независимых наблюдателей, в частности [19, 20]. Сформулируем основные принципы и задачи ЕИС:

Это независимая финансирующая организация, управляемая учеными (управляющий орган — совет, состоящий из ученых с мировым именем).

Отбор заявок производится независимыми экспертами по максимально прозрачной схеме и исключительно по научным критериям. Последний пункт здесь очень важен, поскольку он подразумевает дистанционирование от любых политически мотивированных критериев, в частности от широко применяемого на европейском пространстве принципа «juste retour» <«справедливая отдача» — франц.>, согласно которому каждая страна получает от общеевропейских программ сообразно собственному финансовому вкладу. Важно также отметить минимальное количество формальных требований, которым должен удовлетворять получатель гранта, — весь отбор производится на конкурсной основе (конкурс очень велик, 10–30 заявок на место).

Поддерживаются все направления исследований без разделения на фундаментальные и прикладные, естественные и гуманитарные (что является новым по сравнению с традиционными рамочными программами Евросоюза, ориентированными в основном на прикладные исследования). При этом акцент делается на прорывной характер исследований — поддержанные заявки должны обещать «фундаментальный прогресс» в выбранной области знания. Тема же исследования предлагается заявителем. Таким образом, поддерживаются исследования не по принципу принадлежности к определенным направлениям или областям знания, а по принципу их конкурентоспособности на мировом рынке знания.

Получателем грантов является один конкретный ученый — руководитель исследования (в то время как рамочные программы ЕС поддерживают главным образом большие коллаборации).

Сравнительно небольшое количество (порядка 500 в год) крупных грантов (обычно 1–2, максимум — 3,5 млн евро на период до 5 лет) призвано повысить привлекательность европейского научного пространства для интеллектуальной элиты мирового научного сообщества. Большой конкурс (10–30 заявок на место) и большой размер гранта призваны сделать его получение престижным («маленькая нобелевская премия») и повысить уровень признания лауреата в мировом научном сообществе.

Отдельный вид грантов предназначен специально для молодых ученых. Он призван оказать поддержку молодым талантливым исследователям (интеллектуальная элита следующего поколения) и предоставить им возможность для обретения самостоятельности (создания своей научной группы/лаборатории). Престижность получаемого гранта позволит повысить шансы лауреатов на получение поддержки из других источников и закрепление полученной независимости.

Одна из центральных задач ЕИС — это борьба за выдающиеся таланты в мировом научном сообществе. Историками и социологами науки давно признан такой факт: в то время как мировое научное сообщество весьма велико, сравнительно небольшой процент ученых производит непропорционально большую часть научных

публикаций. Этот эффект был впервые продемонстрирован в 1926 году Альфредом Лоткой [21] и известен как «закон Лотки» (Lotka's law). Выдающиеся исследования, оказывающие большое влияние на мировую науку, распределены еще более диспропорционально и производятся сравнительно небольшим кругом мировой научной элиты. Как показывает опыт, в частности опыт зарождения биотехнологического сектора в США, такие «звезды» научного сообщества часто играют ведущую роль во внедрении прорывных научных исследований, основывая новые компании и разрабатывая принципиально новые продукты [22]. Согласно анализу Европейского экспертного совета [7] борьба за выдающиеся таланты на мировом научном рынке, уже и сегодня весьма острая, будет только усиливаться по мере того, как общество вступает во все более наукоемкую индустриальную фазу.

Следует отметить, что представляющаяся на первый взгляд логичной идея отсечь малопродуктивный «хвост» научного сообщества и оставить только его сравнительно небольшой «пик» обречена на провал. Закон Лотки устанавливает также соотношение между размерами «хвоста» и «пика» в распределении научных результатов в научном сообществе. Это можно визуализировать, представляя распределение в виде своего рода пирамиды, где небольшая верхушка поддерживается гораздо более массивным основанием.

Концепция ЕИС концентрируется вокруг понятия «прорывные исследования» («frontier research»), поэтому важно понять, что именно под этим понимается. Термин «прорывные исследования» не поддается четкому формальному определению и поэтому нередко употребляется в существенно различных смыслах. В российской прессе этот термин зачастую используется в паре с «инновационными исследованиями»; в этом случае «прорыв» имеется в виду в сторону практической реализации и скорейшей окупаемости. В концепции ЕИС [7] термин «прорывные исследования» используется на месте традиционных понятий «фундаментальные» и «прикладные» исследования. (Предполагается, что в современной науке с ее стремительным размыванием междисциплинарных границ разделение на фундаментальные и прикладные исследования теряет свою актуальность.) Основным признаком прорывных исследований становится «фундаментальный прогресс в знании или понимании мира» без каких-либо ограничений на область знания или направление исследований. Выбор темы и направления исследований остается за ученым, направляющим заявку на конкурс («bottom-up approach», «подход снизу вверх»). Отбор, какие именно из общей массы исследований обеспечивают искомый «фундаментальный прогресс», делается в ходе независимой экспертной оценки («peer review»).

Зачастую поддержку прорывных исследований предлагается производить в рамках во многом противоположной концепции («сверху вниз») путем формулирования списка приоритетных направлений развития и усиленного финансирования исследований по этим направлениям. Основным аргументом в пользу такой политики служит то, что концентрация средств на небольшом числе перспективных направлений позволит получить максимальную отдачу в относительно короткой перспективе. Подобный опыт таргетирования отдельных узких направлений науки существует в рамочных программах ЕС, аналогичная практика получает все большее распространение в РФ.

Следует отметить, однако, важное обстоятельство, которое, на наш взгляд, не всегда должным образом принимается во внимание. Ощутимая отдача от интенсивного финансирования отдельного направления в рамках отдельной страны может быть *только* в том случае, когда в национальном научном сообществе имеется необходимый задел, или, говоря более конкретно, существует достаточное количество научных коллективов (группы, лаборатории, отдельные исследователи), работающих в этой области на мировом уровне. В противном случае инвестиция почти наверняка будут потеряна. Специфика науки, особенно фундаментальной, такова, что отставание от мирового уровня практически невозможно ликвидировать в короткие сроки. Устранение отставания — это сложный, долгий и малопредсказуемый процесс, исход которого неочевиден даже при наличии адекватного (и более чем адекватного) финансирования. Это можно наблюдать сейчас на примере Китая и Индии, где инвестиции в науку присутствуют

на протяжении уже ряда лет, но процесс создания самостоятельных научных коллективов, работающих на мировом уровне, находится в самом начале.

Обозначенное выше условие — наличие задела — практически всегда выполняется на общеевропейском рынке науки. Научная конкуренция на общеевропейском пространстве достаточно высока и научное сообщество весьма однородно, т. е. нет серьезного отставания от общемирового уровня ни в каких значимых направлениях науки. В случае же России тяжелые потери, понесенные российским научным сообществом за последние два десятилетия, сделали национальный научный рынок весьма неоднородным. В то время как существует некоторое количество активно работающих ученых, весьма востребованных на мировом рынке труда и производящих результаты выше среднемирового уровня, большее количество занятых в сфере российской науки конкурентоспособными на мировом уровне не являются. В этой связи представляется целесообразным производить поддержку российской науки по принципу «снизу-вверх», выявляя потенциальные «точки роста» — направления, в которых позиции российской науки наиболее сильны, наиболее активно работающие научные группы и лаборатории — и усиленно поддерживать их. Выявление конкурентоспособной части российских ученых следует производить в рамках максимально прозрачной независимой экспертизы, с привлечением российской зарубежной диаспоры, с учетом формальных количественных показателей (количество публикаций в высокоимпактных международных журналах, индекс цитирования, индекс Хирша).

Грант для выдающихся ученых в РФ

Единственной инициативой на российском пространстве, сравнимой по целям и размаху с деятельностью ЕИС, является грант для выдающихся ученых, объявленный Минобрнауки РФ в 2010 и 2011 годах. Как и гранты ЕИС, грант для выдающихся ученых ориентирован на привлечение в страну мировой научной элиты. Заявленный размер гранта (до 3,5 млн евро на срок до 2 лет) примерно соответствует максимальному размеру грантов ЕИС (3,5 млн евро на срок до 5 лет). Те и другие гранты ориентированы на научные группы, возглавляемые одним руководителем — получателем гранта. В обоих случаях поддерживаются научные исследования в широком спектре наук. (У ЕИС ограничений на область науки нет вообще, а в российском гранте список поддерживаемых наук есть, но весьма широкий.) Параллели между этими грантами очевидны. Даже отношение количества заявок к поддержанным проектам примерно одинаково (порядка 10 заявок на место).

Но есть и некоторые отличия, на которых стоит остановиться. Во-первых, ЕИС предоставляет отдельный грант для выдающихся молодых ученых, в то время как в российском гранте нет разделения по возрасту. Во-вторых, российский грант предусматривает выполнение ряда формальных требований, аналога которых нет у ЕИС: а) предыдущее место работы получателя гранта и вуз, в котором выполняется работа по гранту, должны находиться в разных субъектах федерации; б) научный коллектив, формируемый получателем гранта, должен содержать не менее 2 кандидатов наук, 3 аспирантов и 3 студентов; одним из самых важных критериев конкурсного отбора в российском гранте являются перспективы воплощения проекта в технологии и его внедрения в промышленное производство (для грантов ЕИС данный параметр не служит критерием отбора).

Об индексе цитирования и других формальных показателях

В последнее время в западной науке для оценки результативности научной деятельности все большее значение приобретают формальные показатели, самый распространенный из которых — индекс цитирования. Индекс цитирования[1] статьи — это суммарное количество ссылок на эту статью в рецензируемых научных журна-

[1]Следует отметить перекрывание терминов: в библиографии под индексом цитирования понимается база данных, содержащая библиографическую информацию, в то время как в широких научных кругах индексом цитирования называют общее число цитирований. Подобное перекрывание существует также в английском языке, где термином citation index могут называть оба этих понятия в зависимости от контекста.

лах и изданиях. Индекс цитирования ученого — это суммарное количество цитирований на все его (ее) публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях. Индекс цитирования публикации оценивает влияние, оказанное ею на мировую науку. Следует подчеркнуть, что это не то же самое, что научная ценность публикации. Приведем несколько иллюстративных примеров: а) статья непонятого гения (научная ценность велика, индекс цитирования 0, влияние на науку 0); б) статья признанного гения (научная ценность велика, индекс цитирования велик, влияние на науку велико), в) неправильная статья, опубликованная в высокоимпактном журнале, например Nature (научная ценность отрицательная, индекс цитирования большой, влияние на науку существенное, хотя и неоднозначное). Индекс цитирования ученого характеризует его (ее) интегрированность в мировой научный процесс и степень влияния на него.

Нельзя не отметить аналогию между индексом цитирования научных публикаций и патентованным корпорацией Google алгоритмом PageRank для поиска в интернете, который использует индексацию интернет-ресурса в соответствии с количеством «цитирований», полученным им со стороны других ресурсов. Этот и аналогичные ему алгоритмы в настоящее время служат основным методом поиска информации в интернете.

Наличие корреляции между величиной индекса цитирования научных публикаций и степенью их влияния на мировой научный процесс сомнению не подлежит. Однако количественное выражение этого влияния (какой индекс цитирования считать «большим», а какой «малым») может сильно варьироваться в зависимости от науки и от конкретной области в рамках данной науки. В тех науках (областях науки), где научное сообщество больше, выше и характерные индексы цитирования; а также количество высокоимпактных журналов (примерами больших научных сообществ могут служить физика высоких энергий, медицина). Различается и динамика «набора» статьями индекса цитирований: в крупных сообществах большинство публикаций после сравнительно небольшого периода времени забываются и перестают цитироваться и только очень небольшая часть «попадает в струю», оказывается замеченной и получает очень большое количество цитирований. В малых сообществах максимальные индексы цитирования гораздо меньше, но зато статьи продолжают цитироваться в течение многих лет. Нельзя также забывать о том, что интеграция в мировой научный процесс — в разной степени обязательное условие в различных областях науки. Например, проводить исследования в области физики высоких энергий в отрыве от мировой науки сегодня нельзя, а вот в некоторых областях геологии обособление научного процесса по географическому принципу зачастую имеет место. Таким образом, использование индекса цитирования ученого для характеристики результативности его научной деятельности возможно только с учетом области науки, в которой выполняются исследования.

Важным формальным параметром, все более широко используемым в системе зарубежной науки для оценки научной результативности ученого, является индекс Хирша, или h-индекс [23]. Индекс Хирша равный, скажем, 10 означает, что у ученого 10 публикаций, каждая из которых имеет 10 или больше цитирований. Приведем несколько примеров:

а) у ученого 100 публикаций, каждая из которых процитирована 1 раз; индекс цитирования равен 100, а индекс Хирша $h = 1$;

б) у ученого 100 публикаций, 99 из которых процитированы 1 раз, а одна — 100; индекс цитирования — 199, а индекс Хирша $h = 1$;

в) у ученого 2 публикации, каждая из которых процитирована по 2 раза; индекс цитирования равен 4, а индекс Хирша $h = 2$.

Таким образом, индекс Хирша выделяет только те публикации исследователя, которые оказали максимальное влияние на последующие работы, отсекая ситуации, когда: а) у ученого большое количество малоцитируемых публикаций; б) у ученого одна или несколько очень высокоцитируемых публикаций (такое часто случается, когда статья большого коллектива авторов публикуется в высокоимпактном журнале — тогда каждый автор получает количество цитирований, которое может намного превышать его личный вклад в публикацию).

Хирш считает, что в физике (в реалиях США) h-индекс, равный 10–12, может служить одним

из определяющих факторов для решения о предоставлении исследователю постоянной позиции в крупном исследовательском университете; уровень исследователя с h-индексом, равным 15–20, может соответствовать членству в Американском физическом обществе; индекс 45 и выше может отвечать членству в Национальной академии наук США. В реалиях современной Германии в теоретической физике индекс Хирша $h = 18–25$ соответствует полной профессорской позиции.

Лидером на рынке предоставления библиографической информации для вычисления индекса цитирования и индекса Хирша является Институт научной информации (ISI) (теперь он часть компании Thomson Reuters). Информация предоставляется через коммерческий веб-сервис «ISI Web of Knowledge» (http://www.isiwebofknowledge.com/). Практически вся официальная информация о публикациях и цитированиях в аналитических обзорах Европейской комиссии и Национального научного фонда США дается с ссылкой на Thomson Reuters. Европейский конкурент Thomson Reuters — библиографическая система Scopus (также коммерческая), публикуемая издательством Elsevier (http://www.scopus.com/home.url). Существует также российский библиографический проект, предоставляющий информацию об индексах цитирования (http://elibrary.ru/). Информация, полученная с его помощью, используется для конкурсного отбора в некоторых российских грантах. Следует отметить, однако, что эта информация далеко не всегда оказывается достаточно полной. Сравнение с данными ISI, выполненное нами для ряда российских ученых, входящих в список «Более 1000 цитирований по ISI» [18], выявило, что полнота данных по общему индексу цитирования российского сервиса на сайте http://elibrary.ru/ зачастую не превышает 20 %, а в отдельных случаях — 2 %. Индексирование цитирований научных публикаций предоставляется также бесплатным сервисом Google Scholar (http://scholar.google.com/; http://code.google.com/p/citations-gadget/), однако это сервис не делает различий между ссылками из рецензируемых журналов и интернет-публикаций.

Другим важным формальным показателем научной результативности, используемым в европейской системе организации науки, служит количество публикаций в престижных журналах с высоким импакт-фактором. Импакт-фактор журнала определяется как среднее количество цитирований, получаемых опубликованными в нем статьями, в расчете на одну статью. Какой именно импакт-фактор считать высоким, а журнал престижным — сильно зависит от области науки. В физике, например, престижным и высокоимпактным журналом является Physical Review Letters (импакт-фактор 7,3), в биологии — Cell (31,1), в медицине — New England Journal of Medicine (47,1). Различие между импакт-факторами этих журналов во многом обусловлено различным размером научных сообществ и отличающейся практикой цитирований в разных областях науки. Есть издания, специализирующиеся на публикации не оригинальных исследований, а обзоров; импакт-фактор таких журналов, как правило, существенно выше (например, Reviews of Modern Physics с импакт-фактором 33,1). Факт публикации ученым в журнале с высоким импакт-фактором показателен, поскольку означает, что статья прошла весьма строгий отбор. Дело в том, что такие журналы, будучи весьма престижными, получают на рассмотрение гораздо больше статей, чем публикуют, и, таким образом, имеют возможность отбирать только те статьи, которые, по их мнению, имеют шанс получать больше цитирований, чем в среднем по журналу. Журналы, не входящие в эту нечетко определенную категорию высокоимпактных журналов, не получают на рассмотрение достаточно большого количества статей и поэтому вынуждены ограничиться гораздо более «мягким» отбором. В качестве иллюстрации: статьи, публикуемые в Physical Review A (импакт-фактор 2,9), проходят гораздо менее строгий отбор, чем в Physical Review Letters (7,3), хотя их импакт-фактор отличается не так уж сильно от, например, Cell (31,1).

Резюмируя сказанное о формальных критериях оценки научной результативности, следует отметить следующее. Адекватная оценка *научной ценности* проведенных исследований — весьма непростой и трудозатратный процесс; она может быть достигнута только путем независимой экспертной оценки, частыми побочными эффектами которой являются субъектив-

ность, предвзятость и некомпетентность. Мировая практика показывает, что с этими побочными эффектами можно успешно бороться и достигать высокого уровня объективности процесса рецензирования, но это — очень непростая задача. По контрасту, скажем, оценка таких критериев, как *конкурентоспособность* на мировом научном рынке, *интегрированность* в мировой научный процесс, *влияние* на мировую науку, — гораздо более проста. Большую помощь в объективной оценке таких параметров оказывают рассмотренные формальные критерии.

В статье мы представили анализ последних тенденций в области поддержки фундаментальных исследований в европейской науке. Изложенные факты позволяют заключить, что за последние годы на европейском пространстве достигнуты серьезные системные изменения в принципах и механизмах финансирования науки. Большое внимание стало уделяться проблемам привлечения и удержания элитной прослойки мирового научного сообщества и поддержанию конкурентоспособности передового края европейской фундаментальной науки. Делать выводы, насколько результативны данные нововведения, пока преждевременно. Тем не менее масштаб преобразований, а также то, что они проводятся с активным участием ученых с мировым именем, позволяют ожидать укрепления позиций передовой европейской науки в ближайшем будущем.

Авторы статьи выражают благодарность Исполнительной дирекции Европейского исследовательского совета за предоставленные материалы. Работа соавторов статьи из СПбГПУ по изучению мирового опыта поиска и поддержки ключевых прорывных направлений современной науки поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ 10-06-00521-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Porat, M.** The Information Economy: Development and Measurement [Текст] / M. Porat, M. Rubin.— Wash., 1978.

2. **Masuda, Y.** The information Society as Post-Industial Society [Текст] / Y. Masuda.— Wash., 1981.

3. **Stonier, T.** The Wealf of Information [Текст] / T. Stonier.— L., 1983.

4. **Katz, R.L.** The Information Society: An International Perspective [Текст] / R.L. Katz.— N.Y., 1988.

5. Third European Report on Science & Technology Indicators, Towards a Knowledge-based Economy [Электрон. ресурс] / European Commission.— 2003.— http://cordis.europa.eu/indicators/third_report.htm.

6. Europe and Basic Research [Электрон. ресурс] / European Commission.— 2004.— http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2004:0009:FIN:EN:PDF.

7. Frontier Research: The European Challenge [Электрон. ресурс] / European Commission.— 2005.— High-Level Expert Group Report http://ec.europa.eu/research/future/pdf/hleg_fullreport_frontier_research_april2005.pdf

8. **Williams, R.** The Social Shaping of Technology [Текст] / R. Williams, Edge David.— Research Policy. 1996. Vol. **25**. — P. 856–899.

9. **Wallше, L.** The European Research Council — the key to consolidating European science [Текст] / L. Wallше.— 2010.— Paper presented at the ISE Conference »ERC — From Programme to Institution«.

10. How To Plug Europe's Brain Drain [Электрон. ресурс] / Time Europe.— 2004.— J. Chu, January 11. — http://www.time.com/time/europe/html/040119/brain/story.html.

11. Europe's Brain Gain [Электрон. ресурс] / G. Sinha, Science Careers.— 2007. March 02.— http://sciencecareers.sciencemag.org/career_magazine/previous_issues/articles/2007_03_02/science.opms.r0700028.

12. Brazil, China, India, Russia, and Taiwan Lead S&E Article Output of Non-OECD Countries [Электрон. ресурс] / D. Hill.— National Science Foundation.— 2007. — http://www.nsf.gov/statistics/infbrief/nsf07328/nsf07328.pdf.

13. Scientific glasnost [Текст] / Nature.— 2010. — Vol. 464, P. 141–142 (11 March 2010).

14. Ведомости (2009), Фундаментальная наука: Почему мы утекли [Текст]: Открытое письмо ученых российской зарубежной диаспоры / 02.10.2009. — http://www.vedomo sti.ru/newspaper/article/2009/10/02/215251.

15. Russian brain drain tops half a million [Электрон. ресурс // BBC News.— 2002.— 20 June 2002.— http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/2055571.stm.

16. The new geography of science: Research and collaboration in Russia [Электрон. ресурс] / Thompson Reuters.— 2010.— Global research report (January 2010).— http://researchanalytics.thomsonreuters.com/m/pdfs/grr-russia-jan10.pdf.

17. **Гохберг, Л.М.** Российская наука: библиографические индикаторы [Текст] / Л.М. Гохберг, Г.С. Сагиева // Форсайт.— 2007. N1, С. 44–53.

18. Проект «Кто есть кто в российской науке». Индексы цитирования работ российских ученых [Электрон. ресурс // http://expertcorps.ru/science/whoiswho.

19. Putting excellence at the heart of European research [Текст] / Nature Methods. — 2007. Vol. 40(4). P. 295.

20. The research revolution [Текст] / Nature.— 2008.— Vol. 453.— P. 975.

21. **Lotka, A.J.** The Frequency Distribution of Scientific Productivity [Текст] / A.J. Lotka // Journal of the Washington Academy of Sciences.— 1926.— Vol. 16.— P. 317–323.

22. **Zucker, L.G.** Present at the biotechnological revolution: transformation of technological identity for a large incumbent pharmaceutical firm [Текст] / L.G. Zucker, M.R. Darby // Research Policy.— 1997. — Vol. 26.— P. 429–446.

23. **Hirsch, J.E.** An index to quantify an individual's scientific research output [Электрон. ресурс] / J.E. Hirsch // Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America.— 2005.— Vol. 102, № 46.— http://www.pnas.org/content/102/46/16569.full.

УДК 66.011:533.9

Ф.Г. Рутберг, А.Н. Братцев, В.А. Кузнецов,
В.Е. Попов, С.Д. Попов, А.В. Суров

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В свете современных научных воззрений плазменная газификация биомассы считается одним из самых перспективных источников возобновляемой энергии. Благодаря повышенным температурам и вводу энергии этот метод позволяет значительно расширить спектр углеродосодержащего сырья, пригодного для производства энергии. В статье этот тезис доказывается на примере отходов птицеводства, а именно куриного помета, переработка которого представляет для птицеводов серьезную проблему. Для этого рассмотрены некоторые особенности процесса плазменной газификации в зависимости от организации материальных потоков сырья и плазмы с учетом характера их взаимодействия и влияния вида плазмообразующего газа. Вид плазмообразующего газа и его удельный расход, состав сингаза, а также их взаимосвязь с другими параметрами исследуются в приближении локального термодинамического равновесия. На основе такого рода данных в статье оценивается эффективность получения жидких топлив из рассматриваемого вида сырья. Ключевым элементом описываемой технологии являются генераторы плазмы — плазмотроны. Дан обзор электродуговых методов ввода энергии при газификации. Описаны конструктивные особенности и приведены эксплуатационные характеристики высокоэффективных генераторов плазмы переменного тока, использующих в качестве плазмообразующих сред воздух, водяной пар, диоксид углерода. Описываемая технология развивается повсеместно.

В статье приводится краткий обзор реализованных на данный момент пилотных и промышленных проектов. В России исследованием плазменной газификации занимаются в ИЭЭ РАН. Статья знакомит с экспериментальным стендом, созданным в институте, основным элементом которого является плазмохимический реактор сконструированный по обращенной схеме. Описаны его технические характеристики и функциональные возможности. Представлены методики проведения экспериментов по газификации биомассы воздушной плазмой и результаты, которые затем сравниваются с расчетными данными.

Описание проблемы

В современном мире снижение антропогенного воздействия на природу приобретает все большее значение. В частности, актуальна проблема выбросов диоксида углерода [1]. CO_2 — основной продукт сгорания углеводородов, который образуется при сжигании всех широко распространенных видов топлив, он обладает высокой излучательной способностью и является одним из основных (и наиболее опасных) парниковых газов [2]. В 2010 году глобальный объем выбросов диоксида углерода вырос примерно на 5,9 % и впервые превысил 9 Пг в год [3]. Причем увеличение выбросов в основном обусловлено экономическим ростом развивающихся экономик, в которых даже в период глобального экономического кризиса эмиссия CO_2 увеличивалась [3]. Экономический рост и увеличение уровня жизни населения неизменно приводят к росту удельного потребления энергии. По данным IEA [4] в 2009 году примерно 80,9 % энергетических потребностей человечества обеспечивалось за счет сжигания ископаемых топлив, ~5,8 % — ядерной энергией, ~2,3 % гидроэнергетикой, порядка 10,2 % — энергией биотоплив

и отходов, что в целом составило примерно 509 ЭДж. Мировой запас ископаемых топлив составляет ~35094 ЭДж, из них ~23,6 % — нефть, ~20,4 % — природный газ, ~56,0 % — уголь [5]. По оценкам [6] производство нефти достигнет своего максимума в 2020 году, угля — к 2030-му, газа — около 2040-го.

К сожалению, осознание не только важности, но и самого факта конечности ископаемых топлив происходит крайне медленно, даже среди людей, определяющих направления развития как на региональном, так и на мировом уровне. Сложившееся положение идеально иллюстрирует цитата: «экономисты свято верят и воспринимают как фундаментальную основу бесконечный рост» [7].

Наиболее перспективное решение этой проблемы — переход на возобновляемые источники энергии. По прогнозам [8] в 2050 году глобальный потенциал энергии биомассы составит 1135–1300 ЭДж (без учета использования водорослей в качестве биомассы), в то время как мировое потребление достигнет порядка 826 ЭДж (в среднем по разным сценариям). Энергетическое использование биомассы не приводит к увеличению выбросов CO_2, так как весь диоксид углерода, возникший после использования биоэнергии, поглощается зелеными растениями в ходе образования биомассы. Таким образом, ясно, что развитие биоэнергетики — один из самых перспективных способов формирования стабильной и самостоятельной экономической структуры как для развитых, так и для развивающихся стран.

Источники биомассы

Биомассой считаются все вещества, содержащие органику и являющиеся продуктом жизнедеятельности или останками организмов, живущих или живших сравнительно недавно. Например, уголь и нефть не считаются биомассой, так как они образовались из организмов, живших миллионы лет назад. С другой стороны, муниципальные и индустриальные отходы можно рассматривать как биомассу, ибо существенную долю их органической массы составляют древесина, каучуки, пищевые отходы и другие материалы органического происхождения. Ясно, что биомасса —один из самых обширных (по количеству представителей) классов топлив, для определения перспективности энергетического использования каждого из которых необходимо изучать их энергетические характеристики и химический состав наряду с темпами их образования и затратами на получение. Основными видами биомассы можно считать древесину, энергетические культуры, отходы животноводства и птицеводства.

Животноводство и птицеводство — жизненно важные отрасли, объемы производства которых напрямую связаны с численностью населения и его жизненным уровнем. С увеличением плотности населения растет локальный спрос на их продукцию. Отчасти поэтому в данном секторе в последнее время наблюдается сдвиг в сторону более крупных предприятий, самостоятельно не производящих корма. Это обострило проблему избавления от навоза, неправильное обращение с которым приводит к бактериологическому заражению грунтовых вод [9]. В то же время навоз — типичная биомасса и может быть использован как возобновляемый источник энергии.

В зависимости от используемых для избавления от навоза технологий его состав может сильно варьироваться, даже если он произведен одной и той же группой животных. Поэтому определение усредненного состава отходов требует отдельного исследования. В качестве примера, наглядно иллюстрирующего возможности плазменных технологий, рассмотрим такой вид биомассы, как отходы птицеводства, а именно куриный помет.

Определение наиболее перспективных видов биомассы для плазменной газификации — крайне сложная задача, так как для ее решения необходимо провести исследования в совершенно разных областях: газогенераторных технологиях (с учетом особенностей использования плазмы), лесной промышленности, сельском хозяйстве, а также других сопутствующих направлениях, связанных с получением биомассы как основного или побочного продукта технологического процесса. Поэтому в нашей работе вопрос перспективности рассматривается применительно не ко всему огромному разнообразию биомассы, а к нескольким характерным группам биомассы, выбранным для рассмотрения.

Существует несколько наборов параметров, по которым можно сделать предварительную оценку перспективности и пригодности сырья (табл. 1).

Таблица 1

Важнейшие характеристики нескольких видов биомассы

Характеристики	Значения характеристик для разных видов сырья			
	Древесные отходы	Энергетические культуры	Коровий навоз	Куриный помет
Предварительный анализ, % масс. (в исходном состоянии)				
Влажность	20,00	6,29	36,60	20,20
Зольность	0,80	8,51	25,20	21,23
Летучие	67,90	70,26	31,60	54,18
Фиксированный углерод	11,30	14,94	6,60	4,39
Окончательный анализ, % масс. (на сухую беззольную массу)				
Углерод	50,25	49,16	50,39	53,96
Водород	6,09	6,36	5,77	5,60
Азот	0,20	0,63	3,94	7,92
Сера	0,10	0,13	1,31	0,96
Кислород	43,35	43,73	38,58	31,56
Низшая теплота сгорания LHV, МДж/кг	13,90	15,82	6,49	12,09
Адиабатная температура сгорания в сухом воздухе, K	2123	2304	1815	2210
Расход кислорода необходимого для полной газификации, г/кг	9,2	129,5	0	56,8
Расход кислорода необходимого для полного сжигания, г/кг	1101	1174	546	923
Максимальный удельный выход химической энергии при полной газификации, МДж/кг	17,84	17,20	8,51	14,05
Годовая скорость образования, т/км^2	90–150	1000–1500	700–1300	300–800
Затраты на получение*, цент/кг	3,1–3,9	4,4	–(0,5–0,8)	–1,3
Источники	[14, 15, 16]	[17, 18, 19]	[20, 21, 22, 23]	[24, 25, 26, 27]

*Древесные отходы и энергетические культуры — это энергетические ресурсы, получение которых сопряжено с затратами; с другой стороны, коровий навоз и куриный помет — отходы, избавление от которых связано с затратами, соответственно за их переработку платит фермер

Согласно данным предварительного анализа органическая масса куриного помета больше чем на 90 % состоит из веществ, переходящих в газовую фазу на стадии нагрева, у остальных видов биомассы эта величина превышает 80 %. В целом, чем больше содержание летучих, тем проще и эффективнее его использование в обращенном процессе плазменной газификации [10]. В прямоточном процессе это превращается из преимущества в недостаток, так как летучие не подвергаются прямому воздействию высокоэнергетического плазменного потока, что приводит к сильному загрязнению синтез-газа смолами [11]. Конверсия смол — важное направление использования энергии плазмы. Например, Europlasma разрабатывает реакторный модуль, комбинирующий автотермический газификатор (по организации материальных потоков аналогичный прямоточному) и плазменную систему конверсии смол, при этом наиболее полная конверсия происходит при энергозатратах ~1,8 МВт при мощности системы по синтез-газу ~10,2 МВт [12]. Неравновесная плазма применяется для конверсии синтез-газа со сравнительно низким содержанием смол (0,7–1,9 г/Нм^3), и для снижения их концентрации на 27–39 % требуется затратить около 20 % электроэнергии, вырабатываемой газификатором [13]. В обращен-

ном плазменном процессе за счет прохождения смол через высокотемпературную окислительную зону их содержание значительно меньше и слабо влияет на энергетический баланс процесса [28].

Соотношение масс связанного углерода и золы — важный параметр для обращенного процесса, так как потоки сырья и окислителя сонаправлены, скорость газификации сильно снижается вниз по течению, соответственно концентрация окислителя и содержание углерода в коксозольном остатке снижаются, а их произведение определяет скорость массообмена. Поэтому топлива с высоким содержанием углерода в коксозольном остатке предпочтительны для обращенного процесса как плазменной, так и автотермической газификации. По этому параметру наилучшим сырьем можно считать древесные отходы (~93 % углерода в коксозольном остатке) и энергетические культуры (~64 %).

В прямоточном процессе потоки сырья и окислителя направлены навстречу друг другу — на входе плазменный поток контактирует с максимально обедненным коксозольным остатком. По сравнению с обращенным этот способ газификации позволяет достичь большей глубины превращения углерода коксозольного остатка в синтез-газ. Кроме того, расположение высокотемпературной зоны в нижней части реактора позволяет упростить жидкое шлакоудаление и остеклование шлака [29].

Данные (см. табл. 1) позволяют определить удельные расходы кислорода, необходимые для полной газификации углерода и для полного сжигания сырья. Эти величины следует рассматривать одновременно с теплотой сгорания, вместе они неразрывно связаны с адиабатной температурой сгорания, которая в большей степени, чем теплота сгорания, свидетельствует о практической ценности сырья для энергетики. Топливо может обладать высокой теплотой сгорания, однако если для его сжигания требуется большое количество кислорода, то при работе на воздухе значительное количество энергии будет потрачено на нагрев балластного азота. Снижение адиабатной температуры сгорания в основном вызывают три фактора: повышенная влажность, высокое содержание кислорода в сырье и (в меньшей степени) высокая зольность. Из перечисленных факторов прямое влияние можно оказать только на влажность, удаление которой приводит к снижению содержания кислорода и водорода в сырье. Для плазменной газификации высокозольных топлив с высокой влажностью, когда ее удаление невозможно или нерентабельно, использование прямого процесса позволяет снизить энергозатраты. Однако применение таких видов сырья в энергетических целях, как правило, нецелесообразно.

Один из важнейших параметров для всех плазменных процессов — соотношение энергозатрат и удельного расхода кислорода при условии полной газификации углерода. Однако без расчета процесса газификации определить энергозатраты невозможно. На начальных этапах анализа можно рассматривать отношения выхода химической энергии к теплоте сгорания и расходов кислорода для сжигания и газификации. Чем выше эти величины, тем сложнее окажется достижение оптимальных параметров плазменной газификации. Наиболее проблемным сырьем в данном контексте является коровий навоз (отношения ~1,31 и ∞, соответственно), а наиболее простым — энергетические культуры(~1,09 и ~9,07).

Следует отметить, что оценки предельного выхода химической энергии корректны, если используется обращенный плазменный процесс газификации или любой другой способ с полной конверсией смол. По этой величине однозначно определить наиболее перспективный вид сырья, к сожалению, невозможно, так как, для того чтобы ее достичь, требуется затратить энергию и средства на приобретение сырья; кроме того, следует принять на рассмотрение вопрос стоимости доставки. Оба этих параметра зависят от используемых техник и технологий сбора и доставки. Если принять, что тепловая энергия продуктов газификации во всех случаях составляет порядка 3 МДж в энергетическом балансе на 1 кг (это грубое приближение допустимо для полной газификации многих видов сырья с LHV меньше ~15 МДж/кг), синтез-газ будет использоваться в комбинированном цикле с эффективностью ~60 % [30], а стоимость электроэнергии составит 5 цент/кВт·ч, то получится, что наиболее прибыльной будет переработка куриного помета. В этом случае доход с переработки 1 кг сырья будет ~6,1 центов.

Численное моделирование плазменной газификации

По данным Forest Products Laboratory (U.S. Department of Agriculture) [31] эффективность получения электроэнергии из древесины методом сжигания составляет 18–24 %. Причем древесина используется в качестве топлива тысячелетиями и служит одним из самых простых в обращении энергетических ресурсов. При использовании технологии газификации и комбинированного цикла эффективность получения электроэнергии можно увеличить до ~29 %, а при использовании плазменной газификации — до примерно 35–40 % [32, 33]. Поэтому разработка энергетических технологий на основе плазменной газификация — одно из самых перспективных направлений развития энергетики. В плазме молекулы расщепляются на электроны, ионы, атомы и радикалы [34], которые определяют ее высокую реакционную способность. Применение плазмы приводит к увеличению скорости химических реакций, что, в частности, позволяет повысить степень конверсии в эндотермических газофазных процессах [35]. Плазма — универсальный окислитель, который можно использовать для газификации практически любого сырья, в том числе древесных отходов [36, 37], угля [38], RDF [39] и т. д. Хотя применение плазмы пока не получило широкого распространения, такие преимущества, как снижение trace contaminants [40], конверсия смол [41], высокие скорости теплообмена с сырьем [42], а также высокая производительность при пониженных расходах плазмы [43], делают ее использование в процессах пиролиза и газификации очень привлекательным. Главный недостаток плазменных технологий — в низком уровне их индустриализации [44].

Методы расчета

Чтобы ознакомить с перспективами использования плазмы для газификации куриного помета, полезно провести численное моделирование этого процесса. Расчет равновесного состава позволяет оценить максимально достижимые выходы полезных продуктов газификации при заданных параметрах (соотношение окислитель/сырье, температура, давление) [45]. Недостатки данного метода связаны с ограничениями, которые налагаются используемыми допущениями (идеальное перемешивание и неограниченное времена пребывания [46]). Тем не менее данный подход обеспечивает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [32, 47, 48, 49].

Возможность подводить энергию с плазмой практически полностью снимает кинетические ограничения, налагаемые на процесс низкими температурами в автотермических режимах. Фактически границы режима определяются расходом кислорода, необходимым для окисления углерода топлива до CO, и автотермическим пределом, когда для достижения заданных параметров ввод дополнительной энергии не требуется. Для куриного помета первая величина составляет ~245 г/кг (режим 1) при применении воздушной плазмы, ~63,9 г/кг (режим 2) — для паровой. Автотермический режим (температура — 1500 K, давление — 1 атм) на воздушном дутье достигается при расходе окислителя ~2,16 кг/кг. Соответственно, все режимы между этими двумя расходами воздуха будут аллотермическими при тех же температуре и давлении.

Рассмотрим режимы стехиометрической газификации куриного помета воздухом и паром, а также режим со средним между автотермическим и стехиометрическим расходом воздуха ~1,20 кг/кг (режим 3) и режим с расходом пара ~0,314 кг/кг (режим 4), соответствующий предыдущему по количеству вводимого кислорода. Результаты расчетов представлены на рис. 1. В расчетах использовался состав и теплота сгорания куриного помета (см. табл. 1), а также следующий состав воздуха: N_2 — 78,09, O_2 — 20,95, Ar — 0,93, CO_2 — 0,03 % мол. Для расчета объемной скорости процесса Фишера—Тропша использовалась аппроксимация скорости синтеза на Co-Mn/TiO_2 катализаторе [50] при давлении 10 бар и температуре 523 K. Перед синтезом Фишера—Тропша синтез-газ очищался от соединений серы и оксидов азота, а часть CO конвертировалась в H_2 для обеспечения стехиометрического соотношения синтеза — H_2:CO = 2. Синтез производился до тех пор, пока в конвертируемом газе содержание CO не снижалось до 0,1 % мол.

Обсуждение результатов

Как видно, при стехиометрической газификации с ростом температуры увеличивается содержание CO в синтез-газе и растет выход химической энергии. Это в основном связано

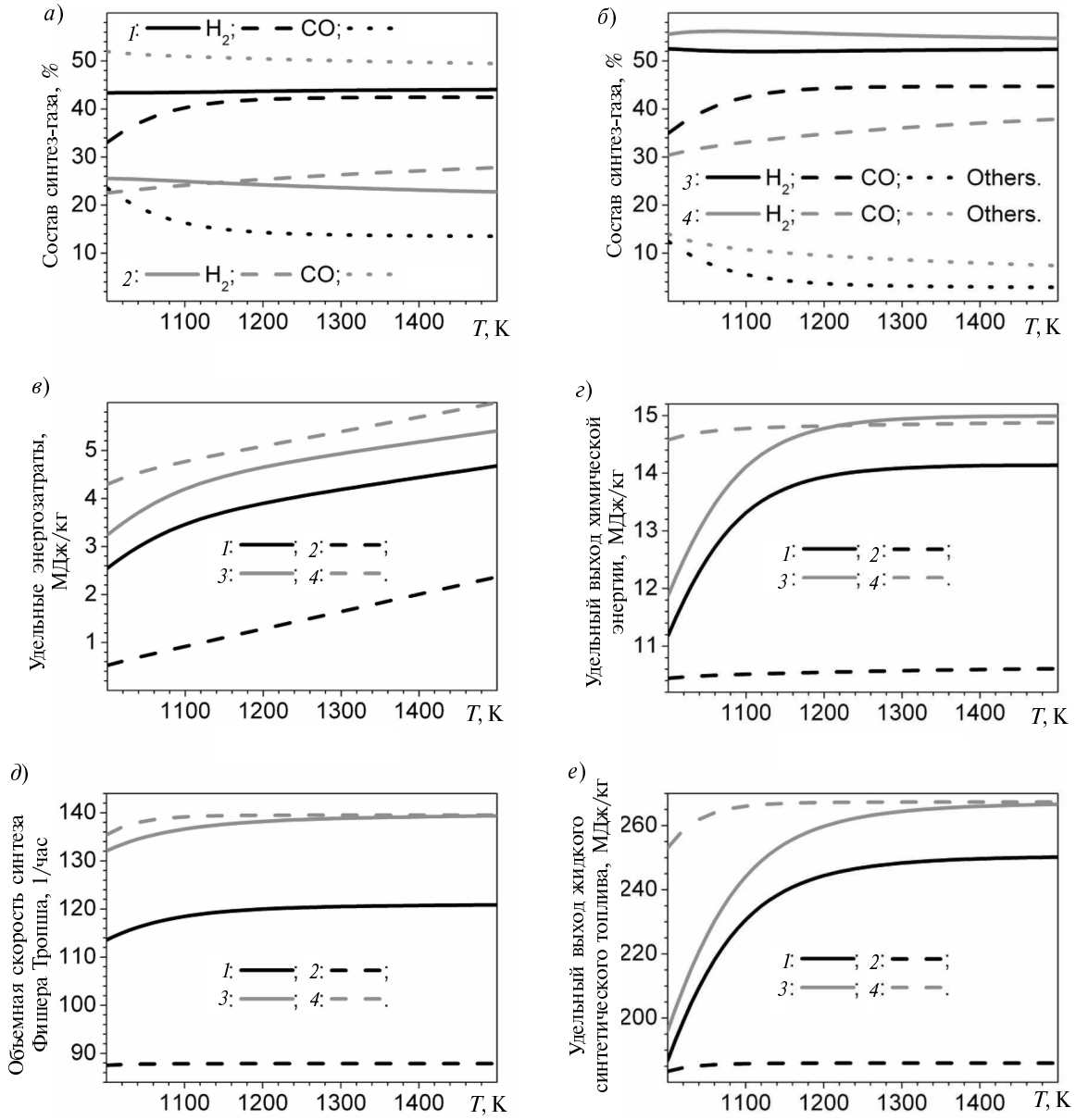


Рис. 1. Основные парметры плазменной газификации куриного помета с получением из синтез-газа жидких топлив по методу Фишера — Тропша:

а и *б* — состав сухого синтез-газа; *в* — энергозатраты на единицу массы сырья (по LHV); *г* — выход химической энергии синтез-газа с единицы массы сырья (по LHV); *д* — часовая объемная скорость синтеза Фишера—Тропша; *е* — выход синтетичного топлива с единицы массы сырья. Данные представлены для расходов воздушной плазмы 245 г (*1*) и ~1,20 кг (*2*), а также паровой плазмы ~63,9 г (*3*) и ~314 г (*4*) на 1 кг сырья

со снижением удельного выхода графита (он становится меньше 0,1 г/кг только при температурах более ~1400 K) и переходом его в газовую фазу в форме монооксида углерода. На режимах 3 и 4 изменение состава связано со смещением равновесия в сторону образования H_2 и CO_2 по стехиометрии паровой конверсии CO и незначительным увеличением содержания метана (до ~1,2–1,6 % мол.) при снижении температуры. Так как значения объемной теплоты сгорания для H_2 и CO близки, а в ходе паровой конверсии CO одно заменяется другим, влияние температуры процесса на удельный выход химической энергии незначительно.

Возрастание энергозатрат с ростом температуры на всех режимах связано главным образом с увеличением тепловой энергии системы, а на стехиометрических режимах — также с газификацией графита. Влияние этого эффекта на энергетический баланс по достижении 1200 K снижается до ~2 кДж/(кг·K).

Основным фактором, определяющим скорость синтеза Фишера—Тропша, является состав синтез-газа. В ходе паровой конверсии CO общая доля водорода и монооксида углерода в синтез-газе снижается (пар в ходе конверсии замещается диоксидом углерода). Поэтому, чем ближе изначальное соотношение H_2/CO к стехиометрическому, тем больше скорость синтеза. Этим обусловлены меньшие скорости синтеза при использовании воздушно-плазменной газификации по сравнению с пароплазменной. Причем скорости снижаются дальше при уменьшении теплосодержания плазмы. Содержание в синтез-газе примесей (таких, как H_2S, COS, NH_3, HCN, HCl, сажа, смолы, ароматические углеводороды, пары металлов, пыль) должно лимитироваться для предотвращения быстрого выхода из строя катализатора [51]. Остаточное содержание этих примесей определяет срок службы катализатора, поэтому чем выше объемная скорость, тем больше полезного продукта блок катализа может произвести до выхода из строя. Использование паровой плазмы вместо воздушной позволяет повысить объемную скорость на 15–59 %, что предположительно позволит снизить финансовые затраты на блок катализа в процессе Фишера—Тропша.

Изменения удельного выхода жидких топлив обусловлены изменениями в составе синтез-газа и в целом близки по характеру к зависимости удельного выхода химической энергии, однако не пропорциональны, так как метан инертен в процессе Фишера—Тропша.

При использовании плазменных технологий энергозатраты (связанные с вводом энергии) на получение 1 кг синтетических топлив составят 5,0–6,2 кВт·ч при использовании паровой плазмы и 1,9–5,2 кВт·ч при использовании воздушной.

Внедрение плазменной газификации

В мире появилось большое количество компаний, занимающихся коммерческим продвижением технологий плазменной газификации. Из них наиболее успешными являются: AlterNRG [52], Integrated Environmental Technology LLC [53], Advanced Plasma Power [54], Plasco Energy Group [55], Pyrogenesys Canada Inc. [56] и др. Этим компаниям удалось создать пилотные установки различных масштабов. Некоторые из них находятся в стадии реализации крупных коммерческих проектов. В основном реализуются процессы газификации на расплаве (Integrated Environmental Technology LLC), на расплаве с последующей плазменной конверсией сырого синтез-газа (Pyrogenesys), традиционная газификация в прямом процессе с плазменной конверсией сырого синтез-газа (Plasco Energy Group, Advanced Plasma Power) либо прямой процесс плазменной газификации (AlterNRG).

В случае газификации на расплавах используются металлургические печи с джоулевым разогревом расплава. Отходы подаются на поверхность расплава. В этой области либо зажигается электрическая дуга, либо подается струя плазмы от плазмотрона. В некоторых схемах плазмотрон устанавливается в специальной камере на выходе, обеспечивая смешение отходящих газов с высокотемпературным окислителем для конверсии смол, содержащихся в сыром синтез-газе, поступающем из камеры плавления. Преимущество такой организации процесса — в возможности создания крупнотоннажных установок. Второе преимущество — возможность вывода несгораемых компонентов отходов в виде расплава с разделением по металлическим и неметаллическим фракциям. Существенным недостатком является повышение затрат энергии на поддержание расплава.

В прямом процессе газификации компании AlterNRG в реактор, помимо отходов, подается металлургический кокс и известняк. Генерато-

ры плазмы установлены в нижней части газификатора и служат в основном для разогрева и поддержания расплава в жидком состоянии (известняк вводится для снижения температуры плавления). В зону газификации, расположенную выше плазмотронов, через специальные фурмы подается кислород. Получаемый газ отбирается из верхней части газификатора. Вследствие того, что синтез-газ, полученный в зоне газификации, проходит затем через верхние, более холодные слои отходов, происходит его загрязнение смолами, образующимися в зонах пиролиза, а испаряющаяся вода не участвует в процессе конверсии из-за низких температур в зоне ее выделения. Это — существенный недостаток прямого процесса. Получаемый газ также нуждается либо в дополнительной конверсии, либо в очистке от смол.

Общий существенный недостаток всех этих технологий связан с использованим либо свободно-горящих дуг, либо плазмотронов постоянного тока. Для свободно горящих дуг характерен очень низкий КПД передачи энергии от дуги к газу (~30 %). КПД для плазмотронов постоянного тока составляет порядка 60 % из-за больших потерь в источниках питания. На наш взгляд, наиболее эффективными системами генерации плазмы являются плазмотроны переменного тока. Генераторы плазмы, разработанные в ИЭЭ РАН, обеспечивают эффективность передачи электрической энергии из сети в тепловую энергию плазмы на уровне 90–94 %.

Способы ввода энергии

Плазменные технологии переработки и газификации органосодержащих веществ сейчас развиваются по двум направлениям, которые отличаются друг от друга способом генерации плазмы, передающей в плазмохимический реактор необходимую энергию. Первый из способов основан на том, что электрические дуги горят непосредственно в объеме реактора. Дуги замыкаются между введенным в реактор электродом и находящимся в нижней части реактора электропроводящим расплавом. Электроды могут быть выполнены из графита или металла. Положительным качеством этого способа является возможность создания крупных единичных плазмохимических реакторов с энергопотреблением порядка 5–30 МВт. Свободно горящие дуги реализованы в металлургических установках, которые крупномасштабны и практически готовы к использованию. Среди недостатков можно отметить быстрый износ электродов, большое количество примесей, загрязняющих получаемый газ, и низкий коэффициент передачи энергии свободно горящей дуги в перерабатываемое вещество. КПД таких установок, как правило, не превышает 30–35 %. Для генерации плазмы во втором способе используются стационарные плазмотроны. Плазмообразующий газ получает энергию от электрических дуг, горящих в разрядной камере плазмотрона, и затем поступает в объем реактора. Эффективность теплообмена между генерируемой плазмой и перерабатываемым веществом по сравнению с первым методом существенно выше, КПД плазмотронов, оптимизированных для решения технологических задач, также превышает 90 %, практически вся энергия плазменной струи переходит в перерабатываемое вещество, значительно облегчая формирование химического состава газа. В настоящее время применение этого метода сдерживается отсутствием достаточно мощных генераторов плазмы, способных работать в окислительных средах (воздух, водяной пар и т. д.) в длительных режимах с высоким коэффициентом полезного действия и достаточным ресурсом электродов.

Мощные стационарные электродуговые плазмотроны, отвечающие требованиям плазмохимических технологий, можно разделить: по роду тока на плазмотроны переменного тока [57–71] и плазмотроны постоянного тока [72–76]; по характеру плазмообразующего газа на работающие с нейтральными, с восстановительными либо с окислительными средами. Устройства отличаются также конструктивными и другими особенностями: типом разрядных камер, материалом и формой электродов, способом подачи рабочего газа, принципом стабилизации дуги. В большинстве конструкций плазмотронов используют комбинацию методов стабилизации дугового разряда, осуществляя ее организацией газового потока, обжатием дуги изолированными вставками, наложением магнитного поля. Электродные системы плазмотронов могут быть стержневыми, тороидальными, кольцевыми и трубчатыми, в некоторых случаях электродная система служит и электродуговой камерой. Ввиду большого разнообразия конструкций опишем лишь основные типы.

Плазмотроны постоянного тока

До настоящего времени в большинстве систем газификации и пиролиза использовались плазмотроны постоянного тока. Типичная схема электропитания представлена на рис. 2. Здесь характерно наличие в цепи балластного сопротивления, используемого для обеспечения стабильного горения дуги постоянного тока, что обусловливает значительную потерю активной мощности.

Наиболее распространены плазмотроны постоянного тока фирмы «Westinghouse Plasma Corp» с цилиндрическими электродами. Диапазоны мощностей для плазмотронов моделей MARC-3A и MARC 11L, представляющих наибольший интерес для промышленного применения, составляют соответственно 130–300 кВт и 300–800 кВт [77, 78]. Это наиболее отработанные конструкции, коэффициент передачи энергии от дуги к плазме (тепловой КПД) у них составляет 70–85 %. Значение полного КПД системы с учетом потерь на активном сопротивлении источника питания существенно ниже. Ресурс электродов для этих моделей составляет соответственно 600 и 1000 часов.

Плазмотроны переменного тока

Более перспективны с точки зрения промышленного применения для технологий, требующих относительно больших мощностей (например, при переработке отходов), плазмотроны переменного тока. Типичная схема электропитания представлена на рис. 3. Система энергопитания в данном случае существенно дешевле и надежней, нежели у плазмотронов постоянного тока; они проще в эксплуатации; плазмотроны переменного тока обладают высоким коэффициентом преобразования энергии дуг в плазму. В источниках питания переменного тока потери не превышают единиц процентов, так как здесь используются индуктивные сопротивления, стабилизирующие дугу, а потери реактивной мощности минимизируются использованием стандартных емкостных компенсаторов.

Другая группа однокамерных многофазных плазмотронов, нашедших широкое распространение, — это плазмотроны со стержневыми электродами. В ИЭЭ РАН было разработано, применено и исследовано несколько типов плазмотронов, в том числе плазмотроны со стержневыми электродами. Был выполнен значительный объем научно-исследовательских и конструкторских работ [57, 70, 79]. Однокамерный плазмотрон со стержневыми электродами представлен на рис. 4, *а*. Наличие одновременно горящих нескольких дуг переменного тока в одной камере позволяет создать простые и надежные плазмотроны, преобразующие энергию электрического тока в тепловую с высоким КПД (80–90 %).

Различие разработанных конструкций заключается в том, что для нагрева инертных газов, азота и водорода используются электроды стержневого типа, выполненные из вольфрама или вольфрамосодержащих материалов, а для нагрева окислительных сред — медные трубчатые электроды с водяным охлаждением. Плазмотроны со стержневыми электродами условно делятся на три серии: мощностью до 200 кВт и до 2 МВт, а также работающие в кратковременных режимах мощностью 4–50 МВт [79]. Конструктивно оба типа аналогичны и имеют три основных узла: корпус, дуговую камеру (сопло) и электродный блок. Многофазный режим горения дуг в разрядной камере позволил использовать малое напряжение повторного зажигания за счет предварительной ионизации разрядного промежутка. В качестве электродных материалов использовался вольфрам с добавками редкоземельных металлов и соединений, обладающих малой

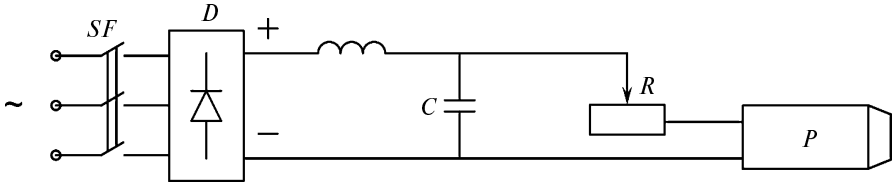


Рис. 2. Типичная схема электропитания плазмотрона постоянного тока (*P* — плазмотрон; *D* — выпрямитель; *L*-*C* — фильтр; *R* — балластное сопротивление; *SF* — автоматический выключатель) [77]

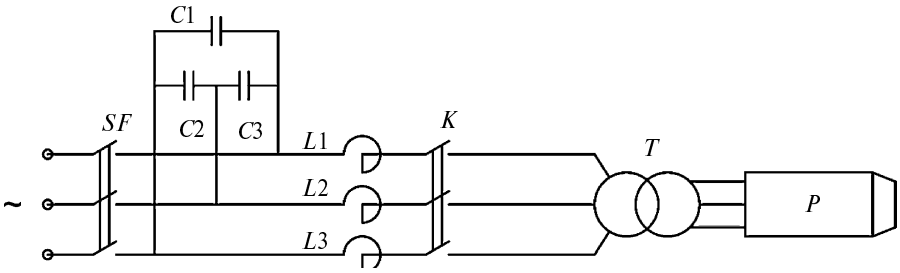


Рис. 3. Схема электропитания плазмотрона переменного тока

(*P* — плазмотрон; *K* — контактор; *T* — стандартный повышающий трансформатор; *L*1–*L*3 — токоограничивающие индуктивности; *C*1–*C*3 — емкостной компенсатор; *SF* — автоматический выключатель)

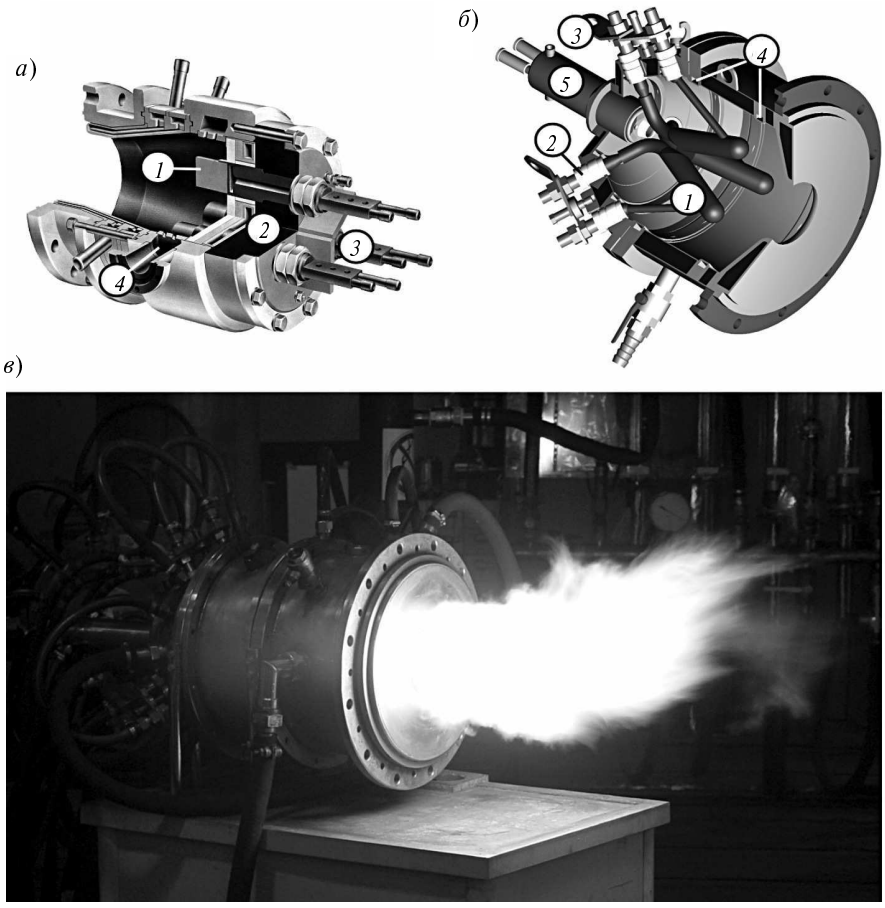


Рис. 4. Мощные однокамерные плазмотроны переменного тока:

а — трехфазный плазмотрон серии ЭДП (*1* — наконечник электрода; *2* — изолятор; *3* — токоввод; *4* — контур подачи газа); *б* — схема однокамерного трехфазного плазмотрона с электродами рельсового типа (*1* — наконечник электрода; *2* — изолятор; *3* — токоввод; *4* — контур подачи газа; *5* — инжектор); *в* — фотография работающего плазмотрона с электродами рельсового типа мощностью 500 кВт

работой выхода. К преимуществам однокамерных плазмотронов со стержневыми электродами относятся: простота конструкции, высокий КПД, обеспечиваемый за счет оптимальных соотношений объема и площади поверхности дуговой камеры, а также возможность работы электродов в режиме термоэмиссии. В этих системах легче добиться стабильного горения дуг переменного тока.

Разработана серия плазмотронов с электродами рельсового типа (см. рис. 4, *б*, *в*) [71]. Плазмотрон с рельсовыми электродами способен стационарно работать как с окислительными средами (воздух), так и с нейтральными (азот, инертные газы). Диапазон расхода воздуха — от 15 до 70 г/с. Мощность, вкладываемую в дуги, можно варьировать в диапазоне от 100 до 700 кВт. Коэффициент передачи энергии дуги в газ незначительно отличается от полного КПД системы и составляет 70–95 %. В основу работы плазмотрона положен рельсотронный эффект (дуги перемещаются по электродам в поле собственного тока). Распределение тепловой нагрузки от дуговой привязки по длине электрода при ее движении дает возможность использовать охлаждаемые электроды, выполненные из легкоплавкого материала с высокой теплопроводностью (медные трубки). В состав многофазного однокамерного плазмотрона переменного тока с электродами рельсового типа в качестве инжектора входит стационарный однофазный высоковольтный плазмотрон малой мощности. Он создает поток плазмы, обеспечивающей достаточную для зажигания основных дуг концентрацию электронов в зоне минимального межэлектродного промежутка. Это позволяет при питании от промышленной электросети с напряжением порядка 380–500 В стабильно инициировать дуги между электродами, установленными с зазором до 20 мм. Дуги заполняют большую часть разрядной камеры, совершая движение в продольном и поперечном направлениях. В пристеночной зоне, куда подается холодный газ, образуется изолирующий слой, в котором концентрация заряженных частиц резко падает и происходит погасание дуг. Описанный выше процесс непрерывно повторяется, образуя на выходе из сопла плазмотрона струю низкотемпературной плазмы со среднемассовой температурой порядка 1500–6500 К.

Для работы в диапазоне до 100 кВт разработаны высоковольтные плазмотроны с высоким термическим КПД — 80–95 %. Это плазмогенераторы со стержневыми электродами в цилиндрических каналах, общий вид и конструкция, которая представлена на рис. 5, *а*. Высокое питающее напряжение (4–10 кВ) обеспечивает устойчивый поджиг и горение длинной дуги.

Наиболее перспективными представляются модели плазмотронов переменного тока с цилиндрическими электродами; они работают с высоким падением напряжения на дугах (до 5 кВ). Типичный генератор плазмы такого типа представлен на рис. 5, *б*.

К преимуществам данного плазмотрона, кроме высокого коэффициента полезного действия, относятся также продолжительный ресурс электродов (более 1000 часов), возможность изменения теплосодержания рабочего газа в широких пределах и обеспечения при этом среднемассовой температуры воздушной плазмы от 1500 до 6500 К. Особенно стоит отметить его способность обеспечить температуру рабочего газа ниже 2000 К, востребованную для технологических нужд.

Крупномасштабная экспериментальная установка

В конце 90-х годов на фоне подорожания ископаемых ресурсов возобновился интерес к технологиям газификации твердых топлив. ИЭЭ РАН также начал работы в этом направлении, поскольку это один из перспективных путей внедрения систем генерации плотной низкотемпературной плазмы. На стендах института была создана экспериментальная установка для исследований процесса плазменной газификации (рис. 6) [80].

Основным элементом установки является реактор-газификатор. Это аппарат слоевого типа, работающий по обращенной схеме. Твердое топливо загружается в реактор сверху (рис. 6, зона I). Затем под действием силы тяжести и за счет конверсии в нижних слоях реактора постепенно перемещается вниз к зоне вывода шлака (VII). Сырье последовательно проходит зону сушки (II), пиролиза (III), окисления (IV) и восстановления (V), в результате органическая масса и вода конвертируются в синтез-газ. Эти процессы инициируются и поддерживаются внутри реактора потоками плазмы, поступающими от плазмотронов. Газификатор оснащен загрузочным устройством, позволяющим осуществлять порционную загрузку в ходе эксперимента (рис. 6, поз. *5*).

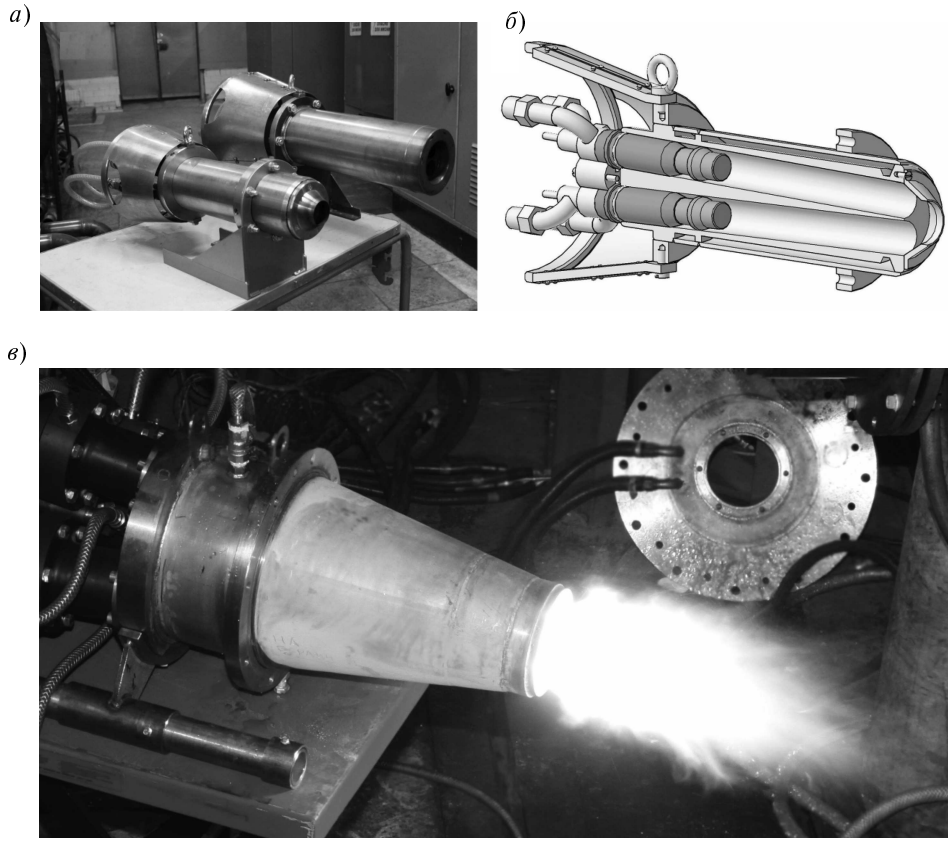


Рис. 5. Стационарные высоковольтные плазмотроны переменного тока:

а — фотография высоковольтных плазмотронов переменного тока со стержневыми электродами в цилиндрических каналах; *б* — схема однофазного высоковольтного плазмотрона со стержневыми электродами; *в* — фотография работающего высоковольтного плазмотрона мощностью 500 кВт (ИЭЭ РАН), плазмообразующий газ — воздух

По высоте шахты реактор оборудован тремя дутьевыми ярусами. Первый (верхний) ярус предназначен для подачи окислителя умеренной температуры (не более ~400–500 °С), второй и третий используются для подачи низкотемпературной плазмы. В каждый плазменный дутьевой ярус можно подавать плазму одновременно от двух плазмотронов. На установке используются либо высоковольтные генераторы воздушной плазмы переменного тока мощностью до 50 кВт либо комбинация воздушного и парового плазмотронов.

В нижней части реактора осуществляется отбор синтез-газа. Дополнительно в этой зоне предусмотрена возможность подачи дутья, в том числе плазменного, для ускоренного прогрева на первоначальном этапе эксперимента.

Созданный газификатор предназначен для работы при давлении близком к атмосферному. Продувка газов осуществляется за счет разряжения 0,3±0,2 кПа, создаваемого в отводящем патрубке (рис. 6, поз. *7*) вентилятором, установленным в конце технологической цепочки (рис. 6, поз. *15*).

Для удаления шлака нижняя часть реактора оснащена вращающейся колосниковой решеткой (рис. 6, поз. *6*). Ниже колосниковой решетки располагается гидравлический затвор, выполняющий как функцию герметизации реакционного пространства, так и функцию взрывного клапана.

Основными исследуемыми параметрами на данной установке были состав и свойства синтез-газа. Отбор пробы газа для анализа осуществлялся на выходе из газификатора отводящего патрубка (рис. 6, поз. *7*). Реализованы две системы подготовки пробы для анализа.

Первая — двухканальная автоматическая. Газ откачивается из газохода вакуумным насосом, проходит горячий фильтр, циклон, холодильник,

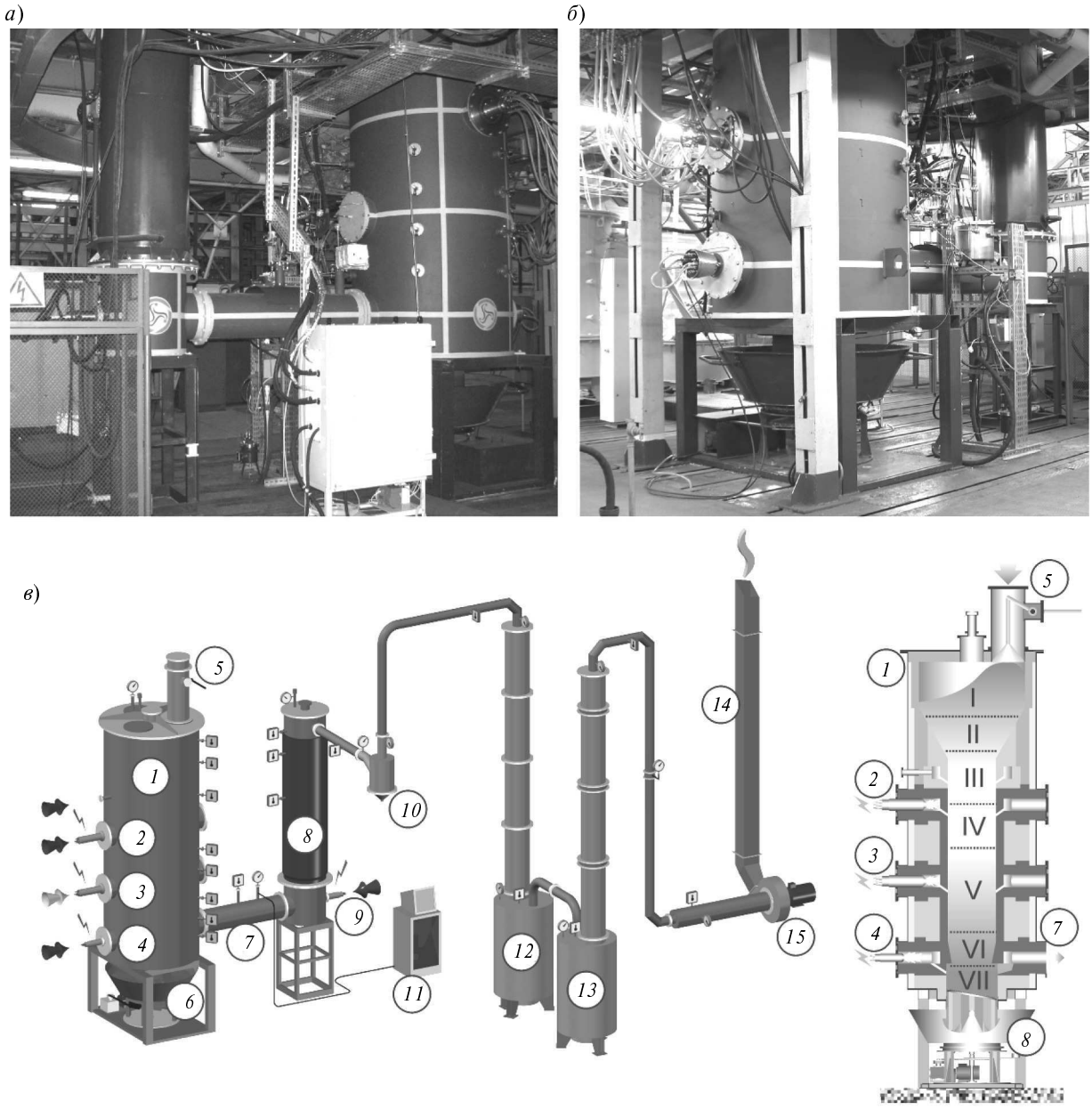


Рис. 6. Общий вид (*а*, *б*) и схема (*в*) экспериментальной установки плазменной газификации ИЭЭ РАН:

1 — реактор-газификатор; *2* — основной плазмотрон; *3* — вспомогательный плазмотрон (H_2O; CO_2); *4* — вспомогательный плазмотрон для предварительного разогрева; *5* — питатель; *6* — устройство удаления шлака; *7* — выход синтез-газа; *8* — дожигатель; *9* — дежурный факел; *10* — циклон; *11* — газоанализатор; *12* — оросительный скруббер; *13* — насадочный скруббер; *14* — дымовая труба; *15* — вытяжной вентилятор. Зоны: I — накопления; II — сушки; III — пиролиза; IV — окисления; V — восстановления; VI — слабореакционная; VII — вывода шлака.

— датчик температуры; — датчик давления; — воздух; — пар/воздух

фильтр тонкой очистки и анализируется масс-спектрометром времяпролетного типа ЭМГ-20-1 (Меттек, Россия).

Основная задача второй системы подготовки пробы — сбор и измерение количества влаги и смол в составе получаемого синтез-газа. Первым элементом системы после непосредственно пробоотборного зонда также служит горячий фильтр. Далее реализованы два способа измерения влаги: конденсационный и абсорбционный. В конденсационном методе измеряется объем жидкости, удаленной из потока газа при его охлаждении. В абсорбционном — масса поглотителя, абсорбирующего воду и водяной пар из потока газа. Осушенная газовая проба направляется на анализ состава в квадрупольный масс-спектрометр MKS Cirrus-300 (MKS Instruments, USA). Сконденсированная жидкость исследуется гравиметрическим методом на содержание смол.

Масс-спектрометры позволяют проводить непрерывный анализ состава синтез-газа как по основным компонентам, так и по микропримесям. На основе получаемых данных вносятся коррективы в режимные параметры работы установки, а при последующем анализе оцениваются материальные и энергетические потоки процессов, происходящих в газификаторе, и рассчитываются другие параметры.

Контроль за режимом работы установки осуществляется по материальным потокам, температурам и давлениям внутри реактора и в других элементах экспериментальной установки. Эти параметры непрерывно измеряются и регистрируются. Основным средством воздействия на процесс служит изменение интенсивности дутья, а также включение или выключение плазмотронов.

Получаемый синтез-газ после отбора пробы направляется на сжигание. Для этих целей служит специальный аппарат — дожигатель. В нем синтез-газ смешивается с необходимым количеством воздуха и сгорает. Для стабилизации пламени и предотвращения взрывоопасных ситуаций установлено устройство принудительного поджига, в качестве которого используется однофазный высоковольтный плазмотрон небольшой мощности.

Выходящие из дожигателя дымовые газы проходят систему газоочистки и через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу. Для очистки используется мокрый метод, реализованный в двух последовательных аппаратах — оросительном и насадочном скрубберах.

Методика проведения эксперимента

Важная стадия эксперимента — определение влажности и состава исследуемого топлива. Влажность топлива определяется методами на основе конденсации и абсорбции, а содержание углерода и водорода в топливе — по стандартной методике ISO 625-96.

Перед началом эксперимента шахта газификатора полностью заполняется древесным углем. Этот вид твердого топлива наиболее подходит для стадии предварительного разогрева, поскольку обладает пониженным содержанием летучих.

Началом эксперимента считается запуск одного из плазмотронов газификатора. Подача горячей воздушной плазмы способствует разогреву и зажиганию топлива. Прогрев шахты реактора осуществляется в течение как минимум 8 часов и состоит из нескольких стадий, отличающихся интенсивностью дутья. Футеровка газификатора обладает очень большой тепловой инерцией, поэтому практически все эксперименты проводятся на квазистационарном тепловом режиме.

На завершающей стадии прогрева начинается анализ состава синтез-газа, а при дозагрузках древесный уголь заменяется исследуемым веществом. При достижении экспериментальным материалом зоны сушки и пиролиза начинается процесс перехода с газификации древесного угля к газификации исследуемого топлива, который считается законченным, когда вся шахта газификатора будет заполнена этим топливом и продуктами его газификации. По окончании экспериментальной программы прекращается дозагрузка топлива в реактор, и установка переводится в режим дожигания его остатков и охлаждения.

Были проведены эксперименты по плазменной газификации таких видов топлив, как древесный уголь, древесина (отдельные эксперименты для различных видов: щепа, прессованные опилки, чурки), каменный уголь, лигнит, RDF (Refuse Derived Fuel) и других.

Результаты экспериментов

Ниже (рис. 7, табл. 2) приводятся экспериментальные и расчетные данные исследования процесса плазменной газификации биомассы на примере отходов древесины.

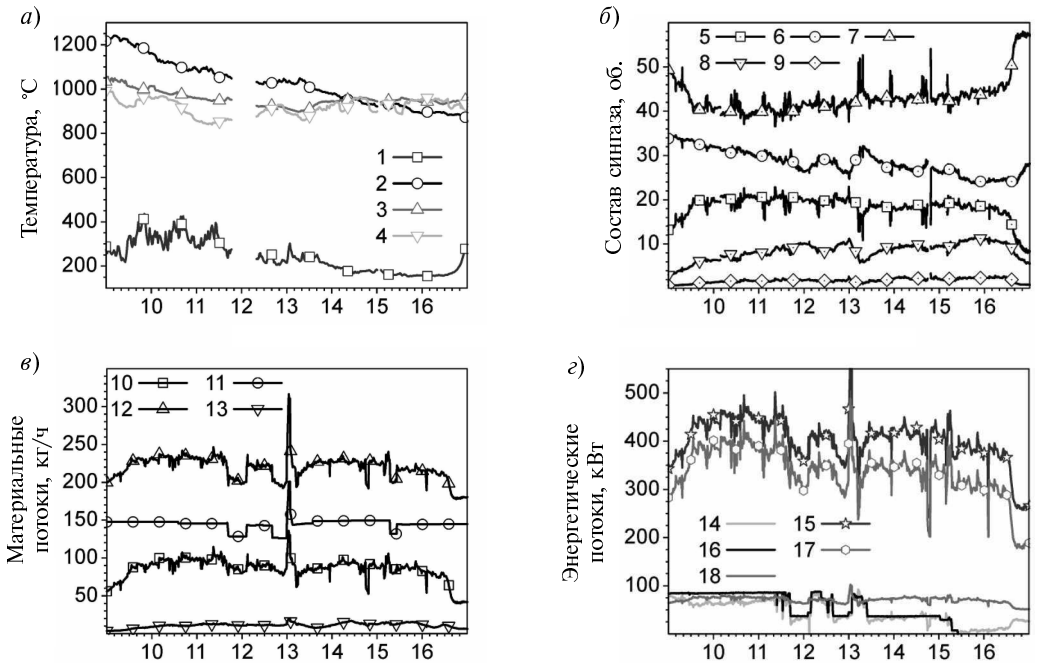


Рис. 7. Изменение во времени основных параметров:

а — температуры (*1* — стенки в зоне пиролиза; *2* — стенки в зоне окислениие; *3* — стенки в зоне восстановления; *4* — сингаза на выходе); *б* — состав сухого сингаза (*5* — H_2; *6* — CO; *7* — N_2; *8* — CO_2; *9* — остальные); *в* — материальные потоки (*10* — топливо; *11* — воздух; *12* — сингаз; *13* — пар); *г* — энергетические потоки (*14* — потери; *15* — топливо (LHV); *16* — плазма; *17* — сингаз (LHV); *18* — сингаз (теплота)

Таблица 2

Сравнение усредненных экспериментальных данных с результатами расчетов

Показатель		Ед. изм.	Значение показателя для периода времени эксперимента			
			9:30-11:36 чч:мм		13:36-15:12 чч:мм	
			Экспер.	Расчет	Экспер.	Расчет
Материальный баланс на 1 кг топлива:	Топливо	кг	1,000		1,000	
	Воздух		1,538		1,692	
	Всего		2,538		2,692	
	Сингаз		2,428	2,402	2,549	2,536
	Пар		0,110	0,136	0,142	0,155
	Всего		2,538	2,538	2,692	2,692
	Воздух	$Нм^3$	1,288		1,417	
	Сингаз		2,633	2,484	2,726	2,571
LHV сингаза		$МДж/Нм^3$	5,558	6,001	5,036	5,440
Состав сингаза	H_2	% об.	20,01	19,45	18,25	19,01
	CO		30,87	35,26	26,92	30,78
	N_2		40,25	40,82	43,39	43,40
	O_2		0,01	0,00	0,22	0,00
	Ar		0,48	0,49	0,54	0,52
	CO_2		7,33	3,98	9,15	6,28
	CH_4		1,05	0,00	1,53	0,00

Окончание табл. 2

Показатель		Ед. изм.	Значение показателя для периода времени эксперимента			
			9:30-11:36 чч:мм		13:36-15:12 чч:мм	
			Экспер.	Расчет	Экспер.	Расчет
Энергетический баланс на 1 кг топлива	LHV топлива	МДж	16,79		16,62	
	Плазма		3,21		1,46	
	Всего		20,00		18,08	
	LHV сингаза		14,63	14,91	13,73	13,99
	Теплота сингаза		3,27	5,09	2,89	4,09
	Потери		2,10	–	1,46	–
	Всего		20,00	20,00	18,08	18,08
LHV сингаза/плазма			4,565	4,651	9,381	9,555

Расход сырья определялся по разности материальных потоков основных элементов (углерод, водород, кислород и азот) в предположении, что зольность и содержание азота в древесине пренебрежимо малы. По интегральным величинам расхода углерода, водорода и кислорода топлива определялся его элементный состав на двух промежутках времени, а по составу — низшая теплота сгорания (по формуле для оценки теплоты сгорания биомассы [81]).

Режим плазменной газификации древесины наблюдался в промежутке 9:43–16:30. За это время по оценкам было израсходовано 606,34 кг древесины, а фактически в ходе эксперимента в реактор было загружено 609,98 кг, что подтверждает корректность методики обработки экспериментальных данных.

На двух наиболее продолжительных режимах с постоянными расходом воздушной плазмы, вводимой в реактор, и мощностями плазмотронов экспериментальные данные были усреднены и сопоставлены с расчетными (см. табл. 2). Сравнение показало, что данные хорошо согласуются по удельному выходу химической энергии и удовлетворительно — по составу синтез-газа. Расчеты проводились в приближении термодинамического равновесия и без учета теплопотерь. На этих режимах был также определен состав сырья, который соответствует древесине с влажностью 8–10 %. Хорошая согласованность по выходу химической энергии объясняется тем, что расход воздушной плазмы был выше стехиометрического в 2,8–3,0 раза. Это привело к значительному сокращению протяженности восстановительной зоны, поэтому теплопотери не оказали существенного влияния на состав. Более значительное расхождение по составу обусловлено высокой стабильностью метана. В целом результаты сравнения подтверждают применимость равновесного приближения для оценки основных параметров плазменной газификации.

Таким образом, применение низкотемпературной плазмы в процессе газификации твердого топлива, в частности биомассы, позволяет значительно увеличить содержание водорода и монооксида углерода в составе синтез-газа. Например, при переработке куриного помета их суммарное содержание удается повысить до ~97 %, что делает такой газ пригодным даже для производства жидких синтетических топлив по методу Фишера—Тропша. Эффективность процесса возрастает на 15–59 %, позволяя получать ~240–260 г топлива с 1 кг сырья при затратах на аллотермический процесс его переработки всего 4,7–6,0 МДж.

Организация процесса газификации наиболее эффективна при применении плазмотронов переменного тока, благодаря ресурсу работы электродов более 1000 часов, эффективности передачи энергии разряда плазмообразующему газу 80–95 %, мощности до 2 МВт при работе в длительных режимах и потерям в системе питания не более ~1–5 %. Достоверность выполненных оценок подтверждается хорошей согласованностью с экспериментальными данными, которые получены на крупномасштабном плаз-

менном газификаторе. Серия длительных экспериментов по плазменной газификации древесины свидетельствует о готовности технологии плазменной газификации биомассы с использованием плазмотронов переменного тока к внедрению в промышленность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Juanjuan, D.** The Analysis to the Influence of Carbon Dioxide Emissions in Different Countries [Текст] / D. Juanjuan, Z. Wenping // Energy Procedia.— 2011.— Vol. 5.— P. 2426–2431.

2. **Myhre, G.** New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases [Текст] / Myhre G., Highwood E.J., Shine K.P. [et all.] // Geophysical Research Letters.— Vol. 25.— P. 2715–2718.

3. **Peters, G.P.** MR Rapid growth in CO_2 emissions after the 2008–2009 global financial crisis [Текст] / G.P. Peters, G. Marland, C. Le Quéré [et all.].— Nature Climate Change.— 2012. № 2.

4. Key World Energy Statistics 2011. [Электрон. ресурс]/IEA.— 2011.— http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf.— Accessed 14 February 2012.

5. **Whitney, G.** (2011) U.S. Fossil Fuel Resources: Terminology, Reporting and Summary [Электрон. ресурс] / G. Whitney, C.E. Behrens, C. Glover.— CRS Report for Congress. — http://assets.opencrs.com/rpts/R40872_20110325.pdf.

6. **Li, M.** (2011) Peak Energy and the Limits to Global Economic Growth. [Электрон. ресурс] / M. Li // University of Utah // Annual Report 2011.— http://www.econ.utah.edu/~mli/Annual %20Reports/Annual %20Report %202011.pdf

7. **Hook, M.** Validity of the fossil fuel pro-duction outlooks in the IPCC Emission Scenarios [Текст] / M. Hook, A. Sivertsson, K. Aleklett.— Na-tural Resources Research.— 2010. Vol. 19. — P. 63–81.

8. **Ladanai, S.** Global Potential of Sustainable Biomass for Energy [Текст] / S. Ladanai, J. Vinterbдck.— Swedish University of Agricultural Sciences.— Uppsala, 2009.

9. **Ribaudo, M.** Manure Management forWater Quality: Costs to Animal Feeding Operations of Applying Manure Nutrients to Land. Agricultural Economic [Электрон. ресурс] / M. Ribaudo, N. Gollehon, M. Aillery / U.S. Department of Agriculture.—2003.— Report 824.— http://www.ers.usda.gov/publications/aer824/aer824.pdf.

10. **Popov, V.E.** Plasma gasification of waste as a method of energy saving [Текст] / V.E. Popov, A.N. Bratsev, V.A. Kuznetsov [et all.].— Journal of Physics: Conference Series.— 2011.— Vol. 275.

11. **Zhang, Q.** Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process [Текст] / Q. Zhang, L. Dor, D. Fenigshtein [et all.] // Applied Energy.— 2012. Vol. 90.— P. 106–112.

12. **Fourcault, A.** Modelling of thermal removal of tars in a high temperature stage fed by a plasma torch [Текст] / A. Fourcault, F. Marias, U. Michon // Biomass and Bioenergy.— 2010. Vol. 34.— P. 1363–1374.

13. **Nair, S.A.** Tar removal from biomass-derived fuel gas by pulsed corona discharges [Текст] / S.A. Nair, A.J.M. Pemen, K. Yana [et all.] // Fuel Processing Technology.— 2003. Vol. 84.— P. 161–173.

14. **Kärkkäinen, L.** Potential recovery of industrial wood and energy wood raw material in different cutting and climate scenarios for Finland [Текст] / L. Kärkkäinen, J. Matala, K. Härkönen [et all.] // Biomass and Bioenergy.— 2008. Vol. 32.— P. 934–943.

15. **Yoshioka, T.** Study on the Feasibility of a Harvesting, Transporting, and Chipping System for Forest Biomass Resources in Japan [Текст]: монография Vol. 1./ T. Yoshioka // AGri-Bioscience. — 2011.— Vol. 1. – P. 1–60.

16. **Green, D.W.** Perry's Chemical Engineers' Handbook [Текст] / D.W. Green, R.H. Perry // Eighth Edition, McGraw-Hill, United States, 2007.— 2400 p. ISBN 0-07-142294-3.

17. **Reijnders, L.** Transport biofuel yields from food and lignocellulosic C_4 crops [Текст] / L. Reijnders // Biomass and Bioenergy.— 2010. Vol. 34.— P. 152–155.

18. **Duffy, M.D.** Costs of producing Switchgrass for Biomass in Southern Iowa [Электрон. ресурс] / M.D. Duffy, V.Y. Nanhou / Iowa State University Extension.— Pm., 1866. – http://iowaswitchgrass.com/__docs/pdf/Costs %20of %20Switchgrass.pdf. Accessed 14 February 2012

19. **Weiland, N.T.** Product distributions from isothermal co-pyrolysis of coal and biomass [Текст] / N.T. Weiland, N.C. Means, B.D. Morreale // 2012. — Fuel 94.— P. 563–570.

20. **Ghaly, A.E.** An Innovative Farm Scale Biogas/Composting Facility for a Sustainable Medium Size Dairy Farm [Текст] / A.E. Ghaly, M. Al Hattab // American Journal of Agricultural and Biological Sciences.— 2012. № 7.— P. 1–14.

21. **MacDonald, J.M.** Profits, Costs, and the Changing Structure of Dairy Farming [Электрон. ресурс] / J.M. MacDonald, E.J. O'Donoghue, W.D. McBride [et all.] // U.S. Department of Agriculture.— 2007.— http://www.ers.usda.gov/publications/err47/err47.pdf. Accessed 14 February 2012

22. **Santoianni, D.A.** Power from Animal Waste—Economic, Technical, and Regulatory Landscape in the United States [Текст] / D.A. Santoianni, M.F. Bingham

[et all.] // Journal of Energy and Environment Conference.— 2008. № 2. Paper #01

23. **Hadrich, J.C.** Incorporating Environmentally Compliant Manure Nutrient Disposal Costs into Least-Cost Livestock Ration Formulation [Текст] / J.C. Hadrich, C.A. Wolf [et all.] // Journal of Agricultural and Applied Economics.— 2008. Vol. 40.— P. 287–300.

24. Environmental Code of Practice for Poultry Farms in Western Australia [Текст] / WA Government. The Department of Environment, Australia.— 2004.

25. **Roeper, H.** Low-Tech options for chicken manure treatment and application possibilities in agriculture [Текст] / H. Roeper, S. Khan [et all.] // Proc. Sardinia 2005.— Tenth International Waste Management and Landfill Symposium / Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy.— 2005.

26. **Giuntoli, J.** Quantitative and kinetic TG-FTIR study of biomass residue pyrolysis: Dry distiller's grains with solubles (DDGS) and chicken manure [Текст] / J. Giuntoli, W. de Jong [et all.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.— 2009. Vol. 85.— P. 301–312.

27. **Mkhabela, T.S.** Substitution of fertiliser with poultry manure: is this economically viable? [Текст] / T.S. Mkhabela // Agrekon.— 2004. Vol. 43.— P. 347–356.

28. **Brattsev, A.N.** Arc gasification of biomass: Example of wood residue [Текст] / A.N. Brattsev, V.A. Kuznetsov [et all.] // High Temperature.— 2011. Vol. 49.— P. 244–248.

29. **Moustakas, K.** Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its performance [Текст] / K. Moustakas, G. Xydis, S. Malamis [et all.] // Journal of Hazardous Materials.— 2008. Vol. 151.— P. 473–480.

30. **Bassily, A.M.** Enhancing the efficiency and power of the triple-pressure reheat combined cycle by means of gas reheat, gas recuperation, and reduction of the irreversibility in the heat recovery steam generator [Текст] / A.M. Bassily // Applied Energy.— 2008. Vol. 85.— P. 1141–1162.

31. Wood Biomass for Energy. [Электрон. ресурс] / U.S. Department of Agriculture.— 2004.— http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/techline/wood-biomass-for-energy.pdf. Accessed 16 February 2012

32. **Rutberg, P.G.** On efficiency of plasma gasification of wood residues [Текст] / Rutberg P.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A. [et all.] // Biomass and Bioenergy.— 2011. Vol. 35.— P. 495–504.

33. **Kobayashi, Y.** Extremely High-efficiency Thermal Power System-Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Triple Combined-cycle System [Текст] / Y. Kobayashi, Y. Ando [et all.] // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review.— 2011. Vol. 48.— P. 9–15.

34. **Rutberg, P.G.** Use of carbon dioxide in the chemical synthesis technologies, plasma gasification and carbon production [Текст] / P.G. Rutberg, V.A. Kuznetsov, A.N. Bratsev [et all.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.— 2011. Vol. 19:012003

35. **Bratsev, A.N.** Estimation of perspectivity of steam-plasma methane conversion [Текст] / A.N. Bratsev, V.A. Kuznetsov, V.E. Popov [et all.] // High temperature material processes: An international journal.— 2009. Vol. 13. Iss. 2.— P. 241–246.

36. **Bratsev, A.N.** Experimental Research of Air Gasification of Waste. The first results [Текст] / A.N. Bratsev, I.L. Glezin, V.B. Kovshechnikov [et all.] // Proc. of XXVIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases / Institute of Plasma Physics AS CR.— Prague. 2007.— P. 1848–1851.

37. **Kuznetsov, V.A.** Distinctive features of biomass gasification using ac plasma generators working on air // IEEE Pulsed Power Conference. Digest of Technical Papers 1976–2007 [Текст] / V.A. Kuznetsov, A.N. Bratsev [et all.] // Omnipress, Madison WI USA.— 2007.— P. 1223–1226.

38. **Bratsev, A.N.** Experimental development of methods on plasma gasification of coal as the basis for creation of liquid fuel technology [Текст] / A.N. Bratsev, V.A. Kuznetsov, V.E. Popov [et all.] // High temperature material processes: An international journal .— 2009. Vol. 13.— P. 147–154.

39. **Bratsev, A.N.** Air plasma gasification of RDF as a prospective method for reduction of carbon dioxide emission [Текст] / A.N. Bratsev, I.I. Kumkova, V.A. Kuznetsov [et all.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.— 2011. Vol. 19.— P. 012004.

40. **Mondal, P.** Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications — Recent developments [Текст] / P. Mondal, G.S. Dang, M.O. Garg // Fuel Processing Technology.— 2011. Vol. 92.— P. 1395–1410.

41. **Anis, S.** Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods [Текст] / S. Anis, Z.A. Zainal // Renewable and Sustainable Energy Reviews.— 2011. Vol. 15.— P. 2355–2377.

42. **Bahng, M-K.** Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing [Текст] / M-K. Bahng, C. Mukarakate [et all.] // Analytica Chimica Acta.— 2009. Vol. 651.— P. 117–138.

43. **Gomez, E.** Thermal plasma technology for the treatment of wastes [Текст] / E. Gomez, D.A. Rani [et all.] // Journal of Hazardous Materials.— 2009. Vol. 161.— P. 614–626.

44. **Yang, L.** Solid waste plasma disposal plant [Текст] / L. Yang, H. Wang, D. Wang [et all.] // Journal of Electrostatics.— 2011. Vol. 69.— P. 411–413.

45. **Puig-Arnavat, M.** Review and analysis of biomass gasification models. Renewable and Sustainable [Текст] / M. Puig-Arnavat, J.C. Bruno, A. Coronas // Energy Reviews.— 2010.— Vol. 14.— P. 2841–2851.

46. **Morrin, S.** Two stage fluid bed-plasma gasification process for solid waste valorisation: Technical review and preliminary thermodynamic modelling of sulphur emissions [Текст] / S. Morrin, P. Lettieri [et all.] // Waste Management.— 2012. Vol. 32.— P. 676–684.

47. **Loha, C.** Performance of fluidized bed steam gasification of biomass — Modeling and experiment [Текст] / C. Loha, P.K. Chatterjee [et all.] // Energy Conversion and Management.— 2011. Vol. 52.— P. 1583–1588.

48. **Minutillo, M.** Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant [Текст] / M. Minutillo, A. Perna [et all.] // Energy Conversion and Management.— 2009. Vol. 50.— P. 2837–2842.

49. **Karamarkovic, R.** Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures [Текст] / R. Karamarkovic, V. Karamarkovic // Energy.— 2010. Vol. 35.— P. 537–549.

50. **Atashi, H.** Kinetic study of Fischer–Tropsch process on titania-supported cobalt-manganese catalyst [Текст] / H. Atashi, F. Siami [et all.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry.— 2010. Vol. 16.— P. 952–961.

51. **Van Steen, E.** Fischer-Tropsch Catalysts for the Biomass-to-Liquid Process [Текст] / E. van Steen, M. Claeys // Chemical Engineering Technology.— 2008. — P. 655–666.

52. Alter NRG [Электрон. ресурс].— http://www.alternrg.com/. Accessed 21 February 2012

53. InEnTec [Электрон. ресурс].— http://www.inentec.com/. Accessed 21 February 2012

54. Advanced Plasma Power [Электрон. ресурс].— http://www.advancedplasmapower.com/. Accessed 21 February 2012

55. Plasco Energy Group [Электрон. ресурс].— http://www.plascoenergygroup.com/. Accessed 21 February 2012

56. PyroGenesis Canada Inc [Электрон. ресурс].— http://www.pyrogenesis.com/. Accessed 21 February 2012

57. **Rutberg, P.G.** Plasma pyrolysis of toxic waste [Текст] / P.G. Rutberg // Plasma Physics and Controlled Fusion.— 2003. Vol. 45.— P. 957–969.

58. **Rutberg, P.G.** Strong-current arc discharge of alternating current [Текст] / P.G. Rutberg, A.A. Safronov, V.L. Goryachev // IEEE Transactions on Plasma Science.— 1998. Vol. 26.— P. 1297–1306.

59. Electric Arc Heater Develops Very High Temperatures [Текст]. Iron and Steel Eng.— 1960, Vol. 37, № 11.— P. 149–150.

60. **Maniero, D.A.** Electric Arc Heaters for High-Temperature Chemical Processing [Текст] / D.A. Maniero, P.F. Kienast, C. Hirayama // Westinghouse Engineer.— 1966. Vol. 26, № 3.— P. 66–72.

61. **Harry, J.E.** A Power Frequency Plasma Torch for Industrial Process Heating [Текст] / J.E. Harry // IEEE Transactions on Industry and General Applications. IGA-6:36-42.

62. **Iwata, M.** Effect on transferred ac arc plasma stability of increasing ambient temperature and superimposing pulse at current zero point [Текст] / M. Iwata, M. Shibuya // Journal of Physics D: Applied Physics.— 1999. Vol. 32.— P. 2410–2415.

63. **Fey, M.G.** Patent 4013867 U.S. [Текст] / M.G. Fey.— 1977.

64. **Wolf, C.B.** Patent 3705975. U.S. [Текст] / C.B. Wolf, M.G. Fey.— 1972.

65. **Reed, J.F.** Electric Heater Development and Performance Data for a Mach 14 Wind Tunnel [Текст] / J.F. Reed., C.W. Peterson, W.H. Curry // Journal of Spacecraft and Rockets.— 1975. № 12.— P. 308–313.

66. Patent 3140421. U.S. [Текст] / R.M. Spongberg.— 1964.

67. Patent 2964678 U.S. [Текст] / J.W. Reid.— 1960.

68. Patent 2923811 U.S. [Текст] / E. Feldmeyer, E. Schallus.— 1960.

69. **Roots, W.K.** Measuring the Electrothermal Efficiency of a 50-Hz Plasma Torch [Текст] / W.K. Roots, M.A. Kadhim // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.— 1969.— Vol. 18.— P. 150–156.

70. **Рутберг, Ф.Г.** Трехфазный плазмотрон [Текст] / Ф.Г. Рутберг // Некоторые вопросы исследования газоразрядной плазмы и создания сильных магнитных полей. — Л.: Наука. Ленингр. отдние, 1970. — С. 8–19.

71. **Rutberg, P.G.** Multiphase Stutionary plasma generators working on oxidizing media [Текст] / P.G. Rutberg, A.V. Safronov, S.D. Popov [et all.] // Plasma Physics and Controlled Fusion.—2005. Vol. 47.— P. 1681–1696.

72. **Jenilьta, J.** Integrated parametric study of a hybrid-stabilized argon–water arc under subsonic, transonic and supersonic plasma flow regimes [Текст] / J. Jenilьta, H. Takana [et all.] // Journal of Physics D: Applied Physics.— 2011. Vol. 44.— P. 435204.

73. **Eschenbach, R.C.** Characteristics of High Voltage Vortex-Stabilized Arc Heaters [Текст] / R.C. Eschenbach, D.A. Bryson, H.B. Sargent [et all.] // IEEE Transactions on Nuclear Science.— 1964. Vol. 11.— P. 41–46.

74. **Paintes, J.H.** Performance and scaling characteristics of a Huels-type arc heater operating on hydrogen, helium or air [Текст] / J.H. Paintes, J.F. Saeffer // AIAA-14.— 1976.

75. **Boatright, W.B.** Langley facility for tests at Mach 7 of subscale, hydrogen-burning, airframe-integratable, scramjet models. AIAA-11 [Текст] / W.B. Boatright, A.P. Sabol [et all.] // 1970.

76. **Painter, J.H.** Hybrid arc air heater performance [Текст] / J.H. Painter // AIAA-111. 1976.

77. Westinghouse Plasma — Plasma Torches. [Электрон. ресурс].— http://www.westinghouse-plasma.com /technology/plasma-torches. Accessed 5 March 2012

78. NRG FOCUS — October 2011 Issue. [Электрон. ресурс].— http://alternrg.com/sites/default/files/content/all/NRG %20Focus_Sept %202011_FN_LR_LK.pdf?phpMyAdmin=1,25SWTwdk48LH,ZtfJ1P24LAkc. Accessed 5 March 2012

79. **Rutberg, P.** Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows [Текст] / P. Rutberg.— New York: Nova Science Publishers, 2009.

80. **Bratsev, A.N.** A facility for plasma gasification of waste of various types [Текст] / A.N. Bratsev, V.E. Popov, A.F. Rutberg, S.V. Shtengel' // High Temperature.— 2006. Vol. 44.— P. 823–828.

81. **Reed, T.B.** Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems [Текст] / T.B. Reed, A. Das // Solar Research Institute, Golden CO. 1998.

УДК 631.43

Ю.В. Галышев, А.Б. Зайцев, П.А. Варулин

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Дизельные двигатели занимают доминирующее положение в энергетических установках тяжелых транспортных машин, что объясняется в первую очередь их экономичностью, надежностью и долговечностью. В то же время с годами приоритеты отдельных требований к качествам дизелей изменяются. До 90-х годов прошлого столетия для автотракторных дизелей важность приоритетов отвечала такому порядку: тягово-мощностные качества, расход топлива, ресурсы топлива, токсичность отработавших газов (ОГ), технические возможности производства. Однако с начала 2000-х годов приоритеты выстраиваются в ином порядке: ресурсы топлива, токсичность отработавших газов, расход топлива, тягово-мощностные качества, технические возможности производства. Наиболее важная и актуальная задача современного дизелестроения — обеспечение жестких экологических норм, однако для потребителя, использующего дизельный двигатель, не менее важны и экономические аспекты его эксплуатации. Таким образом, следует ориентироваться как минимум на два основных направления повышения эксплуатационных показателей автотракторных дизелей: снижение токсичности отработавших газов и повышение топливной экономичности.

Среди способов решения обозначенных задач следует выделить те, которые реализуются через совершенствование топливоподающей аппаратуры (ТПА). Общая тенденция развития дизельной аппаратуры — это повышение максимального и среднего давления впрыскивания топлива. В современных системах топливоподачи дизелей максимальные давления впрыска уже превышают 200 МПа. Повышение давления впрыска топлива приводит к улучшению качества распыла, а электронное управление впрыском позволяет получать характеристики подачи, трудно реализуемые в чисто механических системах. С учетом этого цель работы была сформулирована как снижение токсичности и повышение экономичности дизельного двигателя путем совершенствования характеристик впрыска ТПА.

Для достижения цели было необходимо решить следующие задачи:

произвести анализ состояния разработок в области топливной аппаратуры и методов снижения токсичности ОГ с использованием возможностей ТПА;

провести эксперимент по снятию характеристик дизельного двигателя ЯМЗ-238НБ на двух скоростных режимах для получения базовых значений мощностных, экономических и экологических параметров его работы;

модифицировать методику расчета для организации функциональной связи формы характеристик впрыска с характеристиками тепловыделения в цилиндре дизеля;

выполнить моделирование процессов топливоподачи, рабочего процесса в камере сгорания и токсичности ОГ по оксидам азота NO_x дизеля с использованием результатов проведенного эксперимента на базе модифицированного комплекса программ расчета;

провести расчетное исследование возможностей применения двухфазной характеристики впрыска для снижения выбросов NO_x с одновременным улучшением топливной экономичности дизеля.

В работе в основном использованы расчетные методы исследований с использованием методик и программ, разрабатываемых на кафедре ДВС СПбГПУ. В качестве исходных данных для расчетов приняты данные, полученные в эксперименте, и чертежно-конструкторская документация на двигатель и топливную аппаратуру дизеля ЯМЗ-238НБ.

Проведенный обзор показал, что применение ТПА с электронным управлением позволяет получить различные характеристики впрыска, в частности «двухфазные», с минимальным (1,5–3,0 мм^3) объемом «пилотной» порции топлива. Кроме того, применение двухфазной характеристики подачи позволяет снизить максимальные и средние температуры цикла, что в свою очередь обусловливает снижение выбросов NO_x.

Эксперимент в данной работе проводился для получения действительных параметров рабочего процесса исследуемого двигателя и настройки программного комплекса для последующих расчетов.

В качестве объекта испытаний использован широко распространенный в нашей стране автотракторный дизель ЯМЗ-238НБ (8 ЧН 13/14). При проведении испытаний на тормозном стенде снимались нагрузочные характеристики на двух скоростных режимах: 1400 и 1700 об/мин. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний». Помимо стандартных измерений, производились измерения концентраций токсичных компонентов (CO, CH, NO_x и CO_2) в ОГ.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные, пересчитанные к нормальным атмосферным условиям: M_e — эффективный крутящий момент; N_e — эффективная мощность; $G_т$ и $G_в$ — часовые расходы топлива и воздуха; α — коэффициент избытка воздуха; g_e — удельный эффективный расход топлива; параметры токсичности ОГ измеряются в объемных процентах или ч.н.м. (частиц на миллион). Методом построения кривой расхода топлива экспериментально определен механический КПД $\eta_м$ для каждого режима, а далее — индикаторные показатели рабочего цикла, необходимые для настройки программы расчета рабочего процесса. Для настройки программы расчета топливоподачи определены вязкость и плотность топлива, использованного в эксперименте.

Изменение основных искомых в эксперименте показателей (токсичность по NO_x и удельный расход топлива g_e демонстрируют рис. 1 и 2.

Для организации функциональной связи между характеристиками впрыска и тепловыделения в цилиндре дизеля было сделано следующее. Во-первых, в программе расчета рабочего процесса организован ввод интегральной (рис. 3) и дифференциальной характеристик топливоподачи. Во-вторых, для основной фазы впрыскиваемого топлива введен расчет коэффициентов формулы Б.П. Пугачева [5] согласно методике,

Таблица 1

Нагрузочная характеристика дизеля ЯМЗ-238НБ при n = 1700 об/мин

M_e, кН·м	N_e, кВт	$G_т$, кг/час	$G_в$, кг/час	α	g_e, кг/кВт·час	CO, % об.	CH, ч.н.м.	NO_x, ч.н.м.	CO_2, % об.
0	0	8,8	748	5,95	–	0,033	14	123	1,70
0,196	35,0	13,3	766	4,04	0,380	0,034	14	277	2,62
0,365	65,1	18,9	801	2,98	0,290	0,035	15,3	540	3,61
0,548	97,6	24,8	839	2,37	0,254	0,036	17,0	752	4,73
0,632	112,6	28,2	871	2,16	0,250	0,041	16,0	867	5,27

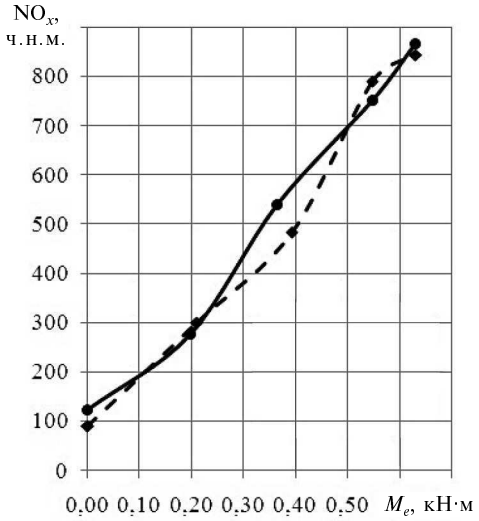


Рис. 1. Зависимость токсичности ОГ по компоненте NO_x от нагрузки на двигатель M_e

(— 14000 об/мин; — 17000 об/мин)

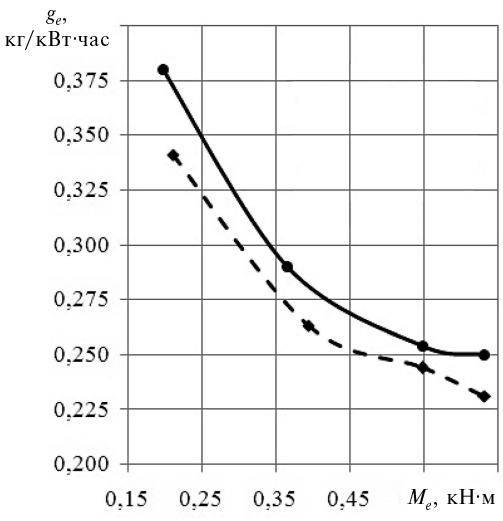


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива g_e от нагрузки на двигатель M_e

(— 14000 об/мин; — 17000 об/мин)

описанной там же, при этом полагают [4], что в первой (кинетическая) фазе сгорания выгорает 90 % топлива, поданного за период задержки самовоспламенения τ_i ($\tau_i = \varphi_i/6n$, где φ_i — угловая величина задержки самовоспламенения топлива).

Основываясь на формуле О.М. Тодеса [8], а также работах А.И. Толстова [9] и опубликованных экспериментальных данных по периодам задержки самовоспламенения для различных видов углеводородных топлив, на кафедре ДВС СПбГПУ получили формулу для расчета φ_i, учитывающую режим работы двигателя и характеристики воспламеняемости топлива:

$$\varphi_i = 2{,}2768 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{T}{P}} \exp\left(\frac{2500 + 10760/CN}{T}\right), \qquad (1)$$

где p и T — текущие значения давления и температуры газа в начальной стадии впрыска топлива; CN — цетановое число топлива.

Расчет по формуле (1) встроен в общую схему интегрирования дифференциальных уравне-

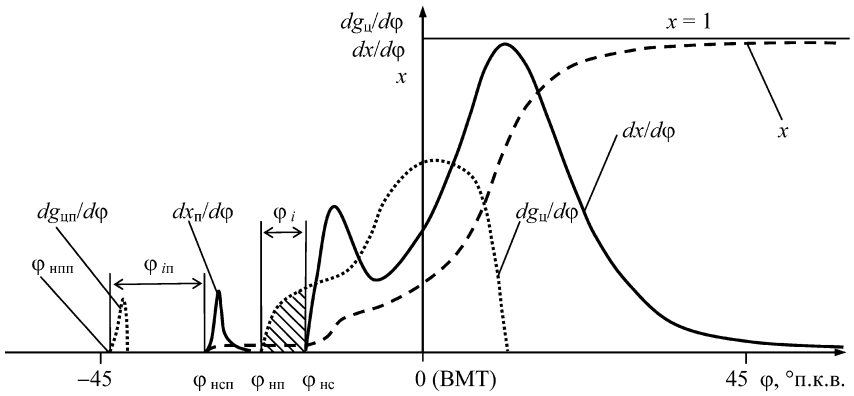


Рис. 3. Дифференциальная характеристика топливоподачи ($dg_ц/d\varphi$) интегральная (x) и дифференциальная ($dx/d\varphi$) характеристики тепловыделения для дизеля с двухфазной характеристикой подачи топлива

(индекс «п» соответствует предварительной части впрыска)

ний скорости изменения давления и температуры в цилиндре [7]. Мгновенное значение периода φ_i определяется согласно текущим термодинамическим параметрам на каждом шаге интегрирования до выполнения условия

$$\int_0^{\varphi_i} \frac{d\varphi}{\kappa_i} = 1, \qquad (2)$$

после чего фиксируется интегральное значение φ_i и определяется угол начала видимого сгорания: $\varphi_{нс} = \varphi_{нп} + \varphi_i$, где $\varphi_{нп}$ — угол начала подачи топлива.

В третьих, введен расчет тепловыделения для пилотной (предварительной) доли топлива. При моделировании ее выгорания приняты следующие допущения:

1. Угол опережения подачи пилотной части топлива $\varphi_{нпп}$ достаточно велик и составляет 25–45 °п.к.в. до ВМТ, в то же время для основной доли топлива ($j_{нп}$) он составляет 5–18 °п.к.в.

2. Промежуток времени, за который подается пилотная часть топлива, весьма мал по отношению к промежутку времени между впрысками.

3. Угол задержки воспламенения пилотной части впрыска ($\varphi_{iп}$), безусловно, больше, чем для основной (φ_i), но достаточно мал для того, чтобы предварительное топливо воспламенилось и полностью сгорело до подачи основной порции топлива.

Исходя из сказанного принято, что основная порция топлива будет воспламеняться и выгорать по «обычному» механизму [4], т. е. в кинетической и диффузионной фазах, с той только разницей, что угол задержки воспламенения для нее будет существенно меньше, чем он был бы в отсутствие пилотного впрыска.

При моделировании выгорания пилотной части впрыска принято, что эта порция топлива к моменту воспламенения полностью испарилась и перемешалась с окислителем, следовательно, она сгорает по кинетическому механизму, для описания чего можно использовать только первое слагаемое формулы Б.П. Пугачева

$$x = x_1\left[1 - e^{-\frac{k_1-1}{k_1}\left(\frac{\varphi-\varphi_{нс}}{\varphi_1}\right)^{k_1}}\right] + x_2\left[1 - e^{-\frac{k_2-1}{k_2}\left(\frac{\varphi-\varphi_{нс}}{\varphi_2}\right)^{k_2}}\right], \qquad (3)$$

где x — текущая доля выгоревшего топлива; x_1 и x_2 —доли топлива, выгоревшего соответственно в кинетической и диффузионных фазах; φ — текущий угол поворота коленчатого вала (п.к.в.); $\varphi_{нс}$ — угол начала видимого сгорания топлива; φ_1 и φ_2 — углы от начала видимого сгорания до момента достижения максимума скорости сгорания в соответствующих фазах; k_1 и k_2 — соответственно показатели характера выделения теплоты в кинетической и диффузионной фазах.

Угол задержки самовоспламенения для обоих долей подаваемого топлива адекватно описывается уравнением вида (1), что подтверждается сравнением расчетных значений с опубликованными в открытой печати данными. При значительном приближении пилотной части впрыска к основной и существенном увеличении ее доли (свыше 3–5 %) процесс сгорания к моменту подачи основной части топлива может быть еще не завершен. В этом случае, считается, основная доля топлива воспламеняется практически без задержки и выгорает по диффузионному механизму, для описания чего используется только второе слагаемое формулы (3).

Другие положения расчетных методик, использованных в данной работе, подробно рассмотрены в [1–7]. В целом, расчет для каждого отдельного режима работы двигателя выполняется по схеме: сначала рассчитывается процесс топливоподачи (результат — характеристика впрыска топлива), далее идет термодинамический расчет рабочего цикла (изменение давлений и температур в цикле, экономика цикла), затем — расчет образования оксидов азота.

Наличие экспериментальных данных позволило настроить программный комплекс под объект исследований, что дало возможность проводить расчетные исследования с целью снижения токсичности ОГ и улучшения экономичности работы двигателя, основываясь на действительных показателях работы дизеля ЯМЗ-238НБ.

Настройка расчета процесса топливоподачи производилась по цикловой подаче и продолжительности впрыска топлива. Основные характеристики процесса впрыска для режимов с n = = 1700 об/мин представлены в табл. 2

Таблица 2

Характеристики подачи топлива двигателя ЯМЗ-238НБ для режимов работы при n = 1700 об/мин

Номер режима	M_e, кН·м	h_a, мм	$g_ц$, г/цикл	$\varphi_{впр}$, °п.к.в.
1	0	0,143	0,0216	12
2	0,197	0,502	0,0326	16
3	0,365	0,858	0,0462	20
4	0,548	1,144	0,0608	23
5	0,632	1,350	0,0691	25

(здесь h_a — геометрический активный ход плунжера, $g_ц$ — цикловая подача топлива, $\varphi_{впр}$ — продолжительность впрыска) и на рис. 4.

Интегральные характеристики топливоподачи, полученные в настроечных расчетах, используются далее для подбора оптимальных параметров двухфазного впрыска без изменения формы. Для сохранения общего значения цикловой подачи на режиме производится только их нормирование согласно уменьшению основной доли впрыска за счет ввода пилотной части.

Моделирование рабочего процесса проводилось для режимов проведенного эксперимента с использованием расчетных характеристик топливоподачи (табл. 3). По полученным при моделировании индикаторным диаграммам произведена настройка программы расчета оксидов азота.

В табл. 3 приведены: M_e, N_e и p_e — расчетные значения эффективного момента, мощности и среднего эффективного давления, $p_к$ — давление наддува, p_z и T_z — максимальные значения давления и температуры в цикле, g_e — расчетный удельный эффективный расход топлива, η_e — эффективный КПД.

После настройки программного комплекса и получения удовлетворительного совпадения базовых расчетных и экспериментальных данных во исполнение поставленных целей проведено расчетное исследование по применению двухфазной характеристики впрыска топлива.

Как уже было сказано, в исследовании принято, что форма дифференциальной характеристики топливоподачи основной доли топлива при двухфазном впрыске идентична ей же при однофазном впрыске (рис. 5). Это достаточно справедливо при относительно малых значениях пилотной части впрыскиваемого топлива (до 5 % от $g_ц$). Общее значение цикловой подачи топлива на режиме сохраняется, а основная доля впрыска уменьшается на величину пилотной его части.

На рис. 6 показано изменение характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля при переходе на двухфазный впрыск. Подача пилотной части топлива и выгорание ее до подхода поршня к ВМТ поднимает давление и температуру рабочего тела к концу сжатия, поэтому предпламенные процессы для основной части подаваемого топлива протекают быстрее, а угол задержки самовоспламенения уменьшается. Благодаря этому уменьшаются доля топлива, выгорающая в кинетической фазе, и максимальная скорость тепловыделения (что отчетливо видно на рис. 6),

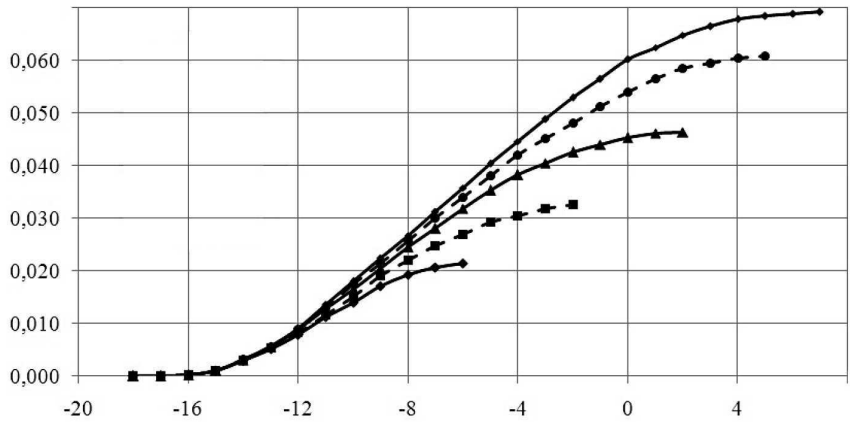


Рис. 4. Интегральные характеристики подачи топлива при n = 1700 об/мин:

— 1 режим; — 2 режим; — 3 режим; — 4 режим; — 5 режим;

Таблица 3

Характеристики рабочего процесса двигателя ЯМЗ-238НБ по нагрузочной характеристике при n = 1700 об/мин

Номер режима	M_e, кН·м	N_e, кВт	p_c, МПа	$p_к$, МПа	p_z, МПа	T_z, К	g_e, кг/кВт·час	η_e
1	0	0	0	0,107	6,47	1434	–	0
2	0,196	46,3	0,166	0,110	6,84	1540	0,381	0,221
3	0,367	65,4	0,310	0,117	6,99	1562	0,288	0,291
4	0,551	98,1	0,466	0,126	7,94	1675	0,253	0,333
5	0,638	113,6	0,540	0,132	8,12	1693	0,248	0,340

рабочий процесс становится более «мягким», снижаются максимальная скорость нарастания давления, средние и максимальные температуры рабочего цикла, что в свою очередь предопределяет снижение NO_x в ОГ.

Методом подбора угла опережения и объема подаваемого топлива в первой фазе находилось оптимальное (между снижением NO_x и повышением эффективных показателей рабочего процесса) решение. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Снижение удельного эффективного расхода топлива и токсичности ОГ по компоненте NO_x двигателя ЯМЗ-238НБ при применении двухфазной характеристики впрыска относительно однофазной графически отображено на рис. 7 и 8.

Аналогичные данные получены и для нагрузочных режимов при 1400 об/мин. В среднем по исследованным режимам работы дизеля снижение эмиссии NO_x составляет около 15 %, удельного эффективного расхода топлива — 3–4 %.

В результате оптимизационных расчетов были получены наиболее подходящие моменты начала впрыска топлива в первой и второй фазах подачи, а также объем топлива, подаваемый в предварительной фазе (3 мм^3). Полученные характеристики впрыска могут быть реализованы в ТПА с электронным управлением, в частности традиционного типа, но с применением электронно-управляемого клапана на сливе.

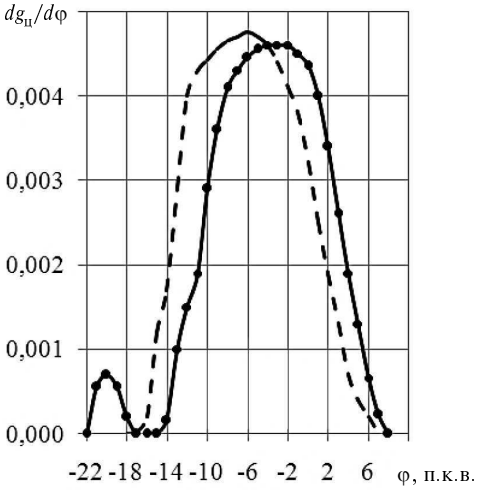


Рис. 5. Дифференциальные характеристики впрыска при n = 1700 об/мин и M_e = 0,638 кН·м
(– – – однофазные; —●— двухфазные)

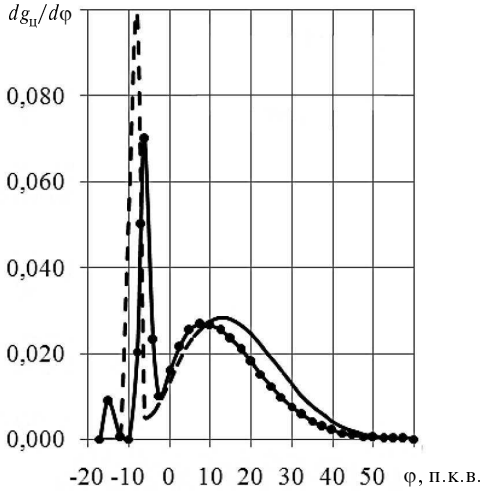


Рис. 6. Дифференциальные характеристики тепловыделения при n = 1700 об/мин и M_e = 0,638 кН·м
– – – однофазные; —●— двухфазные)

Таблица 4

Результаты оптимизации параметров двухфазного впрыска с целью улучшения экономичности и снижения токсичности дизеля ЯМЗ-238НБ при n = 1700 об/мин

Номер режима	M_e, кН·м	Вид впрыска	NO_x, ч.н.м.	ΔNO_x, %	g_e, кг/(кВт·час)	Δg_e, %
1	0	однофазный	134	–9,0	–	–
		двухфазный	122		–	
2	0,196	однофазный	291	–13,7	0,380	–2,1
		двухфазный	251		0,372	
3	0,367	однофазный	510	–17,6	0,290	–3,1
		двухфазный	420		0,281	
4	0,551	однофазный	680	–23,4	0,254	–4,7
		двухфазный	521		0,242	
5	0,638	однофазный	810	–28,1	0,250	–5,6
		двухфазный	582		0,236	

В целом применение двухфазного впрыска позволило получить следующее:

средний удельный эффективный расход топлива по режимам снизился на 3–4 % с тенденцией к большему снижению на режимах с высокой нагрузкой. Максимальное снижение (5,6 %) достигнуто на режиме n = 1700 об/мин при максимальной нагрузке;

эффективный КПД в среднем по режимам увеличился на 4,25 %;

мощность двигателя на расчетных режимах увеличилась до 4 % при той же цикловой подаче топлива;

уменьшение максимальной скорости тепловыделения до 25 % приводит к снижению жесткости рабочего процесса;

наиболее эффективный результат достигнут по снижению эмиссии оксидов азота: от 7 до 21 % при скорости вращения вала 1400 об/мин и от 14 до 28 % при 1700 об/мин. Большие значения со-

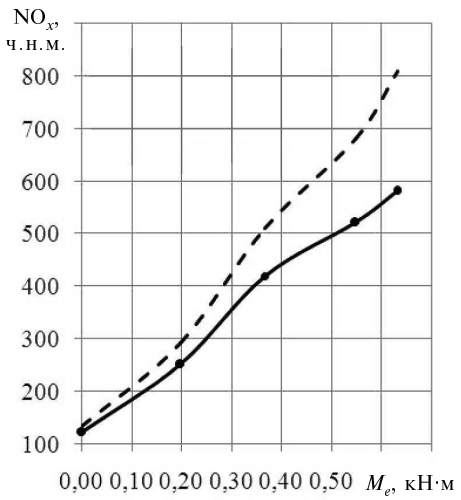


Рис. 7. Изменение эмиссии оксидов азота NO_x от нагрузки при n = 1700 об/мин
(– – – однофазные; —●— двухфазные)

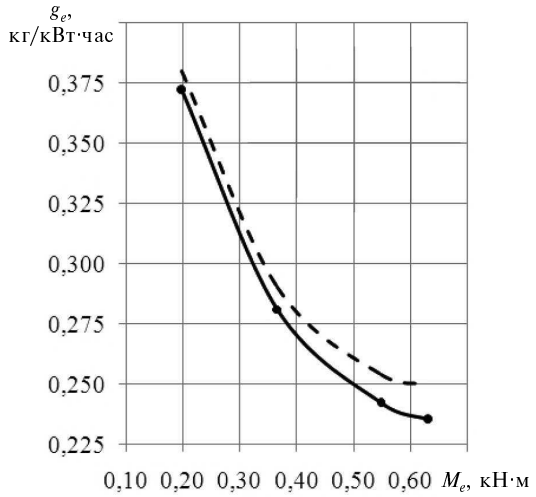


Рис. 8. Изменение удельного эффективного расхода топлива g_e от нагрузки при n = 1700 об/мин
(– – – однофазные; —●— двухфазные)

ответствуют максимальной нагрузке на данном скоростном режиме.

Таким образом, полученные результаты говорят о целесообразности применения двухфазной характеристики подачи топлива в уже существующих и проверенных десятилетиями дизельных двигателях с целью улучшения показателей их экономичности и снижения токсичности ОГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Батурин, С.А.** Расчетное определение содержания окислов азота в отработавших газах ДВС [Текст] / С.А. Батурин, А.С. Лоскутов, В.Н. Степанов.— Л.: ЛПИ, 1989.— 34 с.

2. **Горбунов, В.В.** Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев.— М.: Изд-во РУДН, 1998.— 214 с.

3. **Грехов, Л.В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов [Текст] / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков.— М.: Легион-Автодата, 2004.— 344 с.

4. **Дьяченко, Н.Х.** Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Б.П. Пугачев и др.; под ред. Н.Х. Дьяченко.— Л.: Машиностроение, 1974.— 552 с.

5. **Костин, А.К.** Работа дизелей в условиях эксплуатации [Текст]: Справочник / А.К. Костин, Б.П. Пугачев, Ю.Ю. Кочинев; под общ. ред. А.К. Костина.— Л.: Машиностроение, 1989.— 284 с.: ил.

6. **Лышевский, А.С.** Системы питания дизелей [Текст] / А.С. Лышевский.— М.: Машиностроение, 1981.— 216 с.

7. **Петриченко, Р.М.** Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ [Текст] / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко.— Л.: Машиностроение, 1990.— 328 с.: ил.

8. **Тодес, О.М.** Теория теплового взрыва [Текст] / О.М. Тодес // Журнал физической химии.— 1937. Т. 13.— С. 868–882.

9. **Толстов, А.И.** Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного дизеля [Текст] / А.И. Толстов // Тр. НИЛД.— 1955. № 1.— С. 13–21.

УДК (621.438 + 621.165) 001.2

К.Л. Лапшин

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ТУРБИНЫ, ПОЛУЧАЕМАЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФУЗОРА ЗА ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНЬЮ

Современные паровые и газовые турбины с целью получения дополнительной мощности, как правило, оснащаются диффузором за последней ступенью. Вместе с тем применение диффузора существенно увеличивает габариты, массу и стоимость турбины. Поэтому на этапе выбора оптимальной конструкции турбины важно иметь возможность простыми средствами приближенно оценить дополнительную мощность, развиваемую турбиной за счет применения диффузора.

Проблема целесообразности применения диффузора за последней ступенью турбины детально рассмотрена профессором И.И. Кирилловым [1]. По этой теме он даже читал образцовые лекции для преподавателей и студентов кафедры турбиностроения Ленинградского политехнического института. Так, если рассматривать течение в последней ступени турбины и диффузоре как одномерное течение идеального газа, то дополнительная удельная мощность H_u последней ступени, полученная за счет применения диффузора, может быть вычислена по формуле

$$\Delta H_u = \frac{c_2^2 - c_д^2}{2}, \qquad (1)$$

где c_2 — скорость рабочего тела за последней ступенью, $c_д$ — скорость рабочего тела за диффузором [1].

Рассмотрим одномерное адиабатное течение совершенного газа с трением в последней сту-

пени и диффузоре. Система уравнений для анализа такого течения дана, например, в монографии [2]. Фрагменты процесса расширения газа в последней ступени и диффузоре в h–s диаграмме представлены на рис. 1. Если бы диффузор отсутствовал, то за последней ступенью установилось бы давление $p_н$ окружающей среды. Удельная мощность последней ступени соответствовала бы величине H_u. За счет установки диффузора давление за последней ступенью понижается до величины p_2, а удельная мощность последней ступени увеличивается до величины $H_{ид}$. Таким образом, приращение удельной мощности турбины за счет установки диффузора соответствует величине H_u.

Примем, что скорости c_2 газа за последней ступенью турбины в установках с диффузором и без диффузора одинаковы. Тогда приращение удельной мощности за счет установки диффузора [1] в соответствии с рис. 1

$$\Delta H_u = \frac{c_2^2 - c_\partial^2}{2} - a - b. \qquad (1)$$

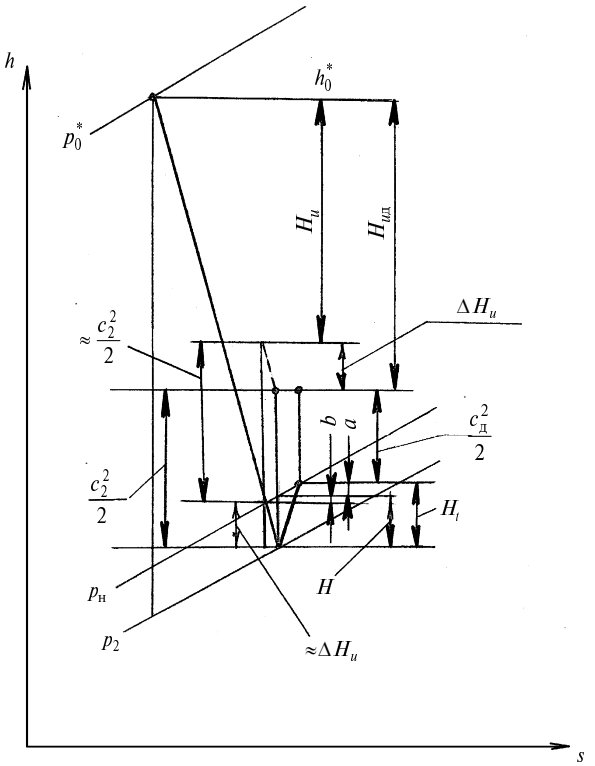


Рис. 1. Процесс расширения и сжатия газа в последней ступени турбины и диффузоре

Перепады энтальпий a и b можно вычислить следующим образом:

$$a = H_t - H = H\left(\frac{1}{\eta_д} - 1\right); \qquad (2)$$

$$b = H - \Delta H_u = H(1 - \eta_2), \qquad (3)$$

где H — изоэнтропийный перепад энтальпий в диффузоре; $\eta_д$ — изоэнтропийный КПД диффузора; η_2 — изоэнтропийный КПД рабочей решетки последней ступени турбины.

Подставив (2) и (3) в (1), после преобразований получим

$$\Delta H_u = \frac{c_2^2 - c_\partial^2}{2}\eta_д\eta_2. \qquad (4)$$

Сравнивая формулы (1) и (4), видим, что они различаются лишь двумя сомножителями в правой части. Влияние КПД $\eta_д$ диффузора на дополнительную мощность турбины H_u иллюстрирует рис.2. Штриховой линией на рис. 2 показан процесс сжатия в диффузоре с пониженным КПД. В этом случае за турбиной устанавливается давление $p_{22} < p_{21}$, а дополнительная удельная мощность H_u снижается на величину δH_u.

Влияние КПД η_2 рабочей решетки последней ступени турбины на дополнительную мощность турбины H_u иллюстрирует рис. 3. Штриховой линией на рис. 3 показан процесс расширения в рабочей решетке с пониженным КПД. В этом случае дополнительная удельная мощность H_u снижается на величину δH_u.

Таким образом, дополнительная мощность турбины за счет установки диффузора может быть вычислена по формуле

$$\Delta N = G\Delta H_u = G\frac{c_2^2 - c_\partial^2}{2}\eta_д\eta_2. \qquad (5)$$

В некоторых случаях удобнее использовать формулу (5) в преобразованном виде. Так, привлекая уравнение неразрывности $G = \rho c F \sin\alpha = \text{const}$, вместо формулы (4) запишем

$$\Delta H_u = \frac{c_2^2}{2}\left(1 - \left(\frac{\rho_2 F_2 \sin\alpha_2}{\rho_д F_д \sin\alpha_д}\right)^2\right)\eta_д\eta_2, \qquad (6)$$

где F_2 — аксиальная площадь за последней ступенью турбины; $F_д$ — аксиальная площадь на

выходе из диффузора; α_2 — угол выхода потока из последней ступени; $\alpha_д$ — угол выхода потока из диффузора.

Теперь увеличение мощности турбины за счет установки диффузора за последней ступенью можно приближенно вычислить с помощью простой инженерной формулы

$$\Delta N = G\Delta H_u = G\frac{c_2^2}{2}\left(1-\left(\frac{\rho_2 \sin\alpha_2}{S_д \rho_д \sin\alpha_д}\right)^2\right)\eta_д\eta_2, \quad (7)$$

где $S_д = F_д / F_2$ — степень расширения диффузора. В соответствии с формулой (7) дополнительная мощность ΔN увеличивается с ростом массового расхода и скорости газа за турбиной, а также с увеличением КПД рабочей решетки последней ступени турбины, КПД диффузора и степени расширения диффузора, что представляется логичным. Чем совершеннее процесс сжатия в диффузоре, тем больше плотность $\rho_д$, и тем самым в соответствии с формулой (7) также увеличивается мощность ΔN. Наибольший выигрыш мощностиΔN от применения диффузора реализуется при осевом выходе потока из последней ступени турбины и диффузора, что характерно для номинального режима работы турбины. На переменных режимах угол α_2 выхода потока из турбины неизбежно отклоняется от соответствующего осевому направлению. Если средние диаметры аксиальных кольцевых площадей F_2 и $F_д$ одинаковы, то из условия сохранения момента скорости $c_u r = \text{const}$ вдоль средней поверхности тока в сечении на выходе из диффузора будем иметь такую же окружную скорость c_u, что и за турбиной. В то же время осевая скорость c_z на выходе из диффузора меньше, чем угол за турбиной, поэтому угол $\alpha_д$ выхода потока из диффузора отклоняется от осевого направления существенно больше, чем угол α_2 за турбиной. При этом в соответствии с формулой (7) дополнительная мощность ΔN уменьшается, что физически объясняется увеличением скорости $c_д$ на выходе из диффузора.

Формула (7) также указывает пути рационального проектирования диффузоров за последней ступенью турбины. Для увеличения дополнительной мощности ΔN на переменных режимах полезно развивать диффузор, наращивая его средние диаметры от входного сечения к выходному, в пределе переходя к конструкции осерадиального диффузора. В осерадиальном диффузоре за счет увеличения радиуса средней поверхности тока скорость c_u может быть существенно уменьшена, что благоприятно скажется на увеличении угла $\alpha_д$ выхода потока из диффузора.

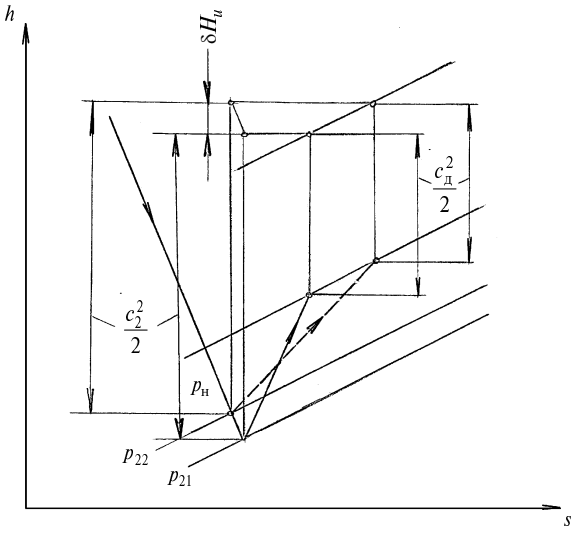


Рис. 2. Влияние КПД диффузора на удельную мощность турбины

Для того, чтобы воспользоваться формулой (7), необходимо выполнить, как минимум, одномерный газодинамический расчет течения газа в диффузоре. Вместе с тем на этапе выбора облика конструкции турбины и диффузора для номинального режима при осевом выходе потока

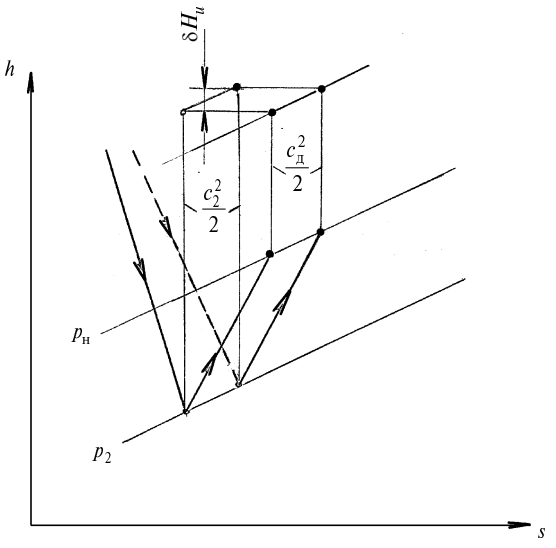


Рис. 3. Влияние КПД рабочей решетки на удельную мощность турбины

из турбины может представлять интерес сугубо приближенная оценка дополнительной мощности ΔN. Для этой цели можно использовать формулу (7) в следующем виде:

$$\Delta N = G\Delta H_u = G\frac{c_2^2}{2}\left(1-\frac{1}{S^2}\right)\eta_д\eta_2. \qquad (8)$$

Формула (8) не требует детального анализа течения газа в диффузоре и поэтому удобна на этапе предварительного выбора конструкции турбины и диффузора.

Разработанный подход к приближенной оценке дополнительной мощности, развиваемой турбиной за счет применения диффузора за последней ступенью, прежде всего имеет важное методическое значение при чтении курса «Энергетические машины. Раздел: Теория турбомашин» и выполнении курсового и дипломного проектирования, а также бакалаврских и магистерских работ. Предложенная методика позволяет простыми средствами выполнить анализ основных факторов, влияющих на эффективность использования диффузора за последней ступенью осевой паровой или газовой турбины.

В технических приложениях эта методика может быть использована не только на этапе предварительного выбора рациональной конструкции диффузора за последней ступенью турбины, но также — после насыщения ее экспериментальными данными о влиянии на КПД диффузора геометрических и режимных параметров — и в задачах многорежимной компьютерной оптимизации проточных частей многоступенчатых осевых паровых или газовых турбин совместно с диффузором за последней ступенью. Методические рекомендации по постановке и решению задач многорежимной компьютерной оптимизации проточных частей многоступенчатых осевых паровых и газовых турбин различного назначения, в том числе и в составе теплоэнергетических установок, рассмотрены, например, в монографии [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кириллов, И.И.** Теория турбомашин [Текст]: монография / И.И. Кириллов.— Л., 1972.— 536 с.

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

УДК 621.165.001.5

А.С. Лисянский, В.А. Рассохин, Е.Ю.Семакина, В.А.Черников

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНОГО ПАТРУБКА ЦНД МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Темпы роста единичных мощностей выпускаемых атомных паровых турбин определяются главным образом удешевлением стоимости установленного киловатта электростанции при увеличении единичной мощности АЭС. Так, в 1979 году в СССР была выпущена одна из первых паровых турбин для АЭС мощностью 220 МВт [1], а в 2008 году фирмой Siemens AG PG была изготовлена турбина мощностью 1900 МВт для АЭС в Финляндии [2], что почти в 9 раз превышает мощность первой.

Наряду с этим невысокие начальные параметры пара большинства АЭС и относительно низкая температура промперегрева обусловливают больший удельный расход пара по сравнению с турбоустановками, работающими на органическом топливе. Так, например, удельный расход пара влажнопаровой турбины для АЭС

мощностью 1000 МВт — $\dot{m}$ =5,8 кг/(кВт·ч), тогда как турбина сверхкритических параметров пара для ТЭС мощностью 1200 МВт расходует около $\dot{m}$ =3 кг/(кВт·ч), что на 90 % меньше, чем в указанной АЭС.

Таким образом, количество пара, поступающего в единицу времени в конденсатор влажнопаровой турбины, для АЭС примерно в 1,9 раза больше, чем в установке той же мощности, но работающей при сверхкритических начальных параметрах пара. Эти причины определяют характерную и весьма важную для конструктора черту мощных турбин для АЭС — развитые части низкого давления и их особую роль в общих экономических показателях АЭС. В этих условиях аэродинамическое совершенствование качества выходного патрубка ЦНД становится актуальной научной задачей, решение которой, хотя бы частичное, сулит заметные экономические выгоды.

Нужно отметить, что проблеме аэродинамического совершенствования выходного патрубка ЦНД посвящено большое количество исследований [3–5 и др.]. С использованием методов численного моделирования в ряде работ изучено влияние кольцевого дефлектора осерадиального диффузора на эффективность работы выходного патрубка ЦНД.

Исследования, о которых идет речь дальше, проведены на модели конструкции нового выходного патрубка ЦНД паровой турбины большой мощности.

Экспериментальный стенд

Для аэродинамических исследований выходного патрубка ЦНД, который в натурной машине выполняется в виде двухпоточной системы, выбрана модель одного потока в предположении строгой симметричности течения относительно поперечной плоскости ЦНД, разделяющей двухпоточную конструкцию на две половины.

Внешний вид экспериментального стенда ЭС-ОВ-ЦНД лаборатории турбиностроения имени И.И. Кириллова показан на рис. 1. Кроме крупномасштабной модели выходного патрубка стенд включает в себя подводящий тракт с расходомерным соплом и уравнительным ресивером, координатную оптико-электрическую систему для траверсирования потока во входном сечении, координатное устройство для перемещения пятиканальных пневматических векторных зондов, а также автоматизированную информационно-

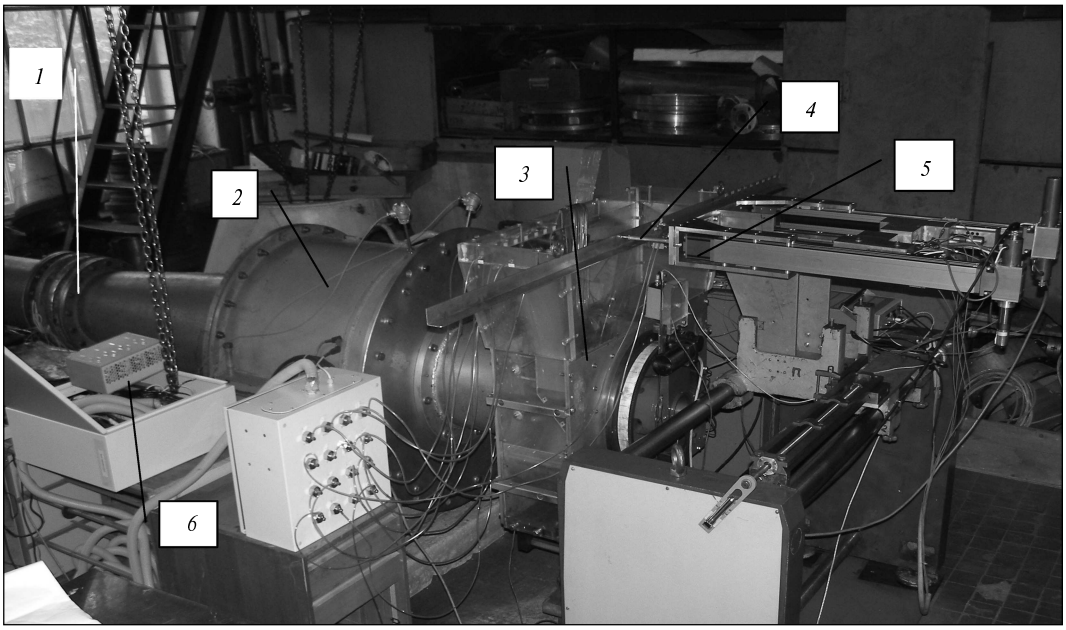


Рис. 1. Экспериментальный стенд ЭС–ОВ–ЦНД для исследований выходных патрубков:

1 — подводящий тракт с расходомерным соплом; *2* — уравнительный ресивер; *3* — модель патрубка; *4* — пятиканальные пневматические векторные зонды; *5* — координатное устройство; *6* — автоматизированная информационно-измерительная система

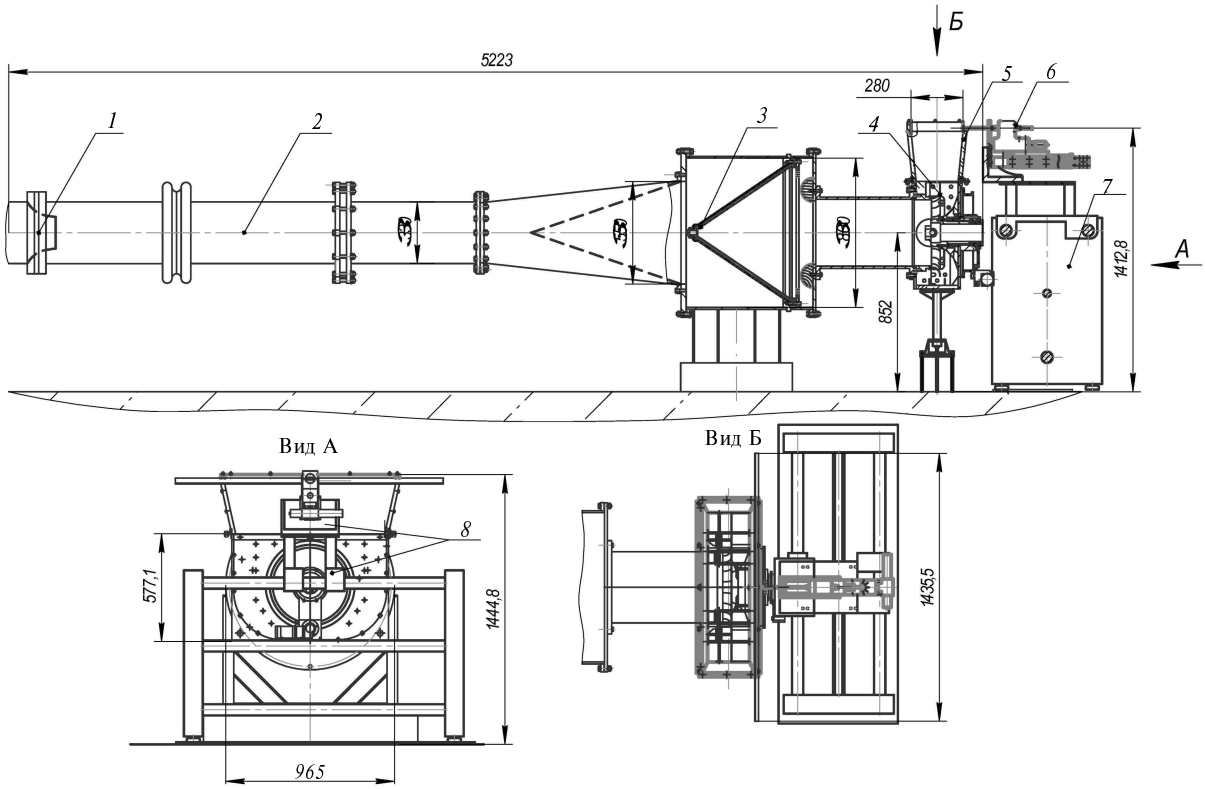


Рис. 2. Чертеж продольного разреза экспериментального стенда ЭС–ОВ–ЦНД для исследований выходных патрубков:

1 — расходомерное сопло; *2* — подводящий тракт; *3* — уравнительный ресивер; *4* — модель патрубка; *5* — модель переходного диффузора; *6* — пятиканальный пневматический зонд

измерительную систему. Чертеж продольного разреза стенда представлен на рис. 2.

Модель патрубка

Модель выходного патрубка ЦНД, выполненная в масштабе $k = 1{:}12$ (рис. 3), состоит из корпуса, осерадиального диффузора и переходного диффузора, соединяющего выходной патрубок с горловиной конденсатора.

Жесткость корпуса в прототипе обеспечивает система внутренних распорных цилиндрических стержней, которые имитируются в модели соответствующими стержнями. В тракте прототипа после осерадиального диффузора для организации потока и обеспечения необходимой жесткости конструкции используются перфорированные и сплошные ребра, которые также моделируются с необходимой точностью с помощью пластин.

Проточная часть осерадиального диффузора образована наружной и внутренней осесимметричными поверхностями (см. рис. 2 и 3). Наружный обвод диффузора представляет собою двадцатиугольник при входе в него, который составлен из 20 примыкающих друг к другу специально спрофилированных пластин. Эти пластины при выходе из диффузора в радиальной части образуют кольцевую торцевую плоскость. Как по входным, так и по выходным кромкам все пластины соединены кольцевыми деталями, а по торцевым боковым плоскостям — с помощью пайки.

Внутренний корневой обвод диффузора представляет собой сочетание отдельных концентрических конических втулок, образующих точную копию (в масштабе) натурной внутренней поверхности диффузора.

Основной корпус патрубка составлен из трех частей:

передней панели с расточкой для втулки периферийного обвода, имитирующей подвод потока из последней ступени;

основного корпуса модели патрубка, выполненного из листового оргстекла с толщиной листа 20 мм;

задней несущей панели с координатным устройством, механизмом поворота и конусными обводами наружной поверхности диффузора.

Во внутренней полости модели патрубка располагаются: система радиальных пластинчатых ребер, точно моделирующих соответствующие ребра жесткости в натурном патрубке; поперечная перегородка в нижней части патрубка; две симметрично расположенные пластины-укосины; два направляющих ребра; два ребра жесткости; распорные стержни, имитирующие соответствующие детали в натурном патрубке.

В проточной части патрубка все особенности конструкции моделируют вставки: две вставки, имитирующие особенности проточной части в нижней половине патрубка; симметричный выступ в верхней половине (в крышке патрубка), наличие которого диктуется обеспечением доступа к заднему подшипнику в натурной конструкции; выступ у передней стенки патрубка, имитирующий контуры паропровода в систему регистрации; плоские цилиндрические упорышайбы у всех распорных стержней, расположенные с двух сторон у каждого из стержней.

Таким образом, геометрия проточной части модели полностью соответствует геометрии внутренней полости натурного патрубка.

Важнейшая составная часть конструкции выходного тракта — переходный прямоугольный диффузор, соединяющий патрубок с горловиной конденсатора. Именно на выходе из переходного диффузора необходимо добиваться по возможности равномерного потока с наименьшими потерями кинетической энергии по тракту.

Модель переходного диффузора выполнена также в масштабе k=1:12 с точным соблюдением геометрического подобия. Материал стенок диффузора — оргстекло толщиной 20 мм выбран с целью возможной визуализации потока при аэродинамических исследованиях выходящего потока.

Измерительная система

Схема предусматривает измерения в нескольких сечениях патрубка (рис. 4). Входное сечение в патрубок соответствует выходному сечению за последней ступенью натурной турбины, поэтому в соответствии с принятыми обозначениями это контрольное сечение имеет номер 2-2. Контрольное измерительное сечение 2-2 выбрано на расстоянии $0{,}082l_2$ от оси рабочей

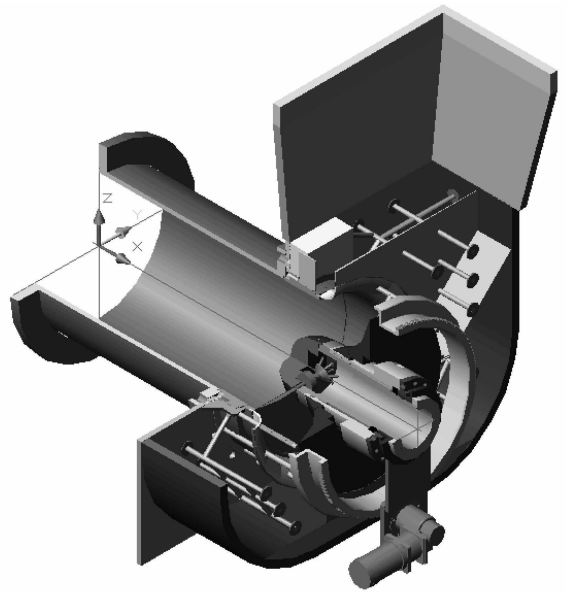


Рис. 3. Твердотельная модель выходного патрубка ЦНД.1

(модель конструкции лаборатории турбиностроения СПбГПУ, масштаб моделирования 1:12)

лопатки последней ступени. В этом сечении располагается ось приемных отверстий «гребенки» для измерения поля полного давления входящего потока в модели патрубка. Обтекатель, моделирующий корневую втулку турбины за последней ступенью, в которой расположена «гребенка» полного давления, выполнен в виде поворотной втулки для обеспечения траверсирования поля потока при входе в кольцевом сечении 2-2 в пределах изменения координатного угла θ_2 от 0 до 360°. Угловое перемещение поворотной втулки производится через рычаг, на котором закреплен планетарно-червячный редуктор (тип УР-7М) с электродвигателем (тип МУ 320). Выходная цилиндрическая шестерня редуктора находится в зацеплении с зубчатым колесом, неподвижно закрепленным на корпусе модели (см. рис. 3).

На периферийном обводе сечения 2-2 предусмотрено 8 дренажных отверстий диаметром 1 мм для измерения распределения давления p_2'' по окружности, а у корня — два дренажных отверстия для измерения распределения давления p_2' в потоке у втулки. Так как конструкция модели специально выполнена с поворотной втулкой, то число измерений по окружности выбирается во время эксперимента в зависимости от неравномерности распределения p_2' по окружности.

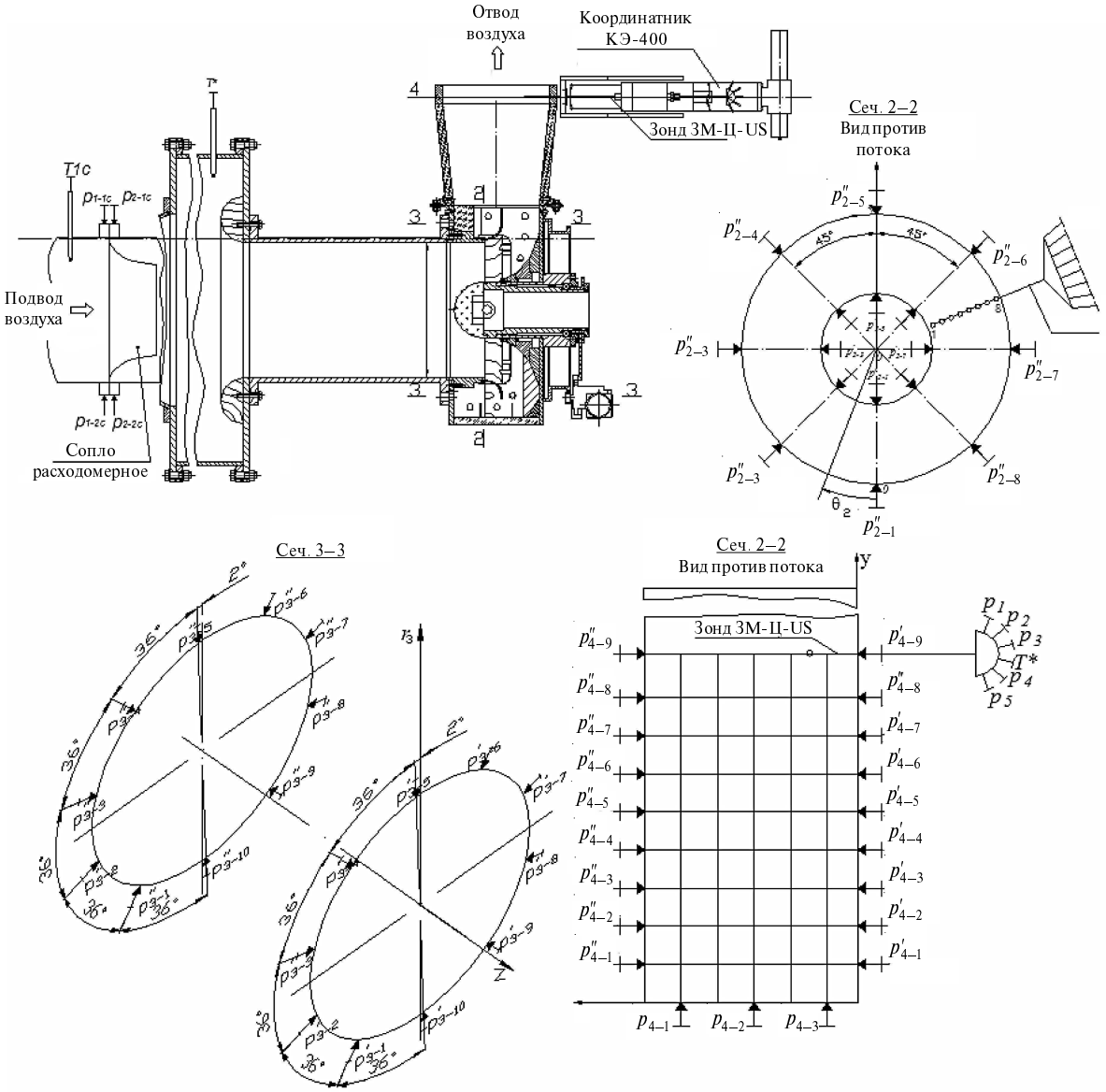


Рис. 4. Схема измерений стенда ЭС–ОВ–ЦНД

Полная температура в сечении 2-2 равна температуре торможения потока в ресивере $T_2^* = T_{\text{рес}}^*$ (см. рис. 4). Заметим, что процесс течения в выходном патрубке адиабатен, а следовательно, температура торможения в любом сечении потока остается постоянной.

Контрольное сечение 3-3 за осерадиальным диффузором имеет по восемь равнорасположенных дренажных отверстий на внутреннем (втулочном) и наружном обводах проточной части для измерения распределения статического давления p_3 в этом сечении (см. рис. 4).

В сечении 4-4 при выходе из переходного диффузора выполнено 21 дренажное отверстие по обводу этого сечения для измерения распределения пристеночного статического давления p_4. В этом же сечении предусмотрено траверсирование 3D-потока с помощью пятиканальных зондов фирмы United Sensors (см. рис. 4). Схема траверсирования может изменяться в зависимости от действительной структуры выходного потока, которая может определяется только экспериментом.

Измерение расхода воздуха через патрубок производилось с помощью расходомерного со-

пла в соответствии с нормативами на расходомерные устройства.

Представленная схема обеспечивает измерение всех необходимых газодинамических величин для вычисления интегральных характеристик выходного патрубка ЦНД совместно с переходным диффузором ПД–ЦНД–К, а также полей скорости и параметров 3D-потока в характерных сечениях его проточной части. Сбор и обработка экспериментальных данных проводились с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы [7].

Методика обработки экспериментальных данных

Основными суммарными (интегральными) аэродинамическими характеристиками патрубка являются следующие величины:

коэффициент патрубка совместно с переходным диффузором

$$\zeta_{\text{п+п д}} = \frac{p^*_{2\text{ср}} - p_{4\text{ср}}}{\rho_{2\text{ср}} c^2_{2\text{ср}} / 2}; \qquad (1)$$

коэффициент сопротивления патрубка

$$\zeta = \frac{p^*_{2\text{ср}} - p^*_{4\text{ср}}}{\rho_{2\text{ср}} c^2_{2\text{ср}} / 2}, \qquad (2)$$

где $p^*_{2\text{ср}}$ и $p^*_{4\text{ср}}$ — среднее полное давление соответственно во входном сечении 2-2 и в выходном сечении 4-4 переходного диффузора;

коэффициент кинематической неравномерности потока

$$\chi = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c_{\text{ср}}}, \qquad (3)$$

где $c_{\max}$, $c_{\min}$ и $c_{\text{ср}}$ — максимальная, минимальная и средняя величины скорости потока в исследуемом сечении;

коэффициент восстановления давления осерадиального диффузора

$$C_p = \frac{p_{3\text{ср}} - p_{2\text{ср}}}{\rho_{2\text{ср}} c^2_{2\text{ср}} / 2}, \qquad (4)$$

где $p_{2\text{ср}}$, $p_{3\text{ср}}$ — средние статические давления в сечении 2-2 и 3-3 при входе и выходе потока из осерадиального диффузора.

Средние величины для того или иного конкретного сечения патрубка рассчитываются исходя из уравнений сохранения, написанных для реального и одномерного осредненных потоков [7].

Для тех измерительных сечений, в которых поток достаточно равномерен, (например, для сечения 2-2) параметры и скорости осредняются посредством интегрирования по площади этого сечения.

Результаты экспериментов

Экспериментальные кривые

$$\overline{\zeta_{\text{п+п д}}} = \frac{\zeta_{\text{п+п д}}}{\zeta_{\text{п+п д max}}} = f(M_{c_2})$$

(рис. 5) характеризуют влияние эффекта сжимаемости рабочей среды, а также изменяющихся местных чисел Рейнольдса на уровень потерь в патрубке с переходным диффузором. Из приведенных данных вытекает однозначный вывод: в базовом варианте модели в области чисел M_{c_2} = = 0,45–0,67 происходит незначительное возрастание потерь кинетической энергии, и соответственно $\overline{\Delta\zeta_{\text{п+п д}}}$ = + 0,06 при возрастании M_{c_2} в указанном диапазоне. В то же время опыты показывают монотонное возрастание потерь во всей исследованной области изменения величины M_{c_2} (от 0,1 до 0,67). Величина этого изменения потерь характеризуется значительной разностью $\overline{\Delta\zeta_{\text{п+п д}}}$ = 0,35 (см. рис. 5). Для модифицированного варианта (вариант 2) в области повышенных чисел Маха M_{c_2} = 0,45–0,67 наблюдается некоторое снижение потерь кинетической энергии ($\overline{\Delta\zeta_{\text{п+п д}}} = -0{,}001$) при общем росте во всем исследованном диапазоне $\overline{\Delta\zeta_{\text{п+п д}}} = +0{,}19$.

Величина потерь кинетической энергии в патрубке во многом определяется степенью восстановления статического давления в осерадиальном диффузоре. Это наглядно демонстрируется сравнением кривых $\overline{C_p} = \frac{C_p}{C_{p\,\max}}$ для базового и модифицированного вариантов патрубка: для значений числа Маха $M_2 > 0{,}25$ повышенный $\overline{C_p}$ в модифицированном варианте соответствует

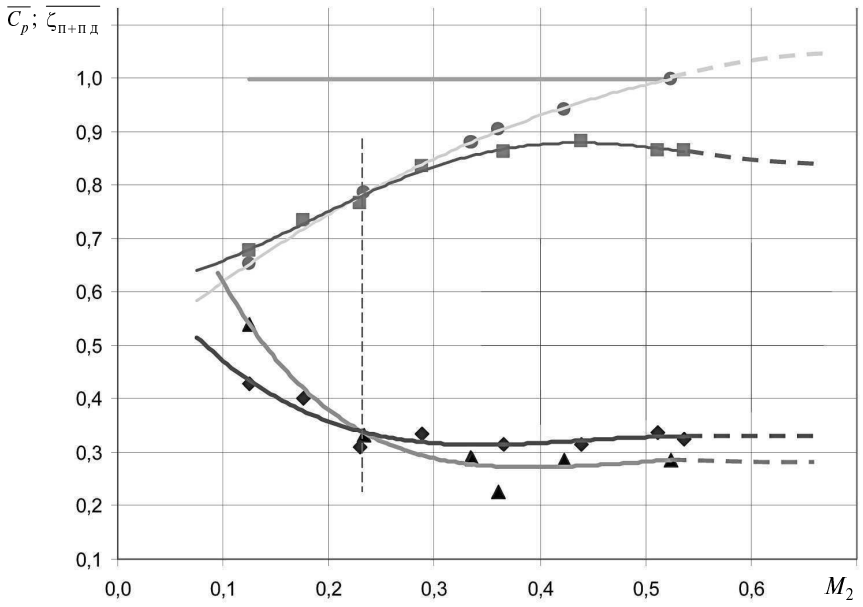


Рис. 6. Зависимости коэффициентов потерь патрубка с переходным диффузором $\overline{\Delta\zeta_{п+пд}}$ и коэффициента восстановления давления осерадиального диффузора $\overline{C_p}$ от режима работы (модель ЦНД, вар.1 и вар. 2):

● — к-т потерь патрубка (вар. 1); ■ — к-т потерь патрубка (вар. 2);
▲ — $\overline{C_p}$ диффузора (вар. 1); ◆ — $\overline{C_p}$ диффузора (вар. 2);
— $\overline{C_p}$ идеальный

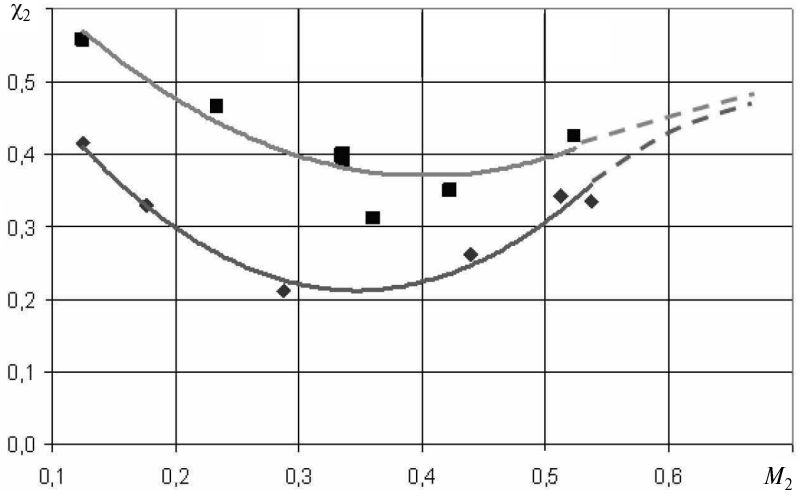


Рис. 6. Зависимость коэффициента неравномерности поля скоростей во входном сечении патрубка от режима работы

(модель ЦНД, ■ — вариант 1; ◆ — вариант 2)

более низкому уровню потерь и, наоборот, недостаточный уровень восстановления давления в осерадиальном диффузоре базового варианта патрубка ведет к большим потерям кинетической энергии. При числах Маха $M_2 < 0{,}25$ наблюдается обратное соотношение: для базового варианта C_p выше и при этом ниже уровень потерь. Кривые зависимостей $\overline{C_p} = f(M_2)$ в двух вариантах и $\overline{\zeta_{\text{п+пд}}} = f(M)$ в этих же вариантах пересекаются при одном и том же числе $M_2 = 0{,}25$.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента χ_2 неравномерности поля скоростей входящего в патрубок потока от числа M_2, иллюстрирующая «обратное» (потенциальное) влияние неосесимметричности выходного патрубка на характер течения в области последней ступени.

Как видно по рис. 6, величина χ_2 равна 0,32 на расчетном режиме и достигает минимального значения $\chi_{2\min} = 0{,}27$ при входном числе $M_2 = 0{,}45$. Такое «обратное» влияние следует считать значительным, и необходимо принимать его во внимание при оценке резонансных частот рабочих лопаток последней ступени. Поля параметров потока в выходном сечении переходного диффузора (сечение 4-4) представлены на рис. 7. Траверсирование потока производилось пятиканальными векторными зондами в плоскости *xy* [7]. Расходная составляющая скорости направлена по оси *z*. Представленные распределения свиде-

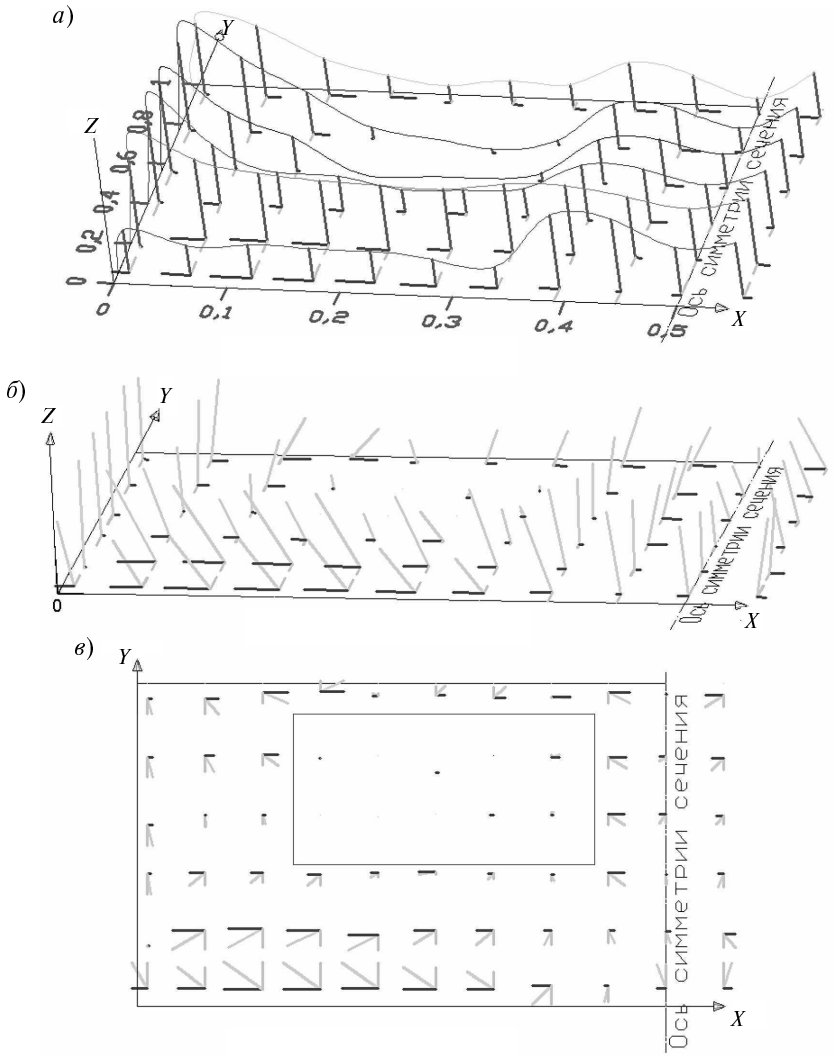


Рис. 7. Поле скоростей в выходном сечении переходного диффузора патрубка (модель ЦНД вар. 1):

— c_{4x}; — c_{4y}; — c_{4z}

тельствуют о значительной неравномерности поля скоростей потока. Область, где течение практически отсутствует, занимает приблизительно 20 % площади выходного сечения. Эти зоны с нулевым массовым расходом рабочей среды располагаются симметрично оси симметрии сечения 4-4 и занимают центральную часть каждой из половин этой плоскости. Основные массы потока протекают в центральной части контрольного сечения и вдоль его боковых стенок, где расходные составляющие скоростей достигают максимальных величин. Кроме крайне неравномерного распределения массы рабочей среды, имеется интенсивная завихренность во всем объеме течения (рис. 6, *б*, *в*). Эти негативные качества выходящего из патрубка потока являются, в основном, следствием воздействия на течение внутренних конструктивных элементов, таких, как поперечная перегородка в верхней (в натуре — нижней) половине модели, укосины, радиальные ребра (см. рис. 3). Изложенное позволяет утверждать, что имеются определенные резервы для совершенствования конструкции.

Крупномасштабная модель, а также современная автоматизированная система измерений стенда ЭС–ОВ–ЦНД делают возможным подробное изучение структуры трехмерного потока и сравнительного анализа различных вариантов модельного патрубка с соблюдением основных критериев подобия — чисел M и Re.

Коэффициент патрубка совместно с переходным диффузором $\zeta_{\text{п+пд}}$ модели ЦНД.1 модифицированного варианта 2 на 20 % ниже базового варианта при числе Маха $M_{c_2} = 0{,}67$.

Коэффициент χ_2 неравномерности в сечении 2-2, вызываемой обратным воздействием патрубка на входящий поток, достигает величины $\chi_{2\min} = 0{,}48$ при том же числе $M_{c_2} = 0{,}67$, что может стать причиной возбуждения колебаний рабочих лопаток последней ступени ЦНД турбины.

Коэффициент неравномерности χ_4 в сечении 4-4 достигает значения $\chi_4 = 1{,}97$, что свидетельствует о негативном воздействии на поток внутренних конструктивных элементов и создает неблагоприятные входные условия потока в конденсатор.

Один из важнейших элементов патрубка ЦНД — осерадиальный диффузор — в данной модели показал недостаточно высокие восстановительные характеристики. Сравнение полученной величины $C_{\text{рд}}$ с величиной $C_{\text{рд ид}} = 0{,}65$ дает основание сделать вывод о том, что именно в совершенствовании геометрии проточной части осерадиального диффузора кроются резервы повышения аэродинамического совершенствования патрубка ЦНД в целом. Уступ (внезапное расширение) на входе в осерадиальный диффузор является генератором газодинамических явлений на поверхности внешнего обвода осерадиального диффузора, а следовательно, и дополнительным источником потерь.

Сопротивление цилиндрических распорных стержней, расположенных равномерно по окружности поперек потока при выходе из осерадиального диффузора, т. е. в зоне больших скоростей течения, вызывает заметные потери кинетической энергии.

Радиальные пластинчатые ребра, установленные в области осерадиального диффузора, т. е. в области максимальных скоростей потока, вызывают существенные потери трения в случае закрутки потока за последней ступенью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кириллов, И.И.** Паровые турбины и паротурбинные установки [Текст] / И.И. Кириллов, В.А. Иванов, А.И. Кириллов.— Л.: Машиностроение. 1978.— 276 с.

2. **Stűer, H.** Siemens AG PG. Entwicklung von neuen Beschaufelungen zur Wirkungsgradsteigerung von Niederdruck-Dampfturbine.-38 [Текст] / H. Stűer, J. Hermeller, C. Richter [и др.] // KWK.— Dresden, Tagungsband.— 2006. Vol. 2. № 11.

3. **Мигай, В.К.** Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В.К. Мигай, Э.И. Гудков.— Л.: Машиностроение, 1981.— 272 с.

4. **Дейч, М.Е.** Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин.— М.: Энергия, 1970.— 384 с.

5. **Гоголев, И.Г.** Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин [Текст] / И.Г. Гоголев, А.М. Драконов.— Брянск: Брянское областное издательство «Грани», 1995.— 258 с.

6. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин [Текст] / Под общ. ред. В.А. Черникова .— Л.: Машиностроение, 1980.— 263 с.

7. **Черников, В.А.** Информационно-измерительная система экспериментального стенда для газодинамических исследований выходных диффузоров и патрубков турбин [Текст] / В.А. Черников, Е.Ю. Семакина, Т.Ф. Баранова // Энергетические машины и установки.— 2008. № 1.— С. 24–34.

УДК 621.45

А.И. Бодров, С.М. Вохмянин,
И.А. Богов, Г.П. Поршнев, Н.О. Стельмакова

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОЕДИНЕНИЯ ВОЗДУХОВОДА С ПАТРУБКОМ КОМПРЕССОРА ГТЭ-160 НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И РАБОТУ СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ

Проектирование, изготовление и компоновка основного оборудования газотурбинной установки (ГТУ) и блока комплексного воздухоочистительнго устройства с трактом подвода воздуха непосредственно к всасывающему патрубку компрессора ГТУ осуществляются, как правило, различными организациями, которые используют отличающиеся друг от друга конструкции стыковочных узлов соединения элементов всего воздухоподводящего тракта, в частности узла соединения с всасывающим патрубком компрессора.

Именно этот, ближайший к компрессору, стыковочный узел представляет наибольший интерес в части возможного его влияния на течение воздуха в самом всасывающем патрубке и на работу системы промывки проточной части компрессора от загрязнения, которая располагается, как правило, также в патрубке [1, 2]. Изучению этого вопроса и посвящена настоящая статья.

Объект исследования

Исследовался всасывающий патрубок компрессора газотурбинной установки ГТЭ-160 ЛМЗ при двух различных конструкциях узла его соединения с воздуховода, показанных на рис. 1.

Узел соединения 1 — жесткий фланец, простейший по конструкции и идеальный в смысле возможного возмущающего воздействия на поток воздуха.

Другой вариант соединения, который используется в тех случаях, когда не удается обеспечить абсолютно точной стыковки поперечных сечений воздуховода и патрубка, — конструкция узла 2. Эта конструкция, более гибкая и менее требовательная к точности изготовления и мон-

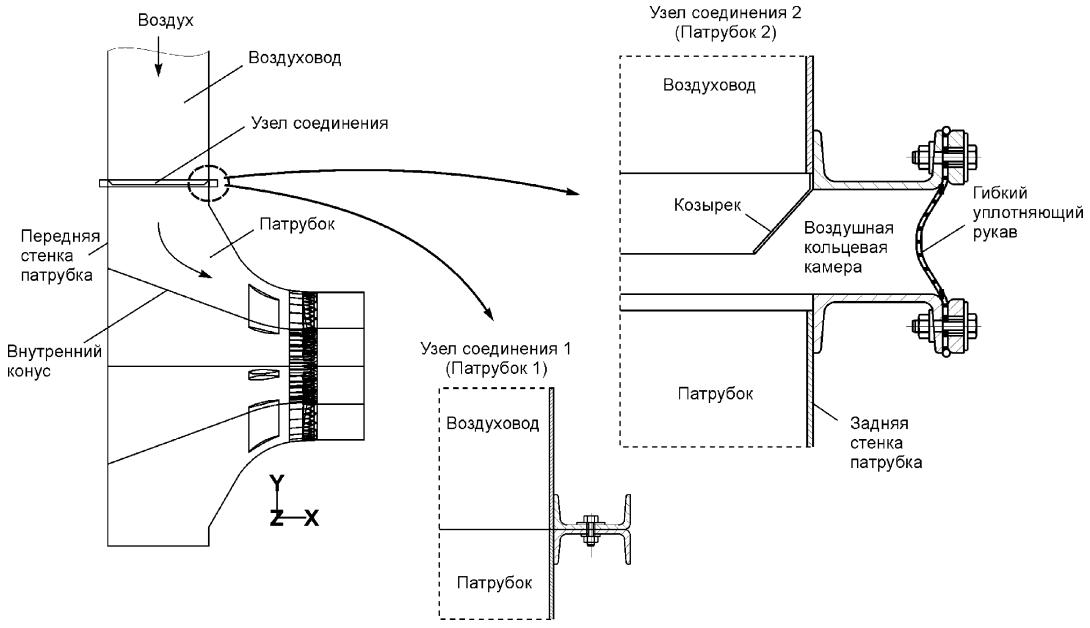


Рис. 1. Исследованные конструкции узла соединения воздуховода с всасывающим патрубком компрессора

тажа, как показано на рис.1, включает гофрированный уплотняющий рукав, который крепится к швеллерам со стороны воздуховода и патрубка вдоль всего периметра поперечного сечения, козырек, обеспечивающий плавность перехода проходного сечения воздуховода в патрубок, и образуемую вышеперечисленными элементами воздушную кольцевую камеру.

Размеры узла соединения 2 и патрубка: ширина и длина поперечного сечения патрубка составляют соответственно 1500 и 11100 мм; высота всасывающей камеры — 5300 мм; местное относительное уменьшение проходного сечения патрубка, вызванное выступом козырька, не превышает ~9 %; высота кольцевой камеры составляет порядка 100 мм.

Переход от жесткого фланцевого соединения к гибкому узлу соединения 2, как это будет показано ниже, заметно изменяет структуру потока воздуха в патрубке, т. е. при одинаковой конструкции собственно всасывающих патрубков «работают» они по-разному, другими словами, функционально — это два разных патрубка. Поэтому исследуемые варианты патрубков с узлами соединения 1 и 2 в дальнейшем будут коротко называться соответственно патрубками 1 и 2.

Используемые программные средства, модели, граничные условия

Расчеты течения воздуха и траекторий движения капель жидкости в патрубках производились с помощью пакета вычислительной газодинамики Fluent версии 6.3.26, реализующей решение методом контрольного объема осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса в сочетании с одной из моделей турбулентности [3].

Геометрические и сеточные модели строились с использованием программ Unigraphics NX, GAMBIT 2.3.16 и TGrid 4.0.16. Размерность сеточной модели патрубка 1 составляла примерно 1,6 млн гексагональных контрольных объемов, а патрубка 2 — порядка 2 млн.

Для обоих патрубков во входном сечении расчетной области назначались граничные условия типа Pressure Inlet со стандартными значениями по давлению и температуре торможения атмосферного воздуха. В выходном сечении — граничные условия типа Pressure Outlet с расходом воздуха 515 кг/с, соответствующим номинальному режиму работы установки ГТЭ-160 [4]. На стенках накладывалось условие прилипания потока.

В качестве рабочего тела задавался сухой воздух со свойствами, предусмотренными программой Fluent для сжимаемого идеального газа [3].

Учет эффектов турбулентности производился с помощью двухпараметрической стандартной (k–ε)-модели турбулентности со стандартными пристенными функциями.

Анализ работы системы промывки ограничивался рассмотрением только траекторий капель жидкости, что оказалось вполне достаточным для решения поставленной в данной работе задачи.

Впрыск моющей жидкости (вода) моделировался в рамках дискретно-фазовой модели Лагранжа. Начальные условия (в терминологии Fluent) дискретной фазы — капель жидкости — задавались характерными для систем влажной очистки проточных частей компрессоров низкого давления [1]. Скорость капель принималась равной 20 м/с, диаметр капель $d_к$ — 50 и 100 мкм, направление впрыска — по нормали к стенке.

Положения точек впрыска выбирались в местах, обычно используемых для установки форсунок при промывке компрессоров на ходу (при номинальной нагрузке или близкой к ней) [1,2] с учетом зон наибольшего различия в структуре потока для исследованных патрубков. Последнее обстоятельство позволило выявить предельное влияние газодинамических особенностей течения воздуха в патрубках на траектории капель.

Результаты исследования структуры потока

Результаты численного моделирования показали, что в патрубке 2 кольцевая камера и козырек вносят существенные изменения в структуру потока по сравнению с течением в патрубке 1.

На рис. 2 показаны три зоны, в которых наблюдаются наибольшие различия в структуре потока, вызванные использованием конструкции узла соединения 2.

Зона 1 охватывает часть объема патрубка, примыкающую к узлу соединения в области задней стенки. Зона 2 находится на стыке передней стенки и внутреннего конуса, зона 3 — в углах всасывающей камеры. Все зоны симметричны относительно плоскости симметрии патрубка.

На рис. 3 даны сравнительные картины линий тока воздуха в зоне 1 исследованных патрубков, где проявляется наибольшее влияние конструкции узла соединения 2 на структуру потока.

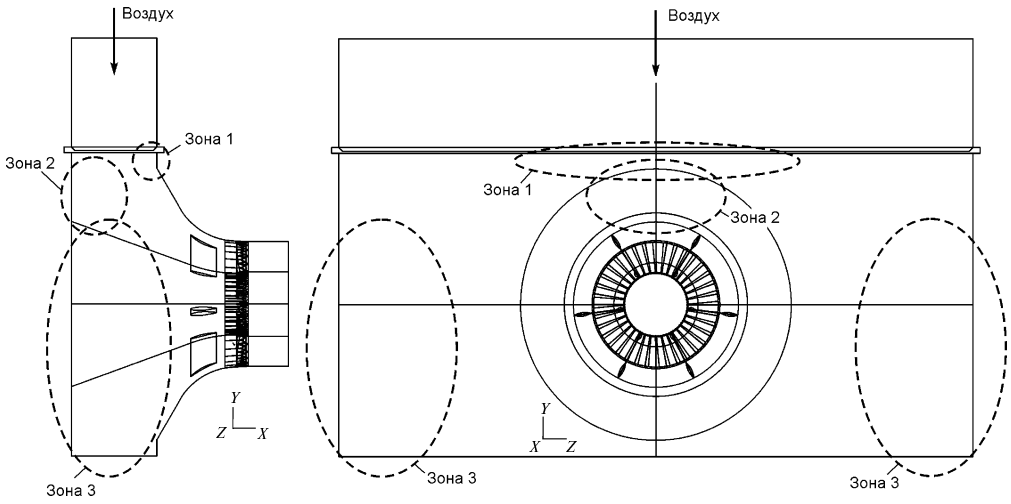


Рис. 2. Расположение зон, в которых проявляется наибольшее влияние конструкции узла соединения 2 на структуру потока

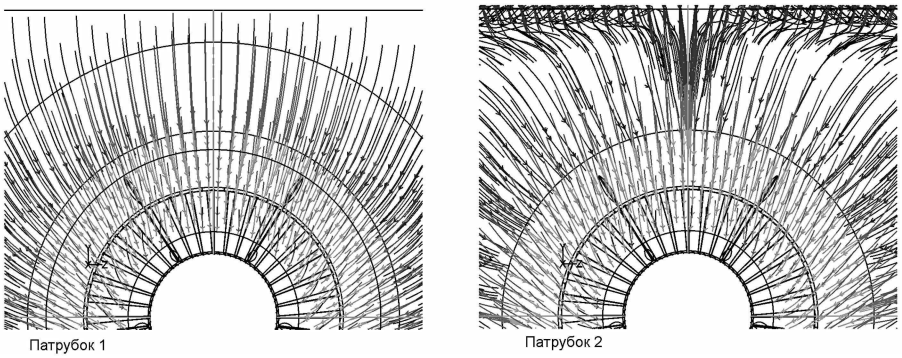


Рис. 3. Сравнительные картины линий тока воздуха в плоскости, перпендикулярной оси компрессора, на расстоянии 50 мм от задней стенки в зоне влияния 1

а)

б)

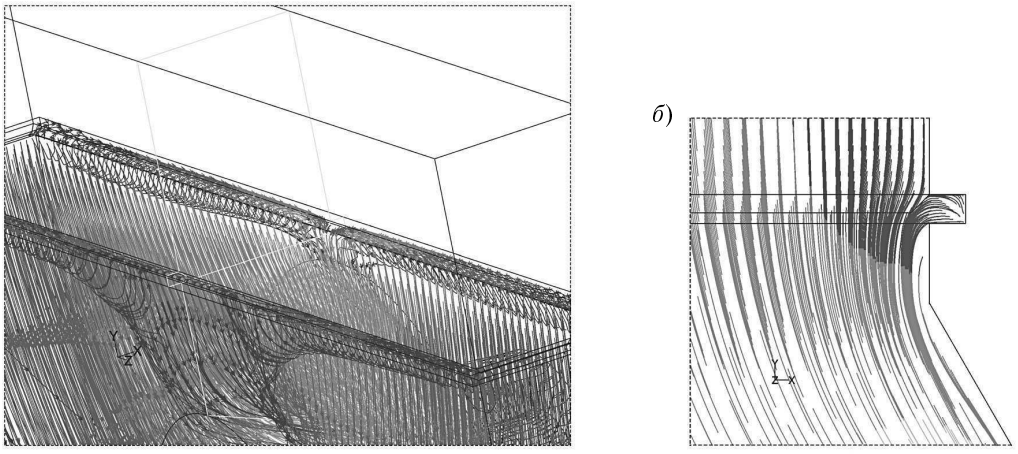


Рис. 4. Структура потока в зоне узла соединения для патрубка 2:
а — в области передней и задней стенок; *б* — в плоскости симметрии патрубка вблизи задней стенки

Рис. 4 наиболее полно демонстрирует сложный характер течения воздуха в области узла соединения для патрубка 2. Вблизи стенок патрубка, как задней, так и передней, на некотором удалении от плоскости симметрии происходит подпитка кольцевой камеры воздухом (см. рис. 4, *а*). Далее в камере два потока идут навстречу друг другу и вытекают в виде струй вблизи плоскости симметрии, как показано, например, для задней стенки на рис. 4, *б*.

Со стороны передней стенки в зоне 2 (см. рис. 4, *а*) образуются более сложные пространственные вихри и вытекание воздуха из камеры происходит не непосредственно вдоль стенки, как это имеет место для задней стенки и изображено на рис. 4, *б*, а во внутрь объема патрубка, как показано на рис. 5, *а*, для патрубка 2. Это происходит вследствие оттесняющего эффекта со стороны двух симметричных крупных вихрей, изображенных на рис. 5, *б*, для патрубка 2.

Неожиданно сильное влияние конструкции узла соединения 2 на характер течения воздуха было обнаружено в углах всасывающей камеры патрубка (см. рис. 2, зона 3). Как показано на рис. 6, это влияние проявилось в виде двух вихреобразований (в каждом из углов), поднимающих вдоль боковых стенок интенсивные встречные потоки.

Таким образом, казалось бы незначительные по размерам, дополнительные особенности конструкции узла соединения 2 воздуховода с патрубком (воздушная кольцевая камера, козырек) способны существенно изменить характер течения воздуха в этом патрубке.

Анализ траекторий капель моющей жидкости

Известно, что при влажной очистке на ходу проточных частей компрессоров эффективность работы систем промывки низкого давления, в отличие от систем высокого давления, суще-

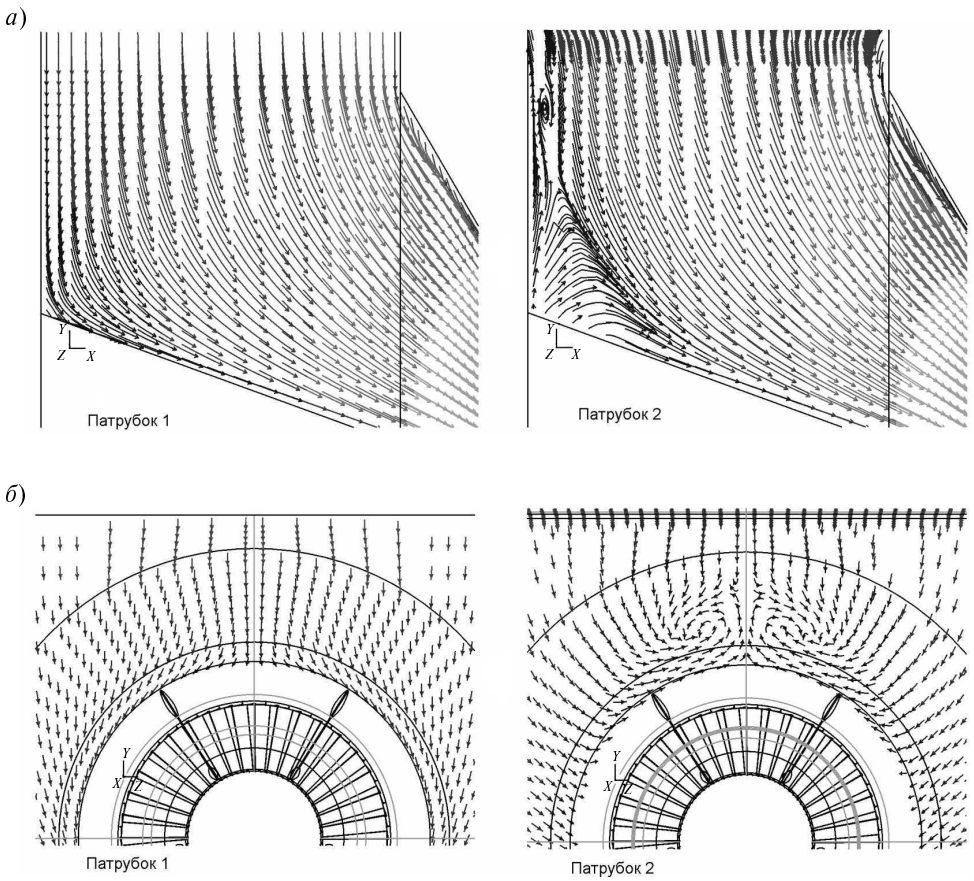


Рис. 5. Линии тока воздуха в исследованных патрубках в зоне влияния 2:

а — в плоскости симметрии; *б* — в плоскости, перпендикулярной оси компрессора, на расстоянии 100 мм от передней стенки

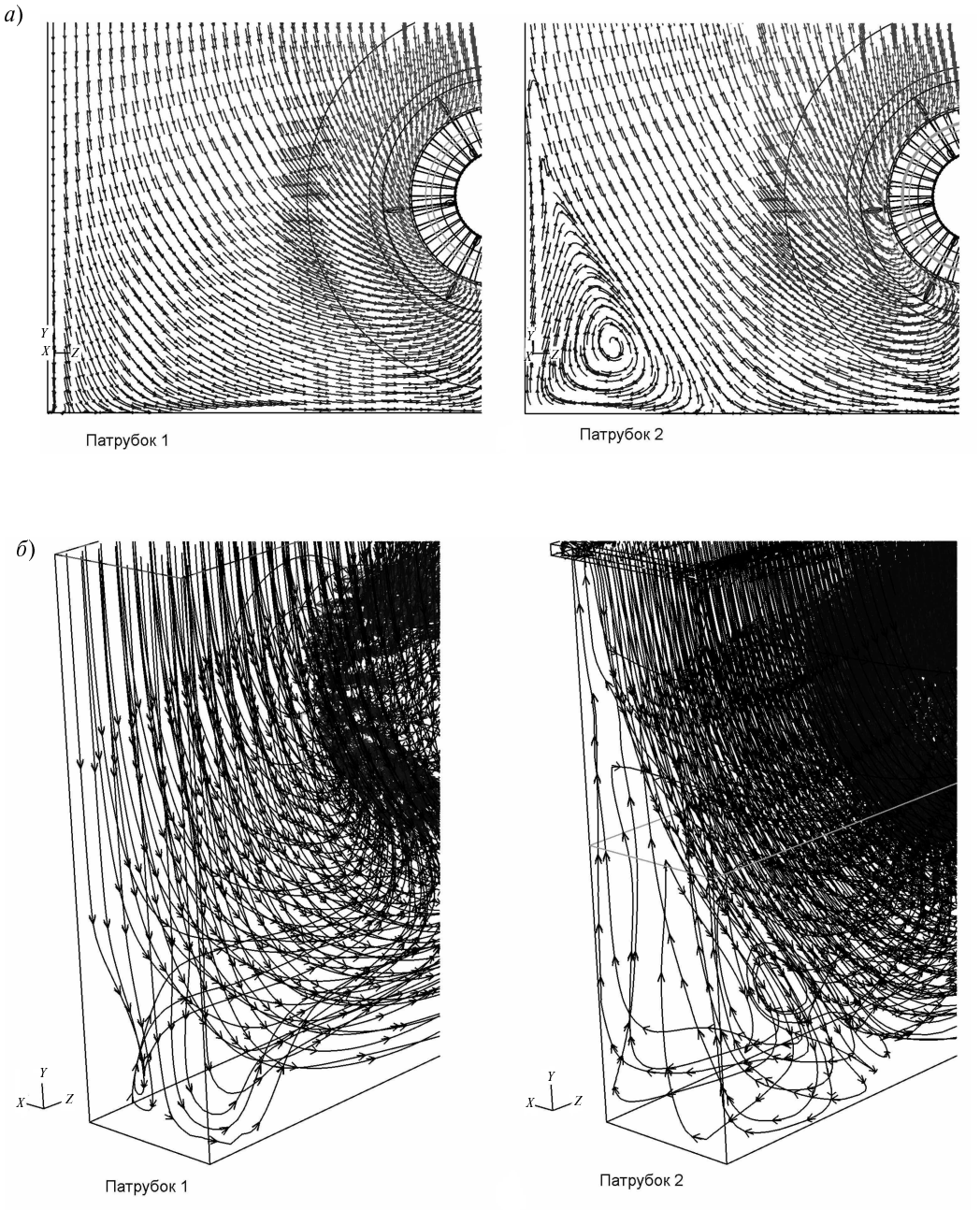


Рис. 6. Линии тока воздуха в исследованных патрубках в зоне влияния 3:
а — в плоскости, перпендикулярной оси компрессора и проходящей через середину всасывающей камеры патрубка; *б* — в аксонометрической проекции

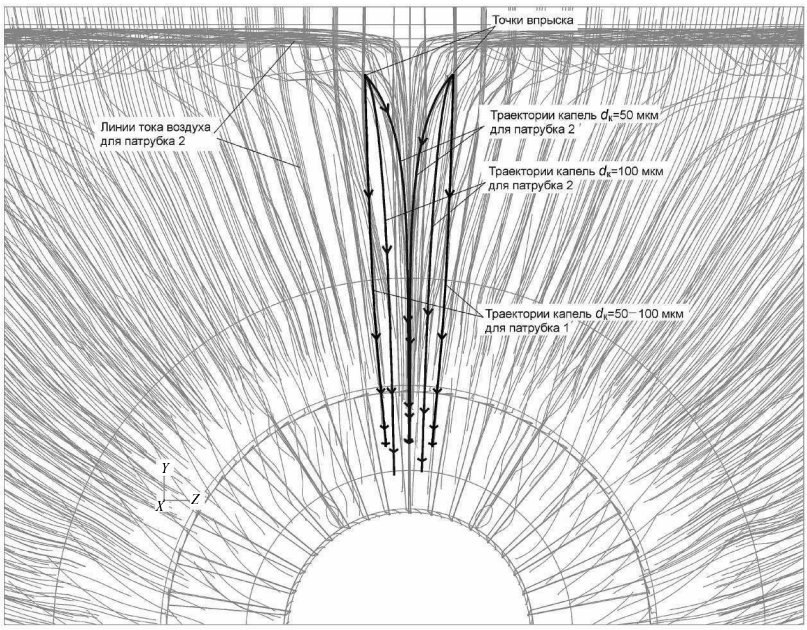


Рис. 7. Сравнительные картины траекторий капель жидкости при впрыске из двух симметричных точек на задней стенке исследованных патрубков в зоне влияния 1

(линии тока воздуха даны в плоскости, перпендикулярной оси компрессора, на расстоянии 50 мм от задней стенки для патрубка 2)

ственно зависит от характера течения воздуха, в который производится впрыск жидкости. Поэтому расчет систем промывки низкого давления должен производиться совместно с газодинамическим расчетом потока воздуха, несущего капли жидкости.

В нашей работе проанализированы траектории капель жидкости, впрыскиваемой форсунками, которые устанавливались на задней и передней стенках патрубка, а также на внутреннем конусе в зонах наибольшего влияния на структуру основного потока узла соединения 2 (см. рис. 2 и 3).

На рис. 7 на фоне линий тока воздуха в патрубке 2 представлены траектории капель жидкости диаметром 50 и 100 мкм, впрыскиваемых из двух симметричных точек на задней стенке в потоки, формируемые патрубками 1 и 2. На этом

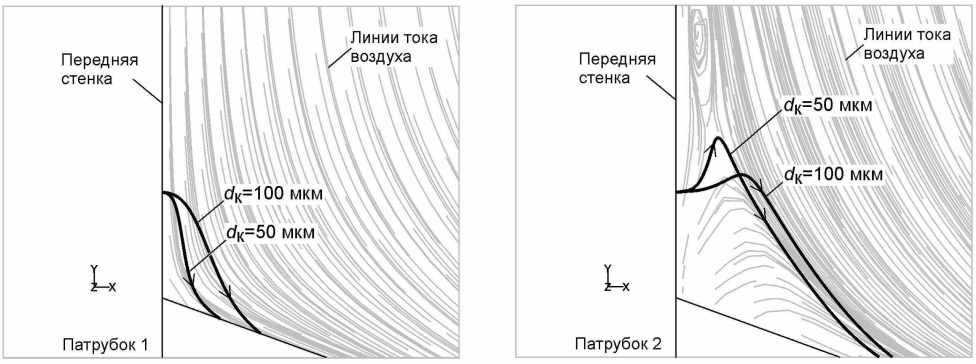


Рис. 8. Сравнительные картины траекторий капель жидкости различного диаметра при впрыске с передней стенки в плоскости симметрии исследованных патрубков в зоне влияния 2

(линии тока воздуха даны в плоскостях симметрии патрубков)

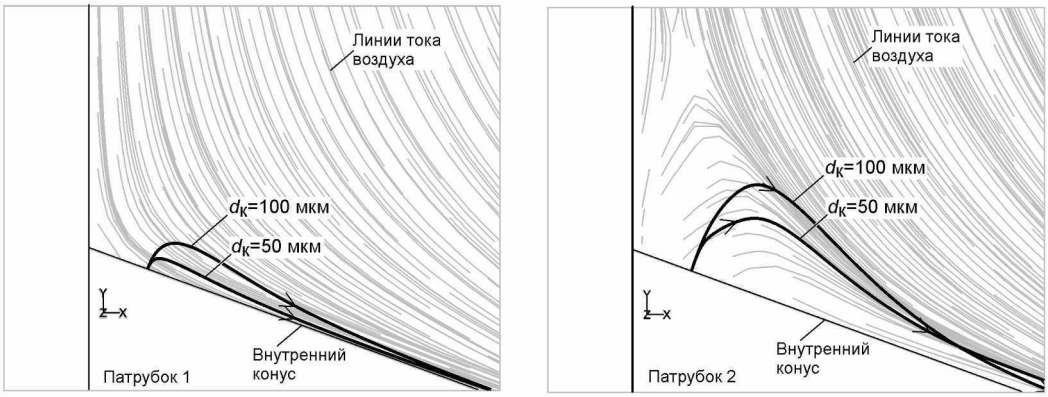


Рис. 9. Сравнительные картины траекторий капель жидкости различного диаметра при впрыске с внутреннего конуса в плоскости симметрии исследованных патрубков в зоне влияния 2

(линии тока воздуха даны в плоскостях симметрии патрубков)

рисунке отчетливо видно эжектирующее влияние струи воздуха, вытекающей из кольцевой камеры, на капли впрыскиваемой жидкости в патрубке 2: происходит расслоение траекторий капель в зависимости от их диаметра. Как и следовало ожидать, наибольшее отклонение испытывают капли меньшего диаметра (50 мкм).

В патрубке 1 ничего подобного не наблюдается: проекции траекторий капель различного диаметра (50 и 100 мкм) на плоскость, перпендикулярную оси компрессора, (рис. 8) практически совпадают. Следует заметить, что это отнюдь не означает идентичности траекторий в пространстве.

Расчеты показывают, что капли большего диаметра (массы) проникают в поток глубже и в меньшей степени подвержены воздействию со стороны потока воздуха. Это наглядно демонстрируют рис. 8 и 9.

Данные, приведенные на рис. 7–9, показывают, что использование конструкции узла соединения 2 по сравнению с простым фланцевым соединением заметно изменяет траектории капель моющей жидкости и эффективность работы всей системы промывки.

На основании изложенного можно утверждать, что системы промывки компрессоров должны проектироваться индивидуально даже для ГТУ, одинаковых по конструкции, но с различными стыковочными соединениями элементов воздухоподводящего тракта.

Весьма незначительные в масштабах всасывающего патрубка компрессора газотурбинной установки ГТЭ-160 ЛМЗ размеры дополнительных элементов узла соединения воздуховода с патрубком могут оказать существенное влияние на структуру потока в патрубке и работу системы промывки на ходу проточной части компрессора от загрязнения.

Для разработки высокоэффективных систем промывки компрессоров на ходу проектирование и анализ работы этих систем должны производиться с учетом всех конструктивных особенностей воздушного тракта, предшествующих по потоку всасывающему патрубку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mund, F.C.** A review of gas turbine online washing systems [Текст] / F.C. Mund, P. Pilidis // Proceedings of ASME Turbo Expo 2004. Power for Land, Sea, and Air.— June 14–17, 2004.— Vienna, Austria.

2. **Stalder, J.-P.** Gas turbine compressor washing state of the art - field experiences. ASME [Текст] / J.-P. Stalder // Paper 98-GT-420. Presented at the Inter / GT-Aeroengine Congress, Stockholm, Sweden.— 2–5 June. 1998.

3. Fluent 6.3 Documentation. User's Guide [Текст] / Fluent Inc.— 2006-10-12.

4. **Ольховский, Г.Г.** Газовые турбины для энергетики [Текст] / Г.Г. Ольховский // Теплоэнергетика.— 2004. № 1.— С. 33–43.

УДК 621.313:621.318:621.311

А.С. Адалев, С.А. Булгаков, А.С. Кибардин,
В.Г. Кучинский, В.Ф. Сойкин

ВЫСОКООБОРОТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

При создании высокооборотной электрической машины основная проблема связана с обеспечением механической прочности ротора. Использование постоянных магнитов исключает наличие обмоток возбуждения на роторе, что дает возможность повысить механическую прочность ротора и увеличить его частоту вращения. Это позволяет исключить понижающий редуктор и подсоединить машину непосредственно к объекту — турбине (в случае генераторного режима работы) или нагнетателю (в случае двигательного режима работы). Исключение редуктора приводит к повышению КПД установки и снижению ее массогабаритных характеристик.

Применение высокооборотных генераторов в составе турбоагрегатов редуцирования энергии топливного газа — новое направление в развитии современных ГРЭС и ТЭЦ, позволяющее обеспечить электроэнергией основных потребителей собственных нужд станции.

Современные газоперекачивающие агрегаты с питанием от электросети используют высокооборотные двигатели. Так, например, можно отметить высокоскоростной электродвигатель типа HSHV производства ООО «Сименс Электропривод» из состава электроприводного газоперекачивающего агрегата ЭГПА-6,3/8200-56/1,44-Р или асинхронный электродвигатель ДАРВ-6300-8200-УХЛ4 производства ООО «Электротяжмаш-Привод».

Необходимо отметить, что ввиду высокой частоты вращения рассматриваемых высокооборотных машин частота тока в их обмотках превышает частоту промышленной сети 50 (60) Гц. Поэтому для питания высокооборотных электродвигателей от промышленной сети или для подключения типовой нагрузки к высокооборотному генератору необходимо использовать полупроводниковый преобразователь. Существует ряд типовых схем преобразователей. Обсуждение достоинств конкретных схемных реализаций преобразователя не является предметом настоящей статьи. Здесь на примере машины мощностью 5 МВт с частотой вращения 8000 об/мин рассматриваются основные, принципиальные решения, предлагаемые для высокооборотных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

Основные технические решения, принятые при разработке высокооборотной машины

Минимальный объем машины достигается при реализации максимальной удельной тангенциальной силы, создающей вращающий момент. Предыдущие разработки машин с постоянными магнитами [1] показывают, что наиболее эффективна в этом смысле конфигурация магнитной системы двигателя с явнополюсными ротором и статором, с неравным числом полюсов. Однако наличие явнополюсного статора приводит к существенным пульсациям поля в роторе. Применение такой конфигурации в машине с высокой частотой вращения приведет к чрезмерным потерям в элементах ротора, в связи с чем выбрана традиционная магнитная система с распределенной обмоткой на статоре.

Основная проблема, связанная со спецификой работы высокооборотной машины, заключается в обеспечении механической прочности ротора, что достигается за счет ограничения его внешнего диаметра и применения специальной конструкции крепления его элементов. Поскольку электромагнитные характеристики машины существенно зависят от диаметра ротора, для каждого варианта конструкции проводился электромагнитный расчет.

В рамках многовариантного анализа конструкции высокооборотного ротора были рассмотрены три типа конструкции: радиальная, коллекторная и комбинированная. В роторе радиального типа (рис. 1) магниты, намагниченные радиально, расположены на поверхности ферромагнитного сплошного цилиндра-вала и удерживаются бандажом толщиной 10–15 мм

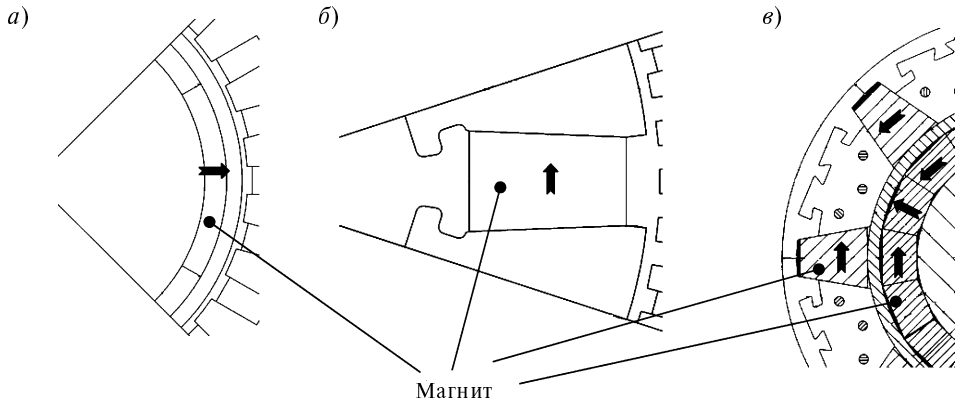


Рис. 1. Поперечное сечение роторов разных типов:
а) радиального, *б*) коллекторного, *в*) комбинированного

из прочной стали. Ротор коллекторного типа содержит тангенциально намагниченные магниты, расположенные между ферромагнитными полюсами. Комбинированная конструкция является сочетанием радиальной и коллекторной конструкций.

Для принятого диаметра ротора радиальный размер активной зоны ротора (высота магнитов и полюсов) конструктивно ограничен механической прочностью (толщиной) несущего цилиндра, удерживающего полюса и магниты. В коллекторной и комбинированной конструкциях, где радиальная высота магнита определяет степень концентрации магнитного потока, ограничение радиального размера активной зоны ротора не позволяет снизить число полюсов ниже определенного уровня без существенного снижения индукции поля возбуждения. В то же время снижение числа полюсов целесообразно с точки зрения снижения рабочей частоты и потерь в магнитопроводе. Указанные выше конструкции были проанализированы при числе полюсов ротора 4, 6, 8, 10.

Как показали проведенные расчеты, наилучшими электромагнитными и прочностными характеристиками обладает ротор коллекторной конструкции с восемью полюсами и внешним диаметром 400 мм. Именно этот вариант ротора и принят за основу. Применение данного ротора позволило получить удельную электромагнитную силу 30 кН/м^2 при линейной токовой нагрузке 52,5 кА/м (среднее значение по расточке статора). Конструкция высокооборотного ротора, предлагаемая в настоящей статье, — уникальная разработка, успешно прошедшая патентную экспертизу [2].

Проведенный механический расчет в наиболее напряженном режиме (испытание на угон при 9600 об/мин) подтвердил прочность элементов ротора с требуемым коэффициентом запаса по напряжениям 1,2 при использовании прочной немагнитной стали с пределом текучести 750 МПа. Коэффициент запаса по напряжениям в номинальном режиме составляет не менее 1,6. Динамический расчет показал, что номинальная частота лежит между первой и второй критическими частотами вращения ротора и отстроена от них более чем на 20 %.

Одна из основных проблем для высокооборотных машин — повышенные потери в роторе от зубцовой пульсации поля. Для снижения таковых применяется паз статора, полностью закрытый ферромагнитным шунтом толщиной несколько миллиметров (рис. 2). Наличие такого шунта в совокупности с наконечником полюса ротора, выполненным из шихтованной стали толщиной 0,35 мм и значительным воздушным зазором (5 мм), позволяет добиться малых электромагнитных потерь в роторе (на уровне 1–2 кВт), в то время как при выполнении пазов статора открытыми потери в роторе возрастают на порядок.

Введение сплошного шунта, скрепляющего между собой зубцы магнитопровода статора, позволяет выполнить спинку статора в виде отдельного шихтованного цилиндра с тангенциальным направлением проката листов анизотропной электротехнической стали 3408. Последнее почти в два раза снижает тепловыделения в спинке, так как основная доля магнитного потока направлена вдоль проката, т. е. в направлении

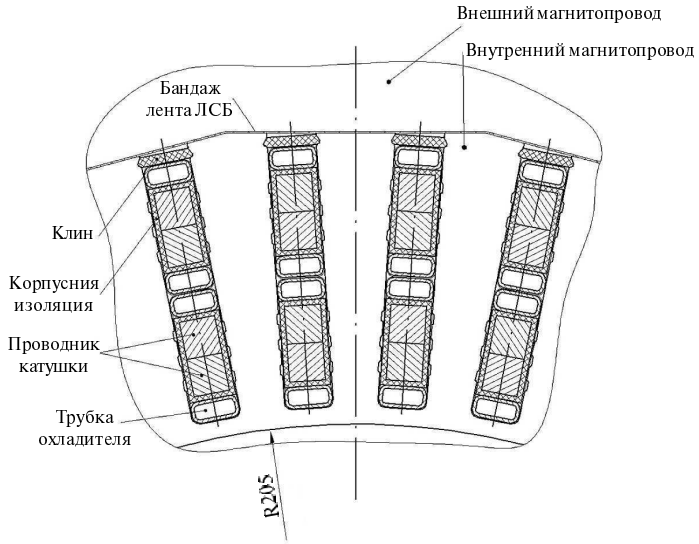


Рис. 2. Фрагмент статора с закрытыми пазами и отдельной спинкой

минимальных удельных потерь. Основные источники тепловыделений из-за потерь мощности, кВт, в элементах машины следующие:

в спинке статора	30,2
в зубцах статора	27,2
в шунте статора	13,4
в нажимных плитах статора	4,0
в полюсах ротора	~ 0
в наконечниках полюсов ротора	0,97
в магнитах	0,24
на трение ротора о воздух	≈25,0
в подшипниках	≈5,0
в обмотке статора при 115 °С	18,5
суммарные	124,5
КПД, о. е.	0,976

Ввиду значительных удельных тепловыделений в шунте и обмотке статора, а также значительного теплового потока со стороны ротора, связанного с трением его о воздух, требуется размещать охладители в пазах как можно ближе к шунту. Как показал электромагнитный расчет, амплитуда вариации поля в этой зоне и частота ее вариации (533 Гц) обусловливает повышенные потери при использовании для охлаждения трубок из нержавеющей стали. Поэтому в данном проекте применены трубки из неэлектропроводящего эластичного материала. Трубки в ходе изготовления обмотки бандажируются непосредственно к каждой секции для обеспечения хорошего теплового контакта и необходимой механической прочности.

Как показал проведенный тепловой расчет, при толщине стенки трубки не более 1 мм величина удельной теплопроводности материала трубки должна быть не ниже 0,2 Вт/м/К (желательно 0,4 Вт/м/К), чтобы обеспечить температуру обмотки, допустимую для изоляции класса *F*. По данным производителей указанную теплопроводность могут обеспечить трубки из силикона. На текущем этапе исследований проводятся макетирование рассматриваемой зоны и испытания. На образцах трубки уже получены значения теплопроводности на уровне 0,33 Вт/м/К.

По изложенным выше причинам (повышенные тепловыделения от вихревых токов в массивных проводящих материалах) катушки обмотки выполняются из лицендрированного проводника (марки ЛЭНП) с диаметром элементарной изолированной проволоки 0,4–0,5 мм.

По результатам конструкторской проработки выбранной геометрии были проведены электромагнитный, механический и теплогидравлический расчеты машины, подтвердившие правильность выбранных технических решений.

Описание конструкции

Конструктивно машина имеет следующие узлы (рис. 3, 4): корпус; два торцевых щита; статор; ротор; два подшипниковых узла; система водяного охлаждения; система обеспечения про-

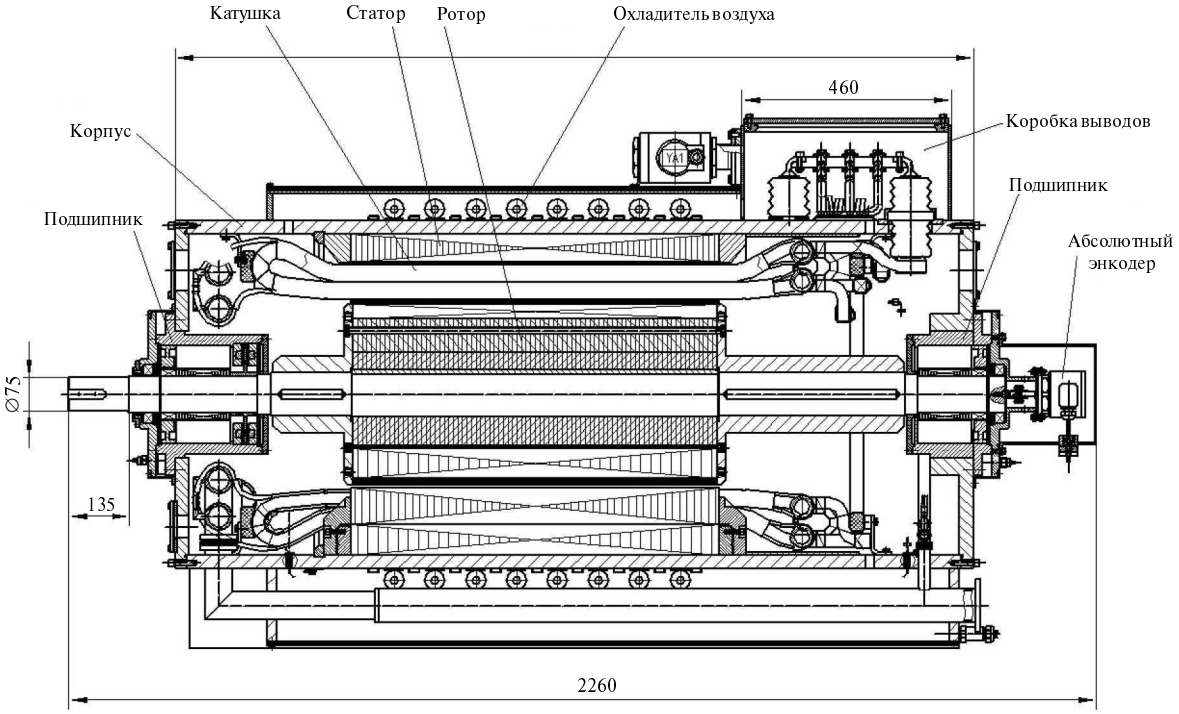


Рис. 3. Продольное сечение машины

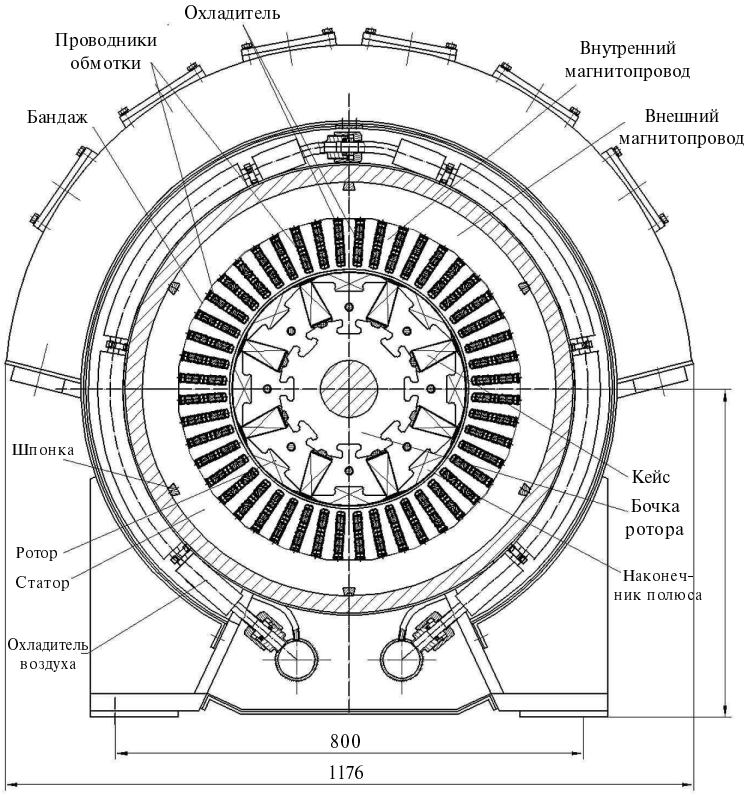


Рис. 4. Поперечное сечение машины

дувки и поддержания воздуха внутри оболочки генератора под избыточным давлением (для реализации взрывозащиты типа «р»).

Статор состоит из внешнего магнитопровода, внутреннего магнитопровода, обмотки статора, элементов крепления статора, системы охлаждения статора.

Внешний магнитопровод состоит из набора шихтованного лакированного электротехнического железа (марка 3408; 0,35 мм) и представляет два полуцилиндра, скрепленных между собой болтовыми соединениями в зонах нажимных фланцев. Для снижения тепловыделений листы наружного магнитопровода штампуются и укладываются таким образом, чтобы направление проката совпало с окружным направлением магнитопровода. Для обеспечения возможности передачи момента внутренняя поверхность внешнего магнитопровода имеет форму многогранника (см. рис. 2).

Внутренний магнитопровод также состоит из листов электротехнической стали 3408 толщиной 0,35 мм с прокатом в радиальном направлении. Со стороны рабочего воздушного зазора пазы во внутреннем магнитопроводе выполнены закрытыми для снижения зубцовых пульсаций поля в воздушном зазоре и, соответственно, потерь в роторе. Обмотка в пазы укладывается со стороны внешней поверхности внутреннего магнитопровода. На внешней поверхности внутреннего магнитопровода нанесен бандаж толщиной 0,5 мм (см. рис. 2) из стеклянной ленты для исключения замыкания листов стали при установке внешнего магнитопровода. Для снижения зубцовых пульсаций момента пазы (48 пазов) выполнены скошенными вдоль аксиальной длины на одно пазовое деление.

Обмотка статора — двухслойная, состоит из 48-ми одновитковых катушек, имеющих «форму лягушки» (волновая обмотка); она уложена в пазы внутреннего магнитопровода. Катушка выполнена из транспонированного проводника марки ЛЭНП, у которого элементарные проволоки покрыты электроизоляционным лаком. Для удобства формирования лобовых зон проводник витка выполнен из двух проводников по высоте.

Для обеспечения эффективного охлаждения вдоль верхней и нижней грани проводника катушки установлены трубки охлаждения, выполненные из неэлектропроводящего теплостойкого материала. Таким образом, система охлаждения всей зубцово-пазовой зоны состоит из 48 трубок (по числу катушек). Пара трубок близлежащих катушек соединена последовательно, образуя единую ветвь, вход и выход которой подсоединены соответственно к входному и выходному коллекторам системы охлаждения.

Основным несущим элементом ротора двигателя служит бочка ротора, которая состоит из набора дисков, установленных на вал (рис. 5). Диск толщиной 10 мм представляет собой кольцо с пазами, выполненное из высокопрочной неферромагнитной стали, по окружности которого установлены полюсные пластины, сделанные из прочной ферромагнитной стали. Полюсные пластины закреплены на кольце с помощью хвостовиков в виде «ласточкиного хвоста» и сварены в зоне хвостовика с кольцом по контуру сопряжения.

В осевом направлении диски бочки ротора стянуты шпильками. Для осевой фиксации магнитной структуры ротора по краям бочки установлены нажимные диски, выполненные из неферромагнитной стали. Диски установлены на вал ротора по прессовой посадке. Возможен вариант совмещения прессовой посадки бочки ротора на вал с фиксацией бочки от проворота со шпоночным соединением.

На полюсных пластинах при прессовой посадке установлены наконечники, выполненные из шихтованного электротехнического железа (сталь 2412; толщина листа 0,35 мм).

В трапецеидальные пазы бочки ротора установлены кейсы с постоянными магнитами. Каждый кейс состоит из магнита, склеенного в аксиальном направлении из блоков постоянных магнитов трапециидальной формы (намагниченных тангенциально), и корпуса кейса, выполненного из стеклотекстолитовых элементов.

В качестве основных подшипников предполагается использовать магнитные подшипники фирмы S2M (Societe de Mecanique Magnetique, France — входит в компанию SKF). В комплекте поставки: 2 радиальных подшипника, 1 упорный подшипник, стойка управления (380/220 В, ~ 1 кВт, расстояние до 50–100 м) с источником бесперебойного питания (батарея на 15 мин работы). Кроме основных, в генераторе должны быть установлены вспомогательные шарикоподшипники, которые служат для его безаварийной остановки при отключении магнитных подшипников.

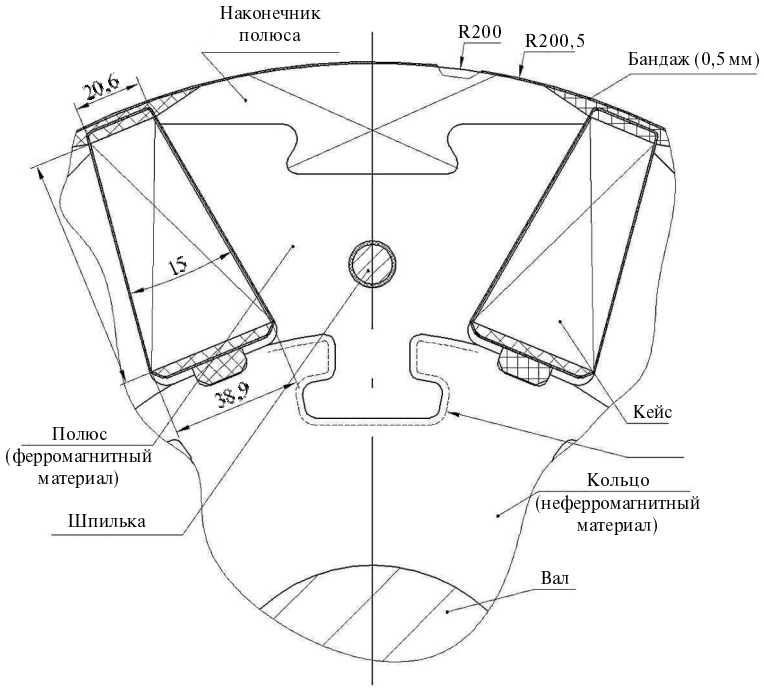


Рис. 5. Элементы ротора

Охлаждение машины — комбинированное, воздушно-водяное. Воздушное охлаждение осуществляется принудительной циркуляцией воздуха по замкнутому циклу. Подача воды в систему водяного охлаждения осуществляется от внешнего источника. В систему водяного охлаждения машины входят входной и выходной коллекторы, теплообменник вода — воздух (расположен на внешней поверхности прочного цилиндра корпуса статора), а также охладители катушек.

Система заполнения оболочки машины воздухом под избыточным давлением включает в себя фланец, расположенный в нижней части и предназначенный для подачи воздуха от внешнего вентиляционного агрегата (обеспечивается потребителем), а также электромагнитный клапан продувки, расположенный в верхней части генератора, предназначенный для поддержания избыточного давления в процессе работы и сброса воздуха при превышении допустимого значения избыточного давления.

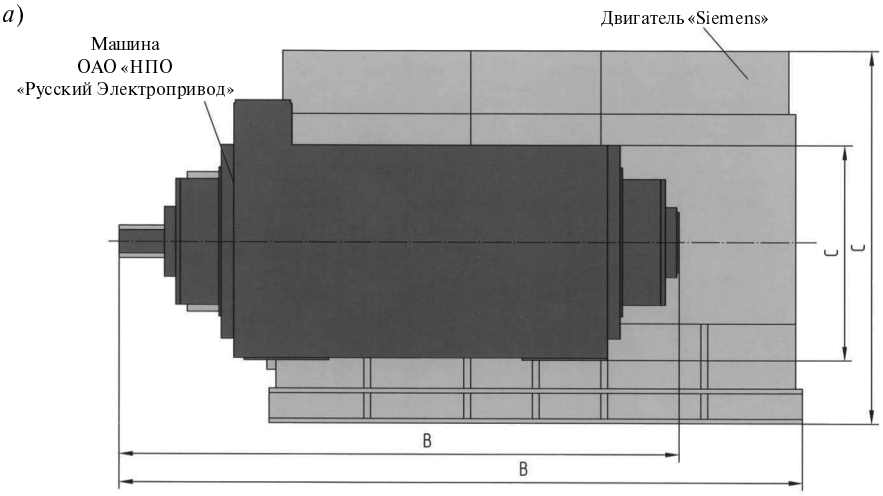
Применение высокооборотной машины

Основные параметры машины следующие:

Номинальная мощность, кВт 5380
Номинальная частота вращения, об/мин 8000
КПД в номинальном режиме не менее 0,97
Номинальное линейное напряжение (действующее значение), В 2200
Номинальный ток фазы (действующее значение), А 870
Форма тока ..... трапециидальная
Номинальная частота основной гармоники тока, Гц 533,3
Число фаз ..... 2×3(Y)
Число полюсов 8
Расход охлаждающей воды, не менее, $м^3/ч$ 15
Класс изоляции ..... *F*
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм ..... 2260×1200×1200
Масса, т 6

Использование машины в качестве приводного двигателя газоперекачивающего агрегата. Сравнение массо-габаритных показателей разработанной машины с высокооборотными асинхронными электродвигателями аналогичной мощности и частоты вращения показывает, что он примерно в два раза легче двигателя ДАРВ-6300-8200-УХЛ4 (12,5 т, продукт ООО «Электротяжмаш-Привод») и на 60 % легче двигателя типа HSHV (14,7 т, продукт ООО «Сименс-Электропривод»), а также существенно меньше их по занимаемому объему (рис. 6).

а)



б)

Наименование	Размеры			Масса, т
	A (ширина)	B (длина)	C (высота)	
Двигатель «Siemens»	2 400	3 000	1 600	14,0
Двигатель ОАО «НПО «Русский Электропривод»	1 200	2 300	1200	6

Рис. 6. Сравнение массогабаритных характеристик представленной машины

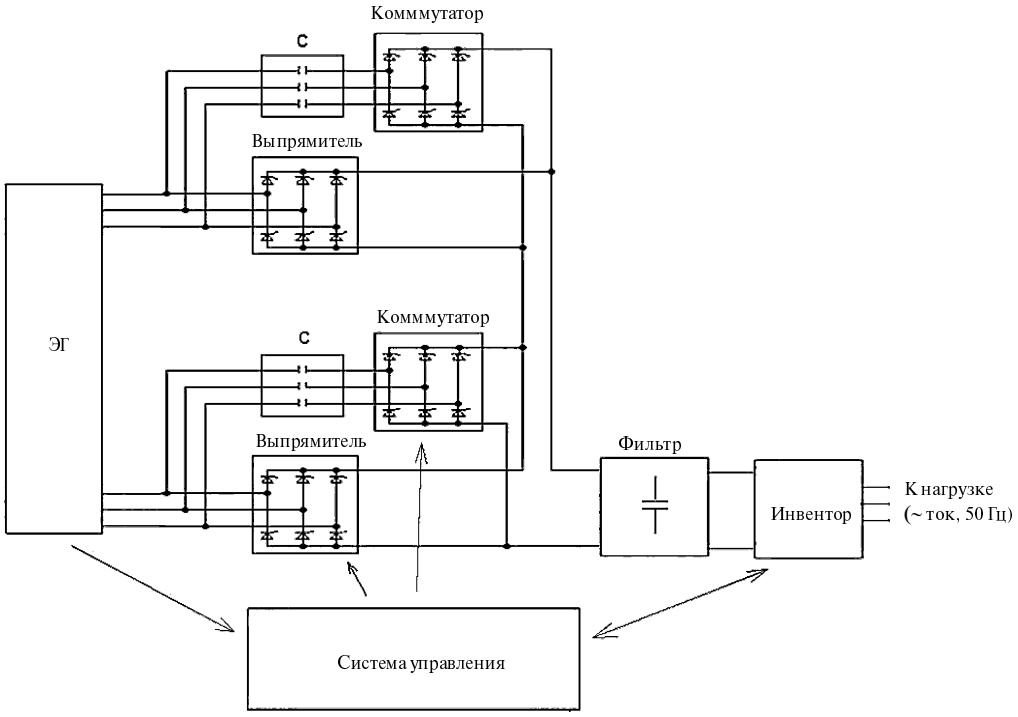


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема генераторной установки

Использование машины в качестве генератора. Для использования машины в качестве генератора необходимо иметь систему преобразования, адаптирующую выходные характеристики генератора под требования, предъявляемые к электросетям. В таком случае в состав генераторной установки будут входить: шестифазный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; система преобразования; система управления.

Параметры генераторной установки:

Номинальная мощность, кВт	5000
Номинальное напряжение, В	3300
Номинальный ток фазы (действующее значение), А	870
Частота тока, Гц	50
КПД в номинальном режиме	не менее 0,93

Упрощенная принципиальная схема генераторной установки приведена на рис. 7. Как видно из этой схемы, система питания состоит из двух включенных последовательно каналов преобразования, каждый из которых подключен к соответствующим обмоткам генератора, соединенным в трехфазную звезду. Наличие шести фаз генератора позволяет реализовать 12-типульсную схему выпрямления, что снижает пульсацию тока нагрузки (улучшает качество выходной электроэнергии).

Питание от генератора к нагрузке подается через 12-типульсный управляемый выпрямитель со звеном искусственной коммутации вентилей. Необходимость использования искусственной коммутации вентилей связана с компенсацией реактивной мощности генератора и увеличения выходной мощности до уровня 5 МВт (в режиме естественной коммутации максимальная мощность, отдаваемая генератором, составляет около 3,7 МВт).

Система управления, входящая в состав системы преобразования, обеспечивает стабилизацию выходного напряжения на заданном уровне, а также защиту генератора и системы преобразования при нештатных режимах работы оборудования комплекса.

В статье представлена высокооборотная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 5000 кВт и частотой вращения 8000 об/мин. Примененные в ней перспективные конструктивные решения позволили обеспечить частоту вращения ротора на уровне 8000 об/мин и получить удельные показатели машины, превосходящие существующие аналоги на основе асинхронных и синхронных машин.

Результаты проведенных расчетов подтвердили реализуемость данного проекта на основе существующих технологий. Однако применение ряда новых конструктивных решений в части обеспечения прочности ротора и системы охлаждения статора требует предварительной отработки на макетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евразийский патент № 014511**. Электрическая машина / ОАО «НПО «Русский Электропривод».— Приоритет от 07.04.2010 г.

2. **Евразийский патент № 014510**. Высокооборотный ротор с постоянными магнитами / ОАО «НПО «Русский Электропривод».— Приоритет от 22.03.2010 г.

УДК 631.43

Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев, А.А. Метелев

МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ В ТЕЧЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Современные требования к смазочным материалам, выдвигаемые крупнейшими автопроизводителями и отраженные в системах допусков к применению масел, базируются на шести основных критериях — энергосбережении, защите от износа, совместимости с системами подавления токсичности автомобиля, окислительной стабильности, уровне высоко- и низкотемпературных отложений. Практически все эти критерии связаны с ресурсными характеристи-

ками моторного масла и характером изменения его свойств в течение всего срока службы.

Современные моторные масла на синтетической основе имеют средний срок службы, заявленный их производителями, порядка 15 тысяч километров пробега, или около 400 моточасов в пересчете на режимы работы городского автомобиля. Однако уже сейчас некоторые производители моторных масел заявляют ресурс в 30 тысяч километров, или 800 моточасов.

Очевидно, что натурные испытания на подтверждение ресурса для подобных моторных масел — крайне ресурсоемки, дорогостоящи и длительны. Поэтому актуальна задача разработки методики ускоренных ресурсных испытаний моторных масел, основная цель которых — это получение характеристик, определяющих вышеуказанные шесть критериев качества современного моторного масла.

Такая методика была разработана и апробирована в ходе испытаний двух десятков моторных масел разных видов на кафедре двигателей внутреннего сгорания СПбГПУ.

Методика включает в себя программу проведения испытания моторного масла, состоящую из 120-тичасового теста, разделенного на 20 идентичных циклов работы двигателя. Испытание в пределах цикла — непрерывное, за исключением остановок на обслуживание и отбор проб масла на анализ. Во время работы через 1, 45, 90, 120 моточасов испытаний производится отбор проб масла на анализ в соответствии с существующими стандартами.

Режимы работы двигателя в пределах цикла испытаний подбирались исходя из условия: средние нагрузки на детали цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма, температур теплонапряженных деталей и масла в поддоне должны быть эквиваленты реально действующим на условном городском цикле эксплуатации автомобиля [4]. Применение современных методов математического моделирования позволяет корректировать выбор этих режимов в зависимости от индивидуальных особенностей двигателя и условий его эксплуатации.

Для апробации методики и проведения длительных испытаний масел была создана установка, состоящая из натурного двигателя, укомплектованного штатными системами и установленного на раму. Исходя из соображений распространенности на российском рынке, а также эквивалентности степени нагруженности узлов трения наиболее массовых типов автомобильных двигателей в качестве объекта испытаний был выбран бензиновый инжекторный двигатель ВАЗ 2111 (4Ч 8.2/7.1) с рабочим объемом $V = 1500$ см^3.

Двигатель для испытаний готовится специальным образом, чтобы искусственно увеличить скорость старения масла. Для этого увеличены тепловые зазоры в замках поршневых колец при сохранении штатных зазоров в подшипниках коленчатого вала. Повышена температура охлаждающей жидкости до 105–107 °С для увеличения температуры масла в зоне поршневых колец. Установлены форсунки охлаждения поршней для увеличения общей температуры масла и лучшего определения образования высокотемпературных отложений. Также повышена степень сжатия до $\varepsilon = 11$, что увеличивает нагрузку на детали двигателя [1].

Анализ физико-химических параметров отобранных образцов моторных масел проводится по группе параметров с использованием известных методов:

Наименование физико-химического параметра	*Метод определения*
Кинематическая вязкость при 40 и 100 °С	ГОСТ 33
Кинематическая вязкость при 150 °С	Метод СПбГПУ
Индекс вязкости	ГОСТ 25371
Щелочное число	ГОСТ 11362
Температура вспышки в открытом тигле	ГОСТ 4333
Кислотное число	ASTM D 664
Содержание активных элементов (Zn, Ca, P)	МВИ М-049-М/99
Содержание серы	ASTM D 4294

Контроль скорости образования низкотемпературных отложений проводится по изменению массы контрольных весовых элементов, установленных в клапанной крышке и поддоне двигателя. Уровень высокотемпературных отложений проводился визуально с использованием аналога метода ПЗВ, а также количественно — по изменению массы впускных и выпускных клапанов и свечей зажигания.

Контроль скорости износа проводится по изменению массы поршневых колец и вклады-

шей подшипников коленчатого вала, а также по накоплению продуктов износа (механических примесей) в моторном масле.

Оценка энергосберегающих функций испытуемого моторного масла проводится по моторным показателям (удельный расход топлива и расход топлива на режиме холостого хода), определенным в ходе стендовых испытаний эталонного двигателя, в сравнении с аналогичными параметрами, замеренными при работе на базовом масле. За базовое масло принято минеральное масло группы 15W-40 группы качества по API SJ/CD. Кроме того, сопоставляются величины моментов механических потерь двигателя при работе на испытуемом и базовом масле, измеренные методом прокрутки от стенда.

Оценка энергосберегающих функций проводится на двух стадиях испытания — в начале цикла, на свежем масле, и по окончании испытаний.

Для оценки степени ресурсного изменения параметров моторного масла вводилась система ограничений, выход за которые приравнивался к окончанию его срока службы.

В качестве таких ограничений принимались:

пределы изменения кинематической вязкости при 100 °С, соответствующие классам вязкости по SAE;

снижение щелочного числа более чем в два раза по отношению к начальному значению;

снижение содержания активных компонент в масле (Zn, P, Ca) более чем в два раза от начального уровня.

При апробации предложенной методики были проведены ускоренные ресурсные испытания двенадцати полусинтетических и синтетических моторных масел различных производителей и различных групп качества по API и ACEA.

Ниже приведены некоторые результаты проведенных испытаний. На рис. 1 и 2 можно видеть данные по динамике изменения кинематической вязкости при 100 °С и щелочного числа четырех образцов полусинтетических моторных масел различных фирм. Все масла имели группу вязкости по SAE 10W-40 и группу качества по API SL/CF.

Как видно из приведенных результатов, все масла, за исключением образца №1, имеют общий характер изменения вязкостных свойств по мере наработки в двигателе. Сначала наблюдается участок падения вязкости, очевидно, объясняемый постепенным срабатыванием пакета загущающих присадок. После этого происходит кратковременная стабилизация вязкости, после чего она начинает расти. Последнее объясняется накоплением в масле продуктов окисления

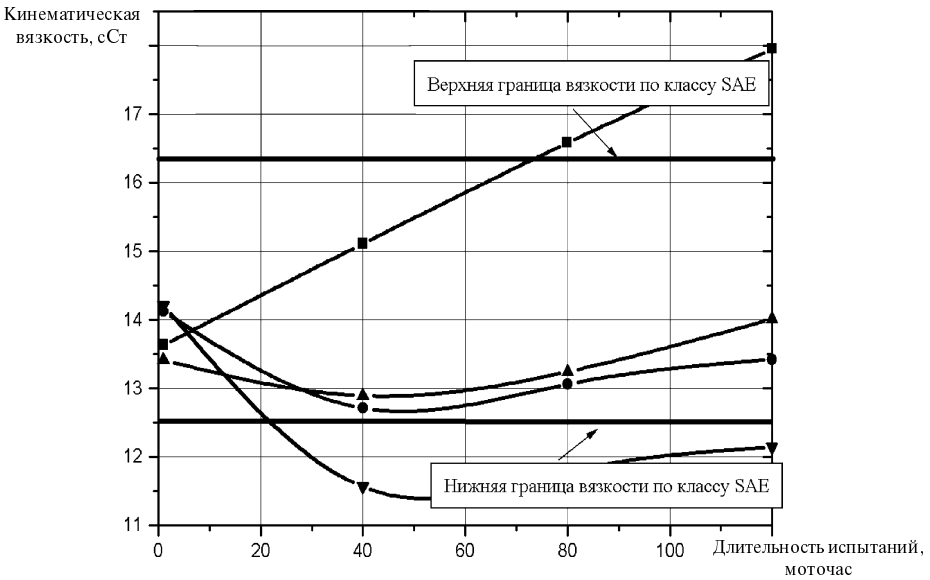


Рис. 1. Изменение кинематической вязкости при 100 °С образцов полусинтетических моторных масел по мере их наработки в двигателе

(масла: —■— № 1; —●— № 2; —▲— № 3; —▼— № 4)

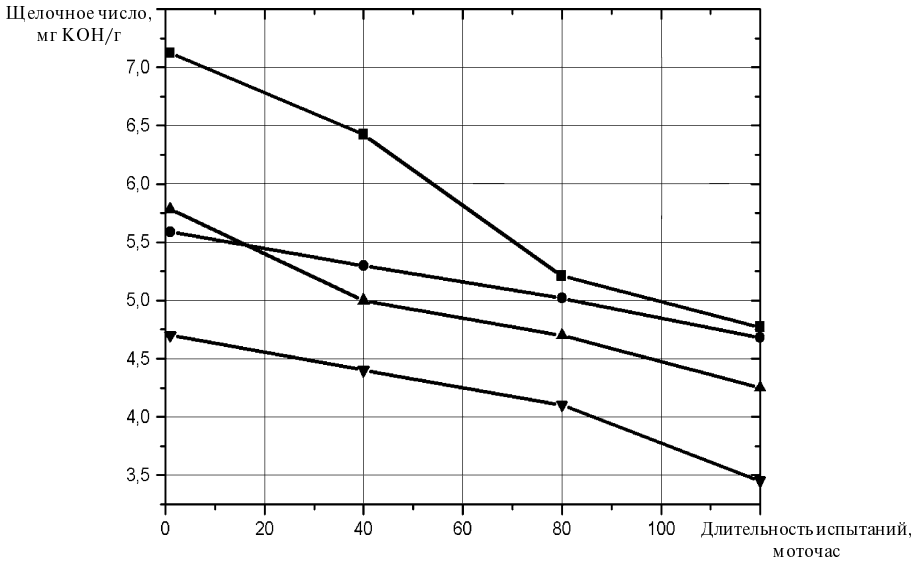


Рис. 2. Изменение щелочного числа образцов полусинтетических моторных масел по мере их наработки в двигателе

(масла: —■— № 1; —●— № 2; —▲— № 3; —▼— № 4)

и полимеризации. Из общей картины выпадает образец масла №1, где во всех контрольных пробах наблюдалось постепенное нарастание вязкости. Дальнейшее исследование образца, проведенное совместно с лабораторией фирмы-производителя этого масла, выявило его фальсифицированный характер.

Образец масла №4 показал резкое падение вязкости на начальном участке работы, что характеризует недостаточное качество использованных загущающих присадок. Образцы масел №2 и №3 иллюстрируют нормальную работу масел этой группы качества.

В данном случае эти примеры были приведены для иллюстрации работы системы браковочных параметров. Образцы №1 и №4 были забракованы в связи с ускоренным выходом измеренных величин кинематической вязкости за пороговые значения, определяемые заявленным классом вязкости по SAE.

Изменение щелочного числа моторных масел более прогнозируемо (рис. 2) — наблюдается четко выраженная тенденция их снижения по мере наработки масла.

Полученные результаты показывают достаточно монотонный характер зависимостей кинематической вязкости, щелочного и кислотного числа от времени наработки моторного масла в двигателе. Это позволяет аппроксимировать эти зависимости в виде полиномиальных кривых третьего порядка:

$$\nu_{100} = a_0 + a_1 t + a_2^2 + a_3^3;$$

$$\text{ЩЧ} = b_0 + b_1 t + b_2^2 + b_3^3;$$

$$\text{КЧ} = c_0 + c_1 t + c_2^2 + c_3^3,$$

где ν_{100}, ЩЧ, КЧ — соответственно кинематическая вязкость, щелочное и кислотное число на заданном временном участке испытаний; a_i, b_i, c_i — коэффициенты аппроксимации, которые определяются эмпирически по итогам длительных моторных испытаний.

Полученные зависимости позволяют аппроксимировать зависимости по основным физико-химическим параметрам моторных масел вплоть до достижения ими ресурсных пределов и тем самым определять сравнительный срок службы относительно базового масла.

Следующий пример иллюстрирует результаты испытаний синтетических моторных масел разных групп качества по API. В испытаниях приняли участие по два моторных масла группы качества SL и SM одного класса вязкости по SAE 5W-40. Некоторые результаты испытаний сведены в табл. 1.

Анализируя полученные данные, следует отметить значимость изменений большинства

Таблица 1

Физико-химические показатели испытуемых моторных масел*

Параметр масла	Значения параметра для четырех образцов масел двух групп качества			
	Группа SL		Группа SM	
	Масло №1	Масло №2	Масло №3	Масло №4
Кинематическая вязкость при 40 °С, сСт	81,0/94,4	83,7/106,7	84,4/105,5	80,1/96,5
Кинематическая вязкость при 100 °С, сСт	14,1/15,6	14,3/17,0	14,6/16,4	13,8/14,4
Кинематическая вязкость при 150 °С, сСт	6,24/6,79	6,06/6,97	6,06/6,92	5,79/6,45
Индекс вязкости	180/176	177/174	196/182	170/154
Условная температура проворачиваемости к/вала, T_{5000}, °С (расчет)	−24/−21	−24/−20	−26/−21	−23/−21
Щелочное число, мг KOH/г масла	7,10/6,14	7,30/6,20	8,40/7,70	6,45/6,02
Общее кислотное число, мг KOH/г масла	1,82/2,73	1,90/2,77	1,91/2,30	1,21/2,23
Температура вспышки в открытом тигле, °С	236/238	223/225	227/228	232/234
Содержание железа, *ppm*	15,5	12,0	3,5	4,5
Содержание алюминия, *ppm*	214,2	184,3	48,9	55,6
Содержание хрома, *ppm*	7,2	9,8	4,5	5,2

* В числителе находятся показатели, определенные в пробах масла после начальной приработки (6 моточасов), в знаменателе — в итоговых пробах (120 моточасов)

физико-химических показателей испытуемых масел. В частности, уровень вязкости у всех масел во всем диапазоне температур существенно возрос (до 10–15 %), индекс вязкости упал на 2–8 %, что говорит о накоплении в маслах продуктов окислительной полимеризации. Кроме того, щелочные свойства масел уменьшились на 5–15 %, а кислотность возросла до 2–2,5 раз.

Следует отметить, что содержание продуктов износа в конечных пробах существенно меньше у масел группы SM. По остальным показателям для масел групп SM и SL получены сопоставимые результаты.

Износ деталей двигателя и накопления отложений измерялся путем их взвешивания до и после эксперимента. Данные, полученные путем взвешивания вкладышей подшипников коленчатого вала и поршневых колец (табл. 2), позволяют сделать выводы о ресурсосберегающих свойствах масел.

Таблица 2

Данные весового анализа контрольных деталей

Параметр (потеря массы)	Значения параметра для четырех образцов масел двух групп качества			
	Группа SL		Группа SM	
	Масло №1	Масло №2	Масло №3	Масло №4
Усредненный износ коренных подшипников коленчатого вала, мг	35,4	28,3	18,4	19,9
Усредненный износ шатунных подшипников коленчатого вала, мг	43,2	34,6	26,6	22,4
Усредненный износ первых поршневых колец, мг	6,5	6,9	3,4	3,9
Усредненный износ вторых поршневых колец, мг	8,3	7,5	5,2	5,3

Наилучшие показатели в данном случае имеют масла группы SM, что выражается в меньших скоростях износа узлов трения. Кроме того, более высокое значение высокотемпературной вязкости масла №3 дает большее снижение скоростей износа сопряжений трения как в ЦПГ, так и в подшипниках коленчатого вала. Это же подтверждается самым малым содержанием металлических продуктов износа в конечных пробах масла.

Массы отложений, представленные ниже в табл. 3, на контрольных элементах (маслоотражатель в клапанной крышке и маслозаборник маслонасоса) также меньше при работе двигателя на маслах группы SM (21–31 мг) по сравнению с маслами группы SL (46–64 мг).

Таким образом, разработанная методика обеспечивает получение достоверной сравнительной информации по ресурсным изменениям моторных масел, а также по всем группам их показателей, используемых при проведении испытаний на допуск моторного масла к применению на тех или иных типах двигателей.

Таблица 3

Измеренные массы отложений на контрольных весовых элементах в клапанной крышке и масляном поддоне

Расположение контрольного весового элемента	Значения отложений для четырех образцов масел двух групп качества			
	Группа SL		Группа SM	
	Масло №1	Масло №2	Масло №3	Масло №4
В клапанной крышке	58	46	24	21
В масляном поддоне	64	52	28	31

В перспективе планируется установка на стендовые двигатели штатных систем подавления токсичности, что позволит оценивать также совместимость моторных масел с ними по уровню снижения эффективности гашения отдельных токсических компонент при длительной работе двигателя на испытуемом моторном масле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Метелев, А.А.** Разработка методики и создание установки для проведения ресурсных испытаний моторных масел [Текст] / А.А. Метелев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы междунар. научной конф. Ч. III.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 5–7.

2. **Метелев, А.А.** Методика и результаты ресурсных испыт // XXV Междунар. научно-техн. конф. «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей», посвящ. 300-летию Царского Села. СПб.: Изд-во СПбГАУ, 2010.— С. 113–123.

3. **Метелев, А.А.** О влиянии времени работы моторного масла в двигателе на изменение его физико-химических показателей [Текст] / А.А. Метелев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Матер. междунар. научно-практ. конф., Ч. III.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— С. 8–10.

4. **Метелев, А.А.** Расчетное обоснование режима работы стендового двигателя при проведении ресурсных испытаний энергосберегающих моторных масел [Текст] / А.А. Метелев, А.Ю. Шабанов, А.Б. Зайцев // XXXX Неделя науки СПбГПУ: Матер. междунар. научно-практ. конф., Ч.I II.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 5–7.

УДК 621.22 623.3 620.91 622.63

Ю.С.Васильев, Г.И.Сидоренко, В.В.Фролов

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Во многом энергетическая безопасность в современных условиях формируется на региональном уровне. Степень обеспеченности регионов собственными топливно-энергетическими ресурсами — один из основных показателей восприимчивости регионов к угрозам энергетической безопасности. Освоение и использование местных энергетических ресурсов (гидроэнерге-

тика малых рек, ветровая энергия, древесное топливо и др.) в России позволит в перспективе перевести многие регионы на энергообеспечение за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ), обеспечив их энергетическую независимость [3, 7].

Программы развития региональной гидроэнергетики формируются на основе водноэнергетических кадастровых исследований. Энергетическое использование гидроресурсов в настоящее время наиболее эффективно путем создания каскадов гидроэлектростанций. В России к малым гидроэлектростанциям (МГЭС) относятся ГЭС мощностью до 25–30 МВт [4]. МГЭС могут работать по водотоку или выполнять регулирование стока в интересах энергетики, повышая гарантированную отдачу. Оба типа МГЭС имеют свою специфику работы [1–4]. МГЭС можно классифицировать по разным критериям: по мощности, напору, режиму работы, степени автоматизации и другим [4]. На рис.1 дана классификация МГЭС по благоприятным условиям создания.

Правильный выбор параметров МГЭС имеет ключевое значение для обоснования ее экономической эффективности, с одной стороны, и повышения ее экологичности, с другой. МГЭС характеризуется комплексом свойств, которые определяют эффективность ее функционирования в различных аспектах. В общем случае эти свойства отражают экономическую эффективность, качество и надежность производства электроэнергии, влияние на природную среду, экономические и социальные условия.

Обоснование параметров МГЭС — сложная комплексная задача. На это, безусловно, влияют природные, социальные, экологические, экономические, технические и другие факторы. В процесс создания и функционирования МГЭС вовлекаются различные виды ресурсов (ограниченных), оценка которых (при обеспечении основной цели — энергоснабжения) и определяет обоснованность выбора ее параметров.

Основополагающие принципы и теория обоснования параметров гидроэнергетических объектов изложены в классических работах [1, 2]. Применительно к МГЭС эти подходы были адаптированы в [4]. Инженерные проблемы проектирования МГЭС рассмотрены в работах [4, 12]. В практике часто реализуется проектирование под определенный гидроагрегат. В работе [6] дано достаточно полное формализованное описание многопараметрической задачи обоснования параметров МГЭС.

Следуя [6] в качестве критерия оптимальности, используемого при обосновании параметров МГЭС как природно-технической системы, принят интегральный критерий:

$$f_0 = \sum_{i=1}^{n} \upsilon_i f_i \to \max, \text{ где } \sum_{i=1}^{n} \upsilon_i = 1. \qquad (1)$$

Коэффициент υ_i определяет важность каждого локального критерия f_i в принятии решения. В некоторых случаях целевая функция может быть представлена в более простом виде [10]:

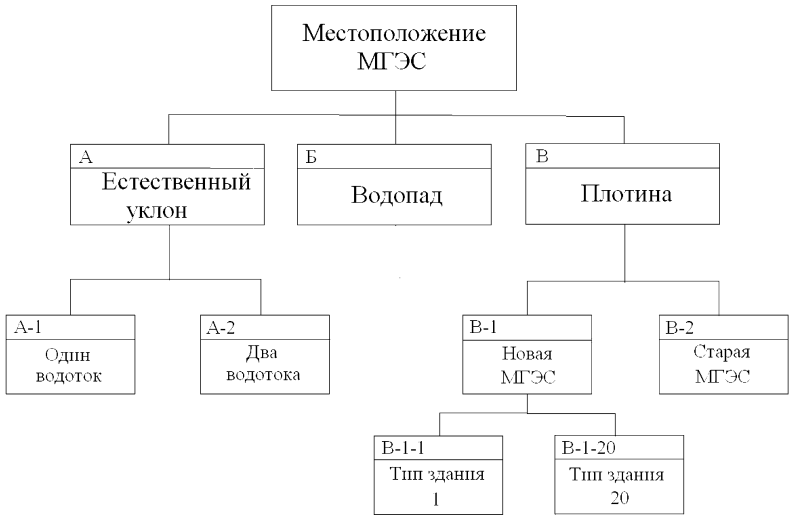


Рис. 1. Классификация малых гидроэлектростанций по природным условиям строительства

$$З(P) = \sum_{i=1}^{5} З_i(P) - \sum_{k=1}^{3} Z_k{}^A(P) \Rightarrow \min, \qquad (2)$$

где P — вектор оптимизируемых параметров МГЭС; $З(P)$ — суммарные затраты в варианте МГЭС с учетом внеэнергетических, социальных и экологических эффектов; $З_1$ — затраты непосредственно в системе энергоснабжения (на основе МГЭС); $З_2$ — затраты, связанные с изъятием природных ресурсов (земля, вода и др.) для реализации системы энергоснабжения; $З_3$ — затраты, связанные с ликвидацией или компенсацией ущерба, нанесенного окружающей среде системой энергоснабжения; $З_4$ — затраты, связанные с поддержанием определенного уровня надежности, живучести и т. д.; $З_5$ — прочие затраты; $Z_1{}^A$ — дополнительные внеэнергетические эффекты (технологические); $Z_2{}^A$ — дополнительные эффекты социальные; $Z_3{}^A$ — дополнительные эффекты экологические. Как правило, первая составляющая существенно больше второй. Варианты в (2) тождественны по производственному эффекту.

Оптимизируемыми параметрами являются: схема создания напора, отметка нормального подпорного уровня, полезный объем водохранилища, установленная мощность МГЭС, число гидроагрегатов, тип-марка турбин, диаметр рабочего колеса турбины, тип компоновки здания МГЭС и другие [1–9, 12]. Предполагается известным размещение створа МГЭС на водотоке. Решение задачи выбора оптимальных створов МГЭС в каскаде дано в [9].

При известном месторасположении створа МГЭС изучаются исходные данные: топографический план участка реки, геологические и гидрологические условия [11]. Намечаются варианты состава сооружений в створе гидроузла. Для русловых или приплотинных зданий МГЭС в створе гидроузла размещаются водосбросное сооружение и глухая плотина.

Водосбросным сооружением может быть здание МГЭС (совмещенное с поверхностными или донными водосбросами), водосливная плотина, береговой поверхностный или донный водосброс. Размеры здания МГЭС определяются в соответствии с параметрами устанавливаемого энергетического оборудования. Длина здания МГЭС определяет, какую часть напорного фронта не может занимать водосбросное сооружение.

Размеры водосбросных сооружений определяются по условию пропуска расхода заданной обеспеченности. Длина глухой плотины должна обеспечивать замыкание створа. При проектировании этих сооружений определяются все их параметры, объемы бетонных и земляных работ. Проверяется устойчивость сооружений и определяются величины капиталовложений.

Компоновка сооружений в выбранном створе зависит от параметров МГЭС. Рассмотрим наиболее типичный случай, когда напорный фронт создается зданием МГЭС, водосливной и глухой плотиной. В процессе проектирования необходимо выбрать место для каждого из сооружений и определить их основные размеры.

Процесс компоновки сооружений — итерационный. На первом этапе на топографическом плане и геологическом профиле по створу намечается предполагаемое размещение сооружений (пока без каких-либо расчетов их размеров). Это дает информацию для последующих расчетов: отметки местности, геологические характеристики и т.д.

Затем вычисляются размеры здания МГЭС в плане. Определяется первоначальная длина водосливного фронта. Проверяется, умещаются ли в расчетном створе здание МГЭС и водосливная плотина. Используется следующая очередность проектирования отдельных сооружений в выбранном створе: проектируется глухая плотина и определяются капиталовложения на один погонный метр; далее проектируется водосливная плотина; при обосновании длины водосливного фронта учитывается возможность ее уменьшения за счет увеличения удельного расхода и протяженности глухой плотины.

Перейдем к формализованному описанию задачи. В составе сооружений МГЭС выделяются: глухая плотина, водосливная плотина, собственно здание МГЭС, канал (подводящий и/или отводящий) или напорный трубопровод (подводящий и/или отводящий). Соответственно обозначим вектора параметров этих сооружений — $(X)_D$, $(X)_В$, $(X)_З$, $(X)_К$, $(X)_Т$. Их можно описать так:

Размеры, определяющие длину блока МГЭС

x_1^3 — длина надводной части блока, м;

x_2^3 — толщина напорной стенки (н.ст.), м;

x_3^3 — длина водоприемной камеры, м;
x_4^3 — расстояние от левого края н.ст. до оси агрегата, м;
x_5^3 — расстояние от оси до правого края стенки блока, м;
x_6^3 — расстояние от левого края нижней камеры до оси агрегата, м;
x_7^3 — расстояние от оси до конца верхнего строения, м;
x_8^3 — расстояние от конца верхнего строения до конца фундаментной плиты, м;
x_9^3 — расстояние от левой стенки нижней камеры до оси рабочего колеса (РК), м;
x_{10}^3 — расстояние от оси РК до конца фундаментной плиты, м;
x_{11}^3 — длина нижней камеры, м;
x_{12}^3 — общая длина блока, м

Размеры, определяющие высоту блока МГЭС

x_{13}^3 — общая высота блока, м;
x_{14}^3 — высота турбинной камеры, м;
x_{15}^3 — высота нижней камеры, м;
x_{16}^3 — расстояние между минимальным УВБ и верхней кромкой РК, м;
x_{17}^3 — расстояние от верхней до нижней кромки РК, м;
x_{18}^3 — толщина фундаментальной плиты, м;
x_{19}^3 — расстояние от нижней кромки отсасывающей трубы (ОТ) до дна нижней камеры, м;
x_{20}^3 — расстояние между минимальным УНБ и нижней кромкой ОТ, м;
x_{21}^3 — высота блока, м;
x_{22}^3 — расстояние между минимальным уровнем ВБ и дном ОТ, м;
x_{23}^3 — высота ОТ на выходе, м;
x_{24}^3 — расстояние от поверхности земли до оси трубопровода, м

Высотные отметки и характерные размеры по высоте

x_{25}^3 — минимальный напор МГЭС, м;
x_{26}^3 — максимальный напор МГЭС, м;
x_{27}^3 — максимальная отметка уровня верхнего бьефа, м;
x_{28}^3 — минимальная отметка уровня верхнего бьефа, м;
x_{29}^3 — максимальная отметка уровня нижнего бьефа, м;
x_{30}^3 — минимальная отметка уровня нижнего бьефа, м;
x_{31}^3 — высота отсасывания, м

Габаритные размеры агрегата

x_{32}^3 — диаметр рабочей камеры с учетом направляющего аппарата (НА), м;
x_{33}^3 — диаметр РК турбины, м;
x_{34}^3 — диаметр ОТ на выходе, м;
x_{35}^3 — входной диаметр ОТ, м;
x_{36}^3 — характерный размер спиральной камеры, м

Ширина блока МГЭС

x_{37}^3 — ширина блока, м;
x_{38}^3 — ширина подвода к спиральной камере или ширина приемной камеры, м;
x_{39}^3 — ширина стенки блока, м;
x_{40}^3 — ширина нижней камеры, м;
x_{41}^3 — ширина основного прохода в спиральную камеру, м;
x_{42}^3 — ширина дополнительного прохода в спиральную камеру, м.

Схемы сооружений с указанием параметров приведены в [6].

Обозначим управляющие (оптимизируемые) параметры выделенных сооружений с помощью векторов — $(Y)_D$, $(Y)_В$, $(Y)_З$, $(Y)_К$, $(Y)_Т$. Их можно описать так:

Общие параметры

$V_п$ — полезный объем водохранилища, м^3;
R_0 — схема создания напора, о. е.;
$Z_{НПУ}$ — отметка нормального подпорного уровня, м;

Здание МГЭС

$R_З$ $R_З$ — тип здания станции, о. е.;
$N_У$ — установленная мощность МГЭС, кВт;
m — число блоков в здании станции;
$Q_{гм}$ — максимальный расход, пропускаемый через агрегаты станции, м^3/с;
$R_{ГА}$ — тип гидроагрегата, о. е.;
D_1 — диаметр рабочего колеса турбины, м;
n — частота вращения рабочего колеса турбины, об/мин

Водосливная плотина

H_B — высота водосливной плотины, м;
L_B — длина водосливной плотины, м

Открытый канал

$(Y)^К$ — вектор координат оси канала в плане и профиле, м;
$b_к$ — ширина канала по дну, м

Напорный трубопровод

$(Y)^т$ — вектор координат оси трубопровода в плане и профиле, м;
$D_{тр}$ — диаметр трубопровода, м

Приняты следующие допущения: 1) на МГЭС установлены однотипные гидроагрегаты, имеющие одни и те же технико-экономические характеристики; 2) число блоков здания МГЭС совпадает с числом установленных агрегатов. На элементы векторов $(Y)_i$ накладываются ограничения, которые сформулированы в [6, 7].

В соответствии с основными сооружениями МГЭС выделены вектора базовых свойств [6]. Вычисление базовых свойств осуществляется на основе математических моделей сооружений МГЭС. Под математической моделью сооружений МГЭС будем понимать совокупность математических зависимостей, устанавливающих связь между базовыми свойствами и управляющими переменными. В данной статье основное внимание уделено описанию математической модели здания МГЭС. В качестве примера в табл. 3 дано описание базовых свойств оборудования и сооружений МГЭС:

Здание МГЭС

$Э_г(j)$ — энергия, вырабатываемая МГЭС за год j, кВт.ч;
$N_г(j)$ — мощность МГЭС в режиме i, кВт;
$\eta_г(i)$ — коэффициент полезного действия МГЭС в режиме i, о. е.;
$H(i)$ — статический напор на МГЭС в режиме i, м;
$Q_г(i)$ — расход на МГЭС в режиме i, м^3/с;
W_0 — общий объем здания станции, м^3;
w_0 — удельный объем бетона в здание станции, м^3/кВт;
$F_{от}$ — площадь отчуждения земель под здание станции, м^2;
$W_З$ — объем земляных работ по зданию станции, м^3;
$P_т$ — вес турбины, т;
P_G — вес генератора, т.

Важное значение в общей схеме обоснования параметров МГЭС имеют водноэнергетические расчеты. Для фиксированных параметров ГЭС решается задача регулирования стока и обосновывается установленная мощность МГЭС, а также определяется гарантированная выработка электроэнергии.

Параметры оборудования и сооружений МГЭС ($R_З$, $N_У$, m, $Q_{гм}$, $R_{га}$, D_1, n) влияют на базовые свойства МГЭС. Рассмотрим вычисление первых трех базовых свойств (табл. 3) во времени с учетом регулирования стока.

При проведении водноэнергетических расчетов решается следующая оптимизационная задача. Пусть t_0 и t_k — соответственно начальный и конечный моменты времени. Для заданного периода времени $T = [t_0; t_k]$, разбитого на k непересекающихся интервалов $\Delta t_i = [t_{i-1}; t_i]$, $i \in (1, k)$, и заданных зависимостях $a(V_i)$ и $b(Q_i)$ требуется найти максимум функционала

$$Э = \sum_{i=1}^{k} N_i \Delta t_i \to \max, \quad \Delta t_i = t_i - t_{i-1}, \tag{3}$$

для

$$N_i = 9{,}81 Q_i \bar{H}_i \eta_i ; \; \bar{H}_i = \frac{H_{i-1} + H_i}{2} ;$$

$$H_i = a(V_i) - b(Q_i); \tag{4}$$

$$V_i = V_{i-1} + (S_i - Q_i - P_i)\Delta t_i \tag{5}$$

при ограничениях

$$Q_i \le Q_{гм}, \; 0 \le V_i < V_{\max}. \tag{6}$$

В зависимостях (3)–(6) для режима i использованы следующие обозначения: N_i — мощность МГЭС; Q_i — расход МГЭС; $\bar{H}_i$ — средний напор; H_i — напор МГЭС нетто; V_i — объем воды в водохранилище; P_i — потери воды из водохранилища (холостые сбросы, потери на испарение, фильтрацию, забор воды из водохранилища водопотребителями и водопользователями); S_i — приточность воды в водохранилище, $Q_{гм}$ — максимальная пропускная способность МГЭС; $V_{\max}$ — максимальный объем водохранилища.

Энергопроцесс в водопроводящем тракте (ВТ) МГЭС непосредственно определяет мощность, выдаваемую МГЭС в разных режимах. Математическая модель энергопроцесса в ВТ МГЭС описывается следующими соотношениями.

Ежегодная выработка энергии на МГЭС в год j составит

$$Э_г(j) = \sum_{i=i_{0j}}^{i=i_{kj}} N_г(i)\Delta t_i, \quad (7)$$

где i_{0j} и i_{kj} — номера начального и конечного режимов работы МГЭС в водохозяйственном году j. Каждый режим i длится определенный период, а сумма этих временных периодов за год равна продолжительности года.

Развиваемая мощность МГЭС в режиме i составит

$$N_г(i) = gQ_т(i)H_т(i)\eta_г(i)m, \quad (8)$$

где

$$\eta_г(i) = \frac{H(i) - \nabla H(i)}{H(i)}\eta_т(i)\eta_G(i),$$

где g — ускорение свободного падения; $\eta_т(i)$ — коэффициент полезного действия гидротурбины в режиме i; $\eta_G(i)$ — коэффициент полезного действия генератора в режиме i.

Расход турбины $Q_т(i)$ определяется по формуле

$$Q_т(i) = \frac{Q_г(i)}{m}. \quad (9)$$

Потери напора в водопроводящем тракте МГЭС в режиме i:

$$\nabla H(i) = \\ = \sum_k \Delta h_{mk}(i) + \nabla h_т(i) + \sum_k \Delta h_{lk}(i) + \Delta h_в(i), \quad (10)$$

где $\nabla h_т(i)$ — потери в проточной части гидротурбины,

$$\nabla h_т(i) = \left(1 - \eta_т(i)\right)H_т(i). \quad (11)$$

Напор на турбине в режиме i:

$$H_т(i) = H(i) - \sum_k \Delta h_{mk}(i) - \sum_k \Delta h_{lk}(i) - \Delta h_в(i), \quad (12)$$

где $H(i) = \nabla ZB(i) - \nabla ZH(i)$ — статический напор в режиме i; $\nabla ZB(i), \nabla ZH(i)$ — уровни воды соответственно в верхнем и нижнем бьефе.

Уровни воды в верхнем бьефе в каждый момент времени определяются по графику изменения уровней в водохранилище, уровни в нижнем бьефе — расходами воды, поступающими в нижний бьеф (независимо от того, идут ли они через турбины МГЭС, водосброс или другие сооружения) по кривой $Q = f(z)$.

Потери напора $\nabla h_в(i)$ в водоприемнике с решеткой определяются по формуле

$$\nabla h_в(i) = \xi_в \frac{\vartheta_{вi}^2}{2g}, \quad (13)$$

где $\vartheta_{вi}$ — средняя скорость воды в водоприемнике в режиме i, $\xi_в$ — коэффициент потери напора на решетке. Потери напора по длине $\nabla h_{lk}(i)$ определяются по формуле Вейсбаха—Дарси (для трубопровода деривационной МГЭС):

$$\nabla h_{lk}(i) = \lambda \frac{L_k}{D_{тр}} \frac{\vartheta_{ik}^2}{2g}, \quad (14)$$

где ϑ_{ik} — средняя скорость воды в k-м элементе трубопровода в режиме i; λ — коэффициент потерь напора по длине; L_k — длина k-го участка трубопровода.

Местные потери $\nabla h_{mk}(i)$ зависят от типа и конфигурации местных сопротивлений.

За расчетный напор МГЭС принимается средневзвешенный напор нетто:

$$H_{ср\,в} = \frac{\sum H_т(i)N_г(i)t_i}{\sum N_г(i)t_i}, \quad (15)$$

где $H_т(i)$ — напор на гидротурбине в режиме i; t_i — время работы в режиме i.

Частота вращения ротора генератора принимается равной частоте вращения турбины. При наличии мультипликатора с учетом коэффициента его передачи. Для определения основных параметров гидрогенератора исходными данными служат: номинальная мощность гидротурбины $N_т$, тип гидроагрегата $R_{га}$, диаметр рабочего колеса D_1 и его номинальная частота вращения n.

Агрегаты МГЭС следует по возможности комплектовать серийными асинхронными генераторами или двигателями в качестве генераторов, а в случае необходимости — серийными повышающими передачами — мультипликаторами. В ряде случаев могут быть использованы серийные синхронные генераторы.

Математическая модель здания МГЭС позволяет осуществить расчет ориентировочных размеров здания МГЭС и объема бетона в нем в зависимости от параметров МГЭС. Расчетные схемы различных типов зданий МГЭС приведены в [6]. Определены области применения различных типов зданий МГЭС.

В качестве примера, рассмотрим схему, где $R_3 = 1$ (показана на рис.2). Здание МГЭС данного типа имеет открытую турбинную камеру и прямоосную коническую отсасывающую трубу. Ширина блока МГЭС данного типа определяется соотношением

$$x_{31} = k_1 D_1, \qquad (16)$$

где k_1 — постоянный коэффициент из интервала 2,5–3.

Толщина стенки блока постоянна и равна $x_{39} = 0,45$. Ширина приемной камеры составит

$$x_{38} = x_{37} - 2x_{39}. \qquad (17)$$

Ширина нижней камеры принимается равной ширине приемной камеры:

$$x_{40} = x_{38};$$

так как схема потока симметрична, то $x_{41} + x_{42} = x_{38}$.

Габаритные размеры, определяющие длину отдельных элементов МГЭС, находятся по следующим зависимостям:

толщина напорной стенки $x_2 = 0,45$ м;

расстояние от оси агрегата до внешней плоскости стенки приемной камеры $x_5 = x_{35}/2$;

расстояние от начала приемной камеры до оси агрегата (для данной схемы $x_7 = x_4$) $x_4 = x_5 + 1$ м;

расстояние от оси агрегата до конца верхнего строения, $x_7 = x_5 - x_2 + 1,45$ м;

длина верхней части блока МГЭС $x_1 = x_4 - x_7$;

расстояние от оси отсасывающей трубы до конца нижней части блока МГЭС, $x_{10} = x_1 - x_4 + x_8$;

выходной диаметр отсасывающей трубы $x_{34} = 1,8 D_1$;

расстояние от левой стенки нижней камеры до оси отсасывающей трубы $x_9 = x_{34}/2 + (0,8 - -1,0) D_1$;

длина нижней камеры блока МГЭС $x_{11} = x_9 + x_{10} + 0,45$ м;

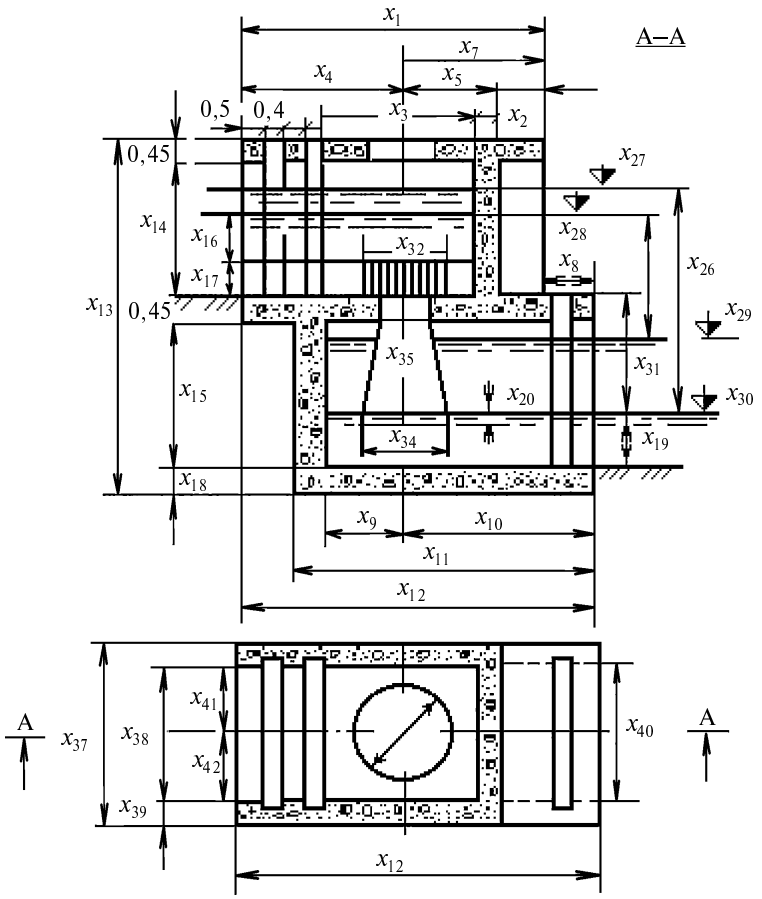


Рис. 2. Здание станции с открытой турбинной камерой и прямоосной конической отсасывающей трубой

длина блока МГЭС $x_{12} = x_4 + x_{10}$.

Габаритные размеры, определяющие длину и высоту отдельных элементов МГЭС, находят следующим образом.

Характерные уровни воды в верхнем бьефе:

$$x_{27} = \max ZB(.),\ \ x_{28} = \min ZB(.).$$

Характерные уровни воды в нижнем бьефе:

$$x_{29} = \max ZH(.),\ \ x_{30} = \min ZH(.).$$

Высота нижней камеры:

$$x_{15} = x_{19} + x_{20} + x_{29} - x_{30} + a_1,$$

где $a_1 = 0,5 - 0,75$ м — конструктивный запас.

Расстояние от нижней кромки отсасывающей трубы до дна нижней камеры составит

$$x_{19} = (1-1,5)D_1 \text{ при } D_1 \le 1 \text{ м};$$

$$x_{19} = D_1 \text{ при } D_1 > 1 \text{ м}.$$

Заглубление нижней кромки отсасывающей трубы под минимальный уровень нижнего бьефа составит $x_{20} = 0,3 - 0,5$ м.

Толщина дна нижней камеры принимается равной $x_{18} = 0,45$ м.

Расстояние от верхней до нижней кромки рабочего колеса турбины равно

$$x_{17} = k_2 D_1,$$

где $k_2 = 0,85 - 1,0$ (для радиально-осевых гидротурбин), $k_2 = 0,6 - 0,85$ (для осевых гидротурбин).

Высота приемной камеры составит

$$x_{14} = x_{17} + k_3 D_1 + x_{27} - x_{28} + a_2, \qquad (19)$$

где k_3 — постоянный коэффициент из интервала 1,0–1,8; $a_2 = 0,5–1,0$ м.

Высота блока здания МГЭС определяется по формуле

$$x_{13} = x_{14} + x_{15} + x_{18} + 0,45. \qquad (20)$$

Для обеспечения безкавитационной работы отметка рабочего колеса гидротурбины ∇PK_i в режиме i должна удовлетворять условию

$$\nabla PK_i = \nabla ZH_i + H_{Si}, \qquad (21)$$

где H_{Si} — допустимая высота отсасывания в режиме i, определяемая в основном коэффициентом кавитации. С учетом зависимости $\nabla ZH(Q)$ и формулы для определения допустимой высоты отсасывания, а также универсальной характеристики гидротурбины строят зависимость $\nabla PK = f(Q)$ для различных напоров с учетом числа работающих агрегатов. В качестве отметки принимают полученную минимальную отметку

$$\nabla PK = \min(\nabla PK_i). \qquad (22)$$

Вес гидротурбин, выпускаемых серийно, определяется по данным завода-изготовителя. Для прогнозируемых гидротурбин вес вычисляется по эмпирическим зависимостям. Например, для поворотно-лопастных (ПЛ) гидротурбин

$$P_т = 2,88(D_1)^{2,1}\left(\max\left(H_т(\cdot)\right)\right)^{0,4} c_{10}; \qquad (23)$$

для радиально-осевых (РО) гидротурбин:

$$P_т = 17,4e^{0,46D_1}\left(\max\left(H_т(\cdot)\right)\right)^{0,16}, \qquad (24)$$

где c_{10} — константа (поправочный коэффициент), $H_т(\cdot)$ — напор на гидротурбине в различных режимах.

Удельный объем бетона определяется по уравнению вида [7]:

$$w_0 = \alpha_0 + \alpha_1 \bar{n}_S + \alpha_2 D_1 + \alpha_3 \bar{n}_S D_1 + \alpha_4 H +$$
$$+ \alpha_5 \bar{n}_S H + \alpha_6 D_1 H + \alpha_7 \bar{n}_S D_1 H + \alpha_8 H^2 +$$
$$+ \alpha_9 \bar{n}_S H^2 + \alpha_{10} D_1 H^2 + \alpha_{11} \bar{n}_S D_1 H^2, \qquad (25)$$

где n_S — коэффициент быстроходности гидротурбины, об/мин, который определяется по формуле

$$n_S = D_1 N_т^{0,5} H^{-1,25}. \qquad (26)$$

Например, для компоновки МГЭС ($R_з = 1$) имеем

$$\alpha_0 = 13,17;\ \alpha_1 = -6,754;\ \alpha_2 = -6,962;$$

$$\alpha_3 = 3,686;$$

$$\alpha_4 = -4,585;\ \alpha_5 = 2,4;\ \alpha_6 = 2,549;\ \alpha_7 = -1,386;$$

$$\alpha_8 = 0,4786;\ \alpha_9 = -0,2558;\ \alpha_{10} = -0,2815;$$

$$\alpha_{11} = 0,155.$$

Аналогичные модели построены для 20 типов МГЭС [5–8, 12].

На основе предложенных моделей энергопроцесса, оборудования и сооружений разработаны алгоритмы оптимизации параметров и режимов работы МГЭС. На рис. 3 и 4 показаны экранные формы результатов расчета оптимального режима работы МГЭС и ему соответствующий оптимальный график выдачи мощности.

Задачи дальнейших исследований:

1. Развитие формализованного подхода к обоснованию параметров МГЭС путем вклю-

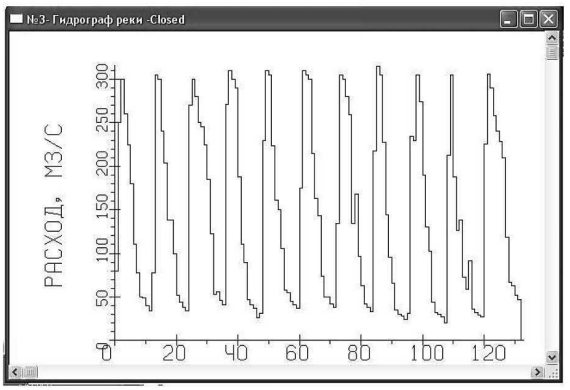


Рис. 3. Экранная форма программы оптимизации параметров малых ГЭС. График хронологических расходов

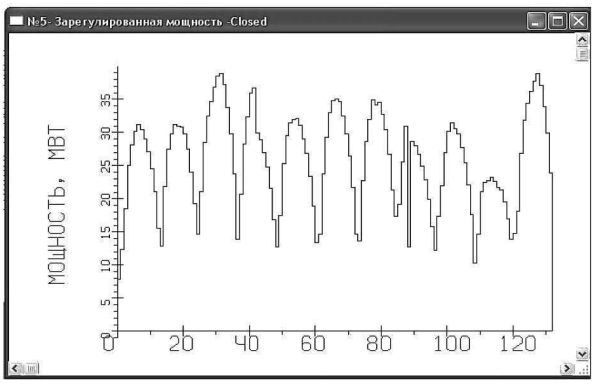


Рис. 4. Экранная форма программы оптимизации параметров малых ГЭС. Оптимальный режим выдачи мощности

чения новых инженерных решений, внедренных в практику проектирования МГЭС.

2. Развитие информационного, алгоритмического и программного обеспечения для водноэнергетических расчетов и оптимизации параметров МГЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ по государственным контрактам №02.740.11.0750 ФЦП «Кадры» и №16.516.11.6107 ФЦП «Исследования и разработки» и гранта Президента РФ НШ-4807.2012.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щавелев, Д.С.** Гидроэнергетические установки [Текст] / Д.С.Щавелев, Ю.С.Васильев, Г.А.Претро [и др.]; Под ред. Д.С.Щавелева. — 2-е изд. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 520 с.

2. Использование водной энергии [Текст] / Под ред. Ю.С.Васильева.— М.: Энергоатомиздат, 1995.— 608 с.

3. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России [Текст] / Под ред. П.П. Безруких. — СПб.: Наука, 2002.— 314 с.

4. Гидроэлектростанции малой мощности [Текст]: Учеб. пособ. / Под ред. В.В. Елистратова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.— 432 с.

5. **Сидоренко, Г.И.** Методика и оценка экономического гидроэнергетического потенциала на основе технологий САПР МГЭС [Текст] / Г.И. Сидоренко // Труды ИПМИ КарНЦ РАН.— 2005. Вып. 6.— С. 89–118.

6. Исследование и разработка математических моделей и методов внешнего проектирования гидроэнергетических объектов с учетом требований окружающей среды [Текст] // Отчет о НИР №01.97.0005361 / Науч. рук. Г.И. Сидоренко.— 162 с.

7. **Сидоренко, Г.И.** Основы и методы определения комплексного потенциала возобновляемых энергоресурсов региона и его использования [Текст]: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. / Г.И. Сидоренко.— СПб., 2006. — 33 с.

8. **Сидоренко, Г.И.** Методика обоснования параметров малых ГЭС с учетом социально-экологических ограничений [Текст] / Г.И. Сидоренко // Матер. 10-й международной науч. конф. «Сахаровские чтения 2010 года: экологические проблемы XXI века». Часть 2.— 20–21 мая 2010 года.— Минск, Республика Беларусь / Минск: Изд-во МГЭУ им. А.Д.Сахарова, 2010.— С.180–181.

9. **Сидоренко, Г.И.** Обоснование параметров малых гидроэлектростанций с учетом социально-экологических ограничений [Текст] / Г.И. Сидоренко, Е. А. Ельцова // Экология промышленного производства.— 2010. № 2. – С. 61–68.

10. **Сидоренко, Г.И.** Экономика установок нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Технико-экономический анализ [Текст]: Учебное пособие / Г.И. Сидоренко, И.Г. Кудряшева, В.И. Пименов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 247 с

11. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В.В.Елистратов, Е.М.Акентьева, М.М.Борисенко [и др.] / Под ред. В.В.Елистратова, Н.В.Кобышевой, Г.И.Сидоренко. — СПб.: Наука, 2010. — 235 с., ил.

12. **Карелин, В.Я.** Сооружения и оборудования малых гидроэлектростанций [Текст] / В.Я. Карелин, В.В. Волшаник.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 200 с.

УДК 621.3.032.434

В.В. Толмачев, И.А. Богов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ВИХРЕВОГО ЗАПАЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ГОРЕЛОЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК

Режимы пусков газотурбинных (ГТУ) и паротурбинных установок (ПТУ) — важнейшие динамические характеристики, определяющие маневренные свойства этих установок. При пуске энергетических турбоустановок широко используются факельно-искровые системы розжига камер сгорания (КС) или топок котлов, в которых применяются газовые запальные устройства (ЗУ) [1, 2]. Одно из основных требований, предъявляемых к этим системам розжига, — обеспечение высокой эксплуатационной надежности их элементов, в частности запально-горелочных устройств. Отказы запальных устройств приводят к отсрочке запуска турбоустановок и, следовательно, несвоевременному вводу их в электросеть, недовыработке электроэнергии, потере топлива, снижению ресурсных показателей [3, 5–8], а в ПТУ — к нарушению взрывопожаробезопасности котельных агрегатов.

В наибольшей мере этим требованиям удовлетворяют вихревые запально-горелочные устройства (ВЗГУ), разработанные на кафедре турбиностроения и средств автоматики ПИМаш в 80-е годы [3]. Однако при разработке и внедрении этих ВЗГУ не был применен комплексный подход в осуществлении их теоретических и экспериментальных исследований, отсутствовали достоверные экспериментальные данные об аэродинамической структуре потока, тепловых и рабочих характеристиках, пределах рабочего регулирования по расходу газа и др., что сдерживало разработку методики проектировочного расчета этих устройств.

Потенциальные возможности использования таких устройств далеко выходят за рамки указанной выше области. Так, например, ВЗГУ могут успешно применяться и при создании микрофакельных камер сгорания, пламеперебрасывающих патрубков, систем технологического нагрева при проведении монтажных и демонтажных работ энергетического оборудования и др. Поэтому целесообразно осуществить комплексную теоретическую и экспериментальную отработку ВЗГУ в качестве системного вихрево-

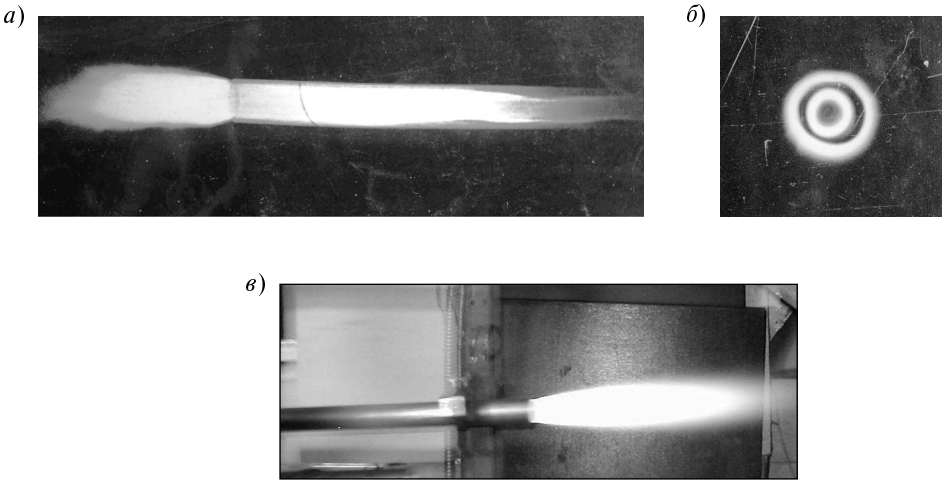


Рис. 1. Фронт пламени в модели ВЗГУ на рабочем режиме:

а — в кварцевой трубе и на выходе из нее в свободное пространство; *б* — вид с открытого торца кварцевой трубы; *в* — свободный запальный факел на выходе из трубы ВЗГУ

го запально-стабилизирующего горелочного модуля (ВЗСМ), включая определение ряда характеристик этого модуля — геометрических, аэродинамических, тепловых, рабочих и др.

В основу принципа работы ВЗГУ положен вихревой способ передачи пламени (ВСПП), заключающийся в распространении и стабилизации внутри трубы трубчатого фронта горения, способного перемещаться на весьма значительное расстояние (примерно на 0,2–3,0 м) и на срезе этой трубы обеспечивать существование устойчивого открытого факела [3]. На рис. 1 можно видеть фронт пламени в модели ВЗГУ на рабочем режиме. Применение кварцевой трубы в экспериментальных исследованиях позволило осуществить визуализацию процесса передачи пламени. Исследования структуры и аэродинамических характеристик закрученного потока проводились на препарированных физических моделях ВЗСМ, конструктивные схемы которых представлены на рис. 2, *а* (без сужения вихревой камеры *7*) и на рис. 2, *б* (с сужением в конфузоре *9*). Данные модели продувались воздухом, подаваемым в тангенциальный канал *5*. Конструкции закручивающих устройств в моделях ВЗСМ отличаются от типовых расположением тангенциального канала 5 для подвода воздуха (горючей смеси) на расстоянии $L_{m\text{к}} / D_{\text{к}} = 0{,}75-1{,}5$ от герметичной торцевой стенки *3* вихревой камеры *7* (см. рис. 2).

В качестве критерия, связывающего основные геометрические характеристики закручивающего устройства, принимается конструктивный параметр в следующем виде [4]:

$$\Phi^{*}_{\text{вх к}} = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{с}}}\frac{L_{\text{вх}}}{R_{\text{к}}}\sin\beta_{\text{к}}, \qquad (1)$$

где $F_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения камеры закручивающего устройства; $F_{\text{с}}$ — площадь наименьшего поперечного сечения тангенци-

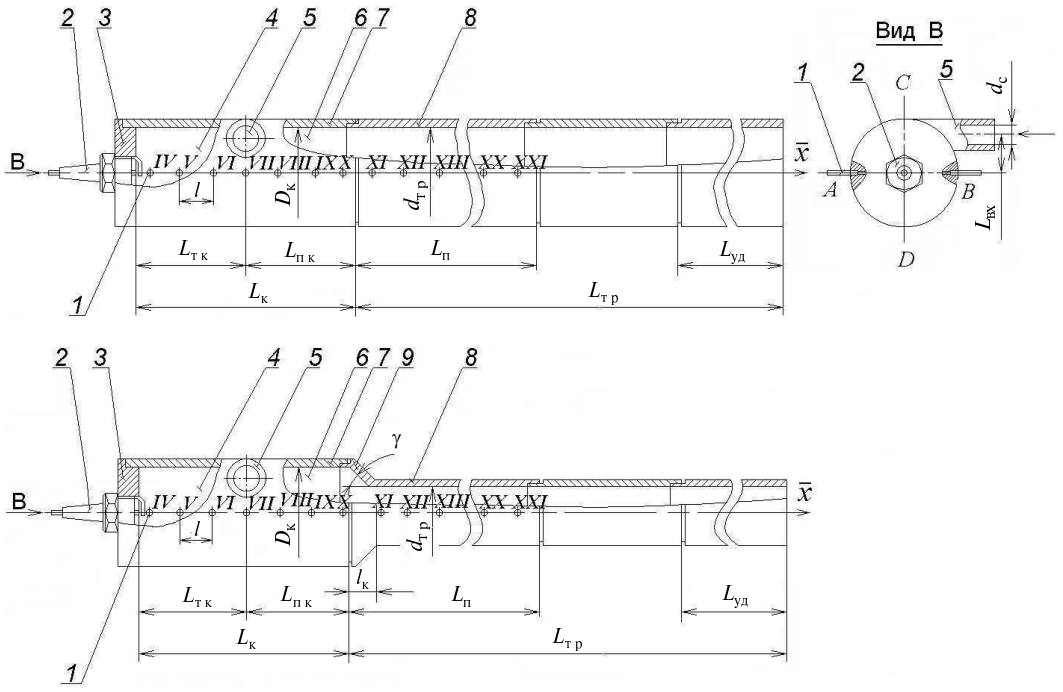


Рис. 2. Конструктивные схемы физических моделей вихревого запально-стабилизирующего модуля: *а* — без конфузора в выходном сечении камеры закручивающего устройства ($\bar{F}_{\text{кон}} = F_{\text{тр}}/F_{\text{к}}=1$); *б* — с конфузором в выходном сечении камеры закручивающего устройства ($\bar{F}_{\text{кон}}<1$):

1 — направляющие трубки для радиального ввода датчиков: зонда угломера, зонда статического и полного давления; *2* — свеча зажигания; *3* — торцевая стенка камеры закручивающего устройства; *4* — полузамкнутая часть камеры закручивающего устройства; *5* — тангенциальный канал для подвода воздуха (горючей газовоздушной смеси); *6* — проточная часть камеры закручивающего устройства; *7* — камера закручивающего устройства; *8* — вихревая труба; *9* — прямой конфузор в выходном сечении камеры закручивающего устройства

ального канала; $L_{вх}$ — плечо закрутки; $R_к$ — радиус камеры закручивающего устройства; $\beta_к$ — конструктивный угол закрутки, принятый равным 90°.

В качестве варьируемых параметров испытываемых моделей принимались следующие безразмерные комплексы, входящие в выражение (1): $F_к/F_с$ — отношение площади сечения камеры закручивающего устройства к площади наименьшего сечения тангенциального канала; $L_{вх}/R_к$ — отношение плеча закрутки потока к внутреннему радиусу камеры закручивающего устройства. В зависимости от задачи исследований в качестве варьируемых параметров моделей принимаются относительные величины: длины трубы $L_{тр}/d_{тр}$, шероховатости ее внутренней стенки $\bar{\Delta} = 2\Delta/d_{тр}$ и площади местного конфузорного сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства $\bar{F}_{кон} = F_{тр}/F_к$.

При анализе газодинамических характеристик закрученных потоков в вихревых системах широко используется критерий подобия — интегральный параметр закрутки потока, который характеризует интенсивность его закрутки, особенности локальной структуры и интегральные свойства [4]:

$$\Phi^* = \frac{M}{K_x R}, \qquad (2)$$

где $M = 2\pi\int_0^R \rho u w r^2 dr$ — осевая составляющая момента количества движения потока (МКД);

$K_x = 2\pi\int_0^R \rho u^2 r dr$ — осевая составляющая количества движения потока (КД); R — радиус вихревой камеры; r — текущий радиус канала; ρ — плотность газообразной среды; u и w — соответственно осевая и вращательная составляющие абсолютного вектора скорости потока.

Для определения зависимости интегрального параметра $\Phi^*_{вх}$ закрутки потока на входе в вихревую трубу от конструктивного параметра $\Phi^*_{вх к}$ закручивающего устройства разработаны физические модели ВЗСМ, относительные геометрические параметры которых представлены в табл.1.

Таблица 1

Относительные безразмерные комплексы моделей ВЗСМ без местного конфузорного сужения камеры закручивающего устройства

Модели	$F_к / F_с$	$L_{вх} / R_к$	$L_{тр}/d_{тр}$	$\Phi^*_{вх к}$	$\bar{F}_{кон}$
1	6,8	0,62	18,3	4,2	1
2	11,4	0,70	14,2	8,0	
3	16,2	0,75	11,9	12,2	
4	18,4	0,77	11,1	14,2	

Для исследования влияния относительной величины конфузорного сужения $\bar{F}_{кон}$ (угла сужения конфузора 2γ) выходного поперечного сечения камеры закручивающего устройства на кинематику потока, аэродинамические характеристики и работоспособность модуля в условиях с горением разработаны геометрически подобные модели ВЗСМ (см. рис. 2, *б*), отличающиеся от моделей, представленных на рис. 2, *а*, величинами $\bar{F}_{кон}$. Основные безразмерные комплексы моделей ВЗСМ с конфузорным сужением камеры закручивающего устройства ($\bar{F}_{кон} < 1$) приведены в табл. 2.

На моделях ВЗСМ исследовались влияния интегрального параметра $\Phi^*_{вх}$ закрутки потока на входе в вихревую трубу и величины $\bar{F}_{кон}$ относительного местного конфузорного сужения на величину относительного диаметр приосевого возвратного тока — $\bar{d}_{от} = d_{от}/d_{тр}$.

Модель № 3 с геометрическими параметрами, приведенными в табл. 2, используется при расчетно-теоретических исследованиях параметров закрученного потока методом численного моделирования в газодинамическом программном комплексе Fluent. Трудности измерения динамических параметров потока в приосевой области моделей ВЗСМ, обусловленных уменьшением относительного сужения камеры закручивающего устройства $\bar{F}_{кон}$, интегрального параметра $\Phi^*_{вх}$ закрутки потока на входе в трубу и влиянием частоты прецессии вихревого ядра (ПВЯ), потребовали проведения численного эксперимента и более детального моделирования течения в приосевой области с помощью упомянутого про-

Таблица 2

Основные безразмерные комплексы моделей ВЗСМ с местным конфузорным сужением камеры закручивающего устройства

Модели	$F_к / F_с$	$L_{вх} / R_к$	$L_{тр}/d_{тр}$	$\Phi^*_{вхк}$	$\bar{F}_{кон}$, (2γ)		
1	6,8	0,62	18,3	4,2	0,563 (34°)	0,44 (45°)	0,25 (63°)
2	11,4	0,70	14,2	8,0			
3	16,2	0,75	11,9	12,2			
4	18,4	0,77	11,1	14,2			

граммного комплекса. Стало очевидным, что достоверность экспериментальных данных в периферийной области ВЗСМ — высокая, а в приосевой — низкая. Тем не менее, количественные экспериментальные данные сравнивались с данными численного моделирования течения в ВЗСМ.

Наиболее важные задачи исследований: определение совместного количественного влияния параметров $\Phi^*_{вх}$, $L_{тр}/d_{тр}$ и $\bar{\Delta} = 2\Delta/d_{тр}$ на интенсивность снижения закрутки потока воздуха $\bar{\Phi}^*_i = \Phi^*_i / \Phi^*_{вх}$ вдоль оси трубы моделей ВЗСМ, а также стендовая отработка устойчивого, без значительных пульсаций ВСПП на этих моделях. Для решения данных задач разработаны специальные модели ВЗСМ, геометрические комплексы и параметры которых характеризует табл. 3.

Для экспериментального определения предела реализации ВСПП, минимального значения $\Phi^*_{вых\,min}$ интенсивности закрутки свободного факела на выходе из вихревой трубы, при котором обеспечивается устойчивое его развитие, а также рабочей длины трубы для данных условий в ее конструкции предусмотрена возможность изменения длины (см. рис. 2, поз. *8*) за счет соединяющихся по проточке цилиндрических колец.

В результате проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований впервые получены тепловые и рабочие характеристики ВЗСМ. По результатам измерений угла подъема потока по спирали $\beta_п$, полного и статического давлений на моделях получены градиенты основных составляющих скорости — осевой и вращательной, которые приведены на рис. 3. Анализ градиентов осевой скорости в поперечных сечениях моделей показывает, что в приосевой области по обе стороны от тангенциального входа (см. рис. 2, сечение для ввода датчиков измерения VII) расположены зоны обратных токов.

Как уже было отмечено, в осевой области с малыми скоростями потока вследствие снижения чувствительности миниатюрных пневмо-

Таблица 3

Относительные геометрические комплексы и параметры специальных моделей ВЗСМ для воздушных продувок и отработки ВСПП

Модели	$F_к / F_с$	$L_{вх} / R_к$	$L_{тр}/d_{тр}$	$\Phi^*_{вхк}$	$2\Delta/d_{тр}$	Форма входа*	$\bar{F}_{кон}$
1	15,21	0,872	70	13,26	0,0012	Э	0,59
2	16,17	0,751	50	12,15	0,0029	Ц	0,44
3	11,11	0,85	70	9,44	0,0014	Э	0,69
4	10,09	0,843	60	8,5	0,0016	Э	0,54
5	10,79	0,696	40	7,51	0,0044	Ц	1,0
6	9,766	0,68	70	6,64	0,002	Ц	1,0
7	8,196	0,65	60	5,53	0,0025	Ц	0,81

* Форма поперечного сечения тангенциального входа — Ц (цилиндрическая) либо Э (эллиптическая).

метрических зондов дополнительно проводились расчетно-теоретические исследования структуры закрученного потока с помощью газодинамического программного комплекса Fluent на основе усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (численно моделировался несжимаемый, вязкий и турбулентный поток воздуха). При проведении численного эксперимента в программном комплексе граничные условия задавались максимально приближенными к условиям проведения физических экспериментов на моделях ВЗСМ.

Вопрос об адекватности моделирования решался сопоставлением экспериментальных данных с результатами тестовых расчетов (рис. 3), полученных на моделях ВЗСМ (см. табл. 2). Проведенные вычисления подтвердили общую структуру закрученного потока с приосевыми возвратными токами и уровень скорости в приосевой области. Наиболее высокая сходимость имеет место в пристеночной области, где разница экспериментальных и расчетных величин не превышает 6 %; значительно хуже в осевой области 10–12 %.

По экспериментальным данным путем усреднения значений скорости и угла подъема потока получена представленная на рис. 4, графическая зависимость интегрального параметра $\Phi^*_{вх}$ закрутки на входе в вихревую трубу (при $\bar{x}=3$) от конструктивного параметра $\Phi^*_{вхк}$ закручивающего устройства с тангенциальным входом, расположенным на середине длины камеры этого устройства.

На графике пунктирной линией нанесена аналогичная зависимость для типовой конструкции закручивающего устройства, в которой тангенциальный канал расположен в непосредственной близости к торцевой стенке камеры. Сравнение этих зависимостей показывает, что при одном и том же значении конструктивного параметра $\Phi^*_{вхк}$ закручивающего устройства величина интегрального параметра закрутки в модельном закручивающем устройстве в среднем на 25 % меньше, чем в геометрически подобном типовом. Следовательно, известные из литературных источников эмпирические зависимости не могут использоваться для построения математической модели ВЗСМ и разработки соответствующей методики их проектировочного расчета.

Для модельного закручивающего устройства ВЗСМ в результате аппроксимации полученных экспериментальных данных определена эмпирическая зависимость интегрального параметра закрутки от конструктивного параметра в виде

$$\Phi^*_{вх} = 0{,}63\ \Phi^{*\,0{,}72}_{вхк}. \qquad (3)$$

Методика проектировочного расчета ВЗСМ, включающего расчет интенсивности закрутки потока на входе в вихревую трубу, базируется на уравнении (3). Результаты экспериментальных исследований на физических моделях ВЗСМ положены в основу разработанной математической модели, определяющей уменьшение интегрального параметра закрутки потока вдоль оси шероховатых вихревых труб под действием сил вязкого трения:

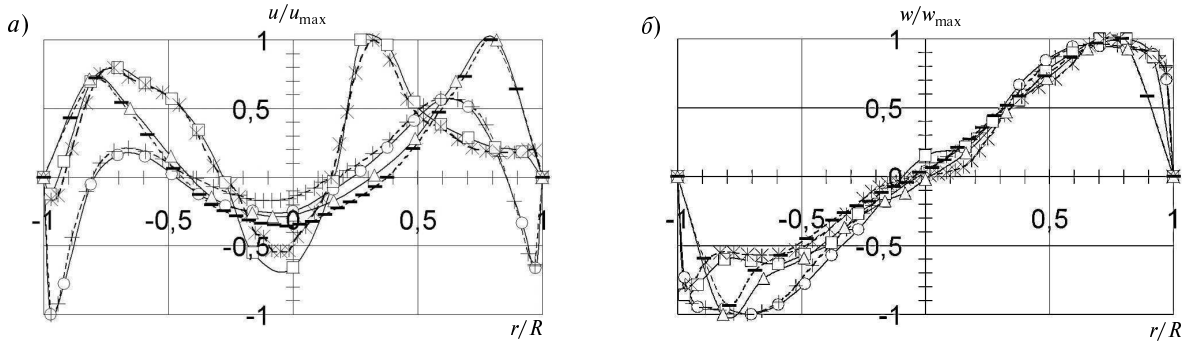


Рис. 3. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений составляющих скоростей (*а* — осевая скорость *u*; *б* — вращательная скорость *w*):

—○—○— — эксперимент ($\bar{x}$ = 0,4; сечение № 5); - + - + - — расчет;
—□—□— — эксперимент ($\bar{x}$ = 2,3; сечение № 7); - ✳ - ✳ - — расчет;
—△—△— — эксперимент ($\bar{x}$ = 6,0; сечение № 13); - ▬ - ▬ - — расчет

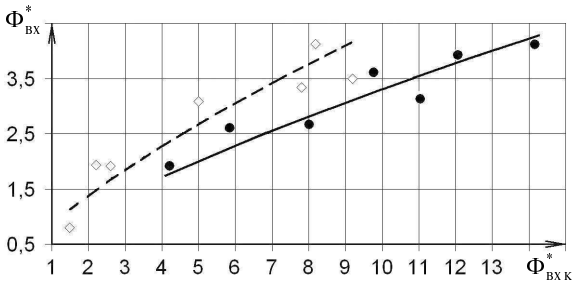


Рис. 4. Зависимость интегрального параметра $\Phi^*_{вх}$ закрутки на входе в трубу моделей ВЗСМ от конструктивного параметра $\Phi^*_{вх\,к}$ закручивающего устройства:

● — по экспериментальным данным для закручивающего устройства моделей ВЗСМ с одним тангенциальным каналом, расположенным посередине вихревой камеры при $L_{тк}/D_к = 1{,}5$; ◇ — по данным публикаций для типовых тангенциальных закручивающих устройств с различным числом каналов расположенных вплотную к торцу вихревой камеры; —●—● — аппроксимация экспериментальных данных функцией: $\Phi^*_{вх} = 0{,}63\ \Phi^{*\,0{,}72}_{вх\,к}$; – – – – — по данным работы [4]: $\Phi^*_{вх} = 0{,}84\ \Phi^{*\,0{,}72}_{вх\,к}$

$$\Phi^*_i = \frac{\Phi^*_{вх}}{-k_0^2 \dfrac{\bar{M}_{вх}}{\bar{K}_{вх}} \bar{L}_i^2 - k_0 \left(\bar{K}_{вх}^{-1} - \bar{M}_{вх} \right) \bar{L}_i + 1}, \quad (4)$$

где $\Phi^*_{вх}$ — начальная интенсивность закрутки потока; $\bar{M}_{вх}$ — усредненный относительный момент количества движения (МКД) на входе в вихревую трубу; $\bar{K}_{вх}$ — усредненное относительное количество движения (КД) на входе в вихревую трубу; $\bar{L}_i$ — текущая относительная длина трубы; $k_0 = 2\Delta/d_{тр}$ — коэффициент пропорциональности, равный относительной гидравлической шероховатости внутренней стенки трубы.

Адекватность математической модели (4) с удовлетворительной степенью достоверности подтверждается результатами экспериментальных исследований снижения под действием сил вязкого трения интегрального параметра Φ^*_i закрутки вдоль оси трубы, характеристика которой представлена на рис. 5, *а*, а также характеристикой интенсивности снижения начальной закрутки потока $\Phi^*_i/\Phi^*_{вх}$ вдоль оси трубы, представленной на рис. 5, *б*. Анализ интенсивности снижения начальной закрутки потока вдоль вихревой трубы (рис. 5, *б*) показывает, что затухание этой закрутки потока происходит тем интенсивнее, чем больше относительная шероховатость $2\Delta/d_{тр}$ и интегральный параметр закрутки $\Phi^*_{вх}$ потока на входе в трубу.

Решая задачу посредством математического моделирования (4) и экспериментального исследования на физических моделях ВЗСМ, позволяющих варьировать геометрические параметры, принятые в соответствии с табл. 3 (с горением при $\alpha = 1$), последовательным снятием колец наборной вихревой трубы с заданной шероховатостью были определены максимальные значения рабочих длин этих вихревых труб, обеспечивающие устойчивое развитие факела. Экспериментально определено минимальное значение интенсивности закрутки потока на выходе из трубы — $\Phi^*_{вых\,min} = 1{,}3$. При меньших значениях этой величины в ВЗСМ устойчивость факела существенно ухудшается при любых рабочих параметрах. Под действием сил трения происходит затухание закрутки и вырождение в осевой области возвратного тока. Это приводит к снижению устойчивости горения и необходимости ограничения длины вихревой трубы ВЗСМ, предельное значение которой для данных условий определяется уравнением (4), преобразованным к следующему виду:

$$-k_0^2 \frac{\bar{M}_{вх}}{\bar{K}_{вх}} \bar{L}^2_{тр\,max} + k_0 \left(\bar{M}_{вх} - \bar{K}_{вх}^{-1} \right) \bar{L}_{тр\,max} + 1 - \frac{\Phi^*_{вх}}{\Phi^*_{вых\,min}} = 0. \quad (5)$$

При определении рабочих режимов горения в моделях ВЗСМ установлено, что местное конфузорное сужение выходного сечения камеры закручивающего устройства оказывает в определенных пределах положительное влияние на устойчивость горения.

На рис. 6 показано влияние величины конфузорного сужения камеры закручивающего устройства на градиенты основных составляющих скорости потока воздуха. Анализ этих характеристик показывает, что несимметричность потока относительно оси, вызванная одним тангенциальным входом, за конфузором практически исчезает. Максимумы осевой и окружной составляющих скорости перед конфузором находятся соответственно на среднем радиусе и в периферийной области, а при выходе из него

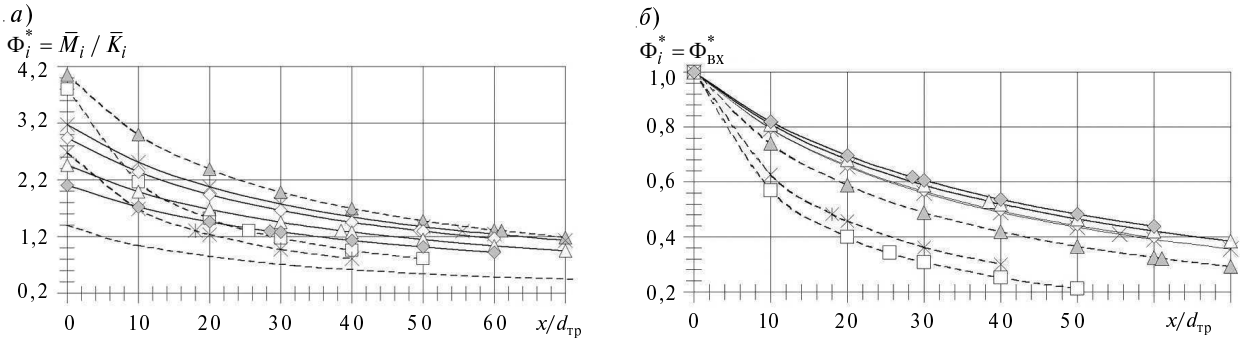


Рис. 5. Изменение параметров закрутки потока воздуха вдоль вихревой трубы (ВЗСМ)

($а$ — интегральный параметр закрутки потока Φ_i^*; $б$ — интенсивности затухания начальной закрутки потока $\Phi_i^* / \Phi_{вх}^*$):

— $\Phi_{вх}^* = 4{,}1$, $\bar{F}_{кон} = 0{,}59$, $\bar{\Delta} = 0{,}0012$, $N_{ВЗСМ} = 70$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 70$;

— $\Phi_{вх}^* = 3{,}8$, $\bar{F}_{кон} = 0{,}44$, $\bar{\Delta} = 0{,}0029$, $N_{ВЗСМ} = 10$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 50$;

— $\Phi_{вх}^* = 3{,}2$, $\bar{F}_{кон} = 0{,}69$, $\bar{\Delta} = 0{,}0014$, $N_{ВЗСМ} = 50$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 70$;

— $\Phi_{вх}^* = 2{,}9$, $\bar{F}_{кон} = 0{,}54$, $\bar{\Delta} = 0{,}0016$, $N_{ВЗСМ} = 100$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 60$;

— $\Phi_{вх}^* = 2{,}7$, $\bar{F}_{кон} = 1{,}00$, $\bar{\Delta} = 0{,}0044$, $N_{ВЗСМ} = 30$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 40$;

— $\Phi_{вх}^* = 2{,}5$, $\bar{F}_{кон} = 1{,}00$, $\bar{\Delta} = 0{,}0020$, $N_{ВЗСМ} = 40$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 70$;

— $\Phi_{вх}^* = 2{,}1$, $\bar{F}_{кон} = 0{,}81$, $\bar{\Delta} = 0{,}0025$, $N_{ВЗСМ} = 25$кВт, $L_{ТР}/d_{тр} = 60$;

— по данным работы [4] ($\Phi_{вх\,к}^* = 2{,}034$, $\Phi_{вх}^* = 1{,}4$, $\bar{F}_{кон} = 1$

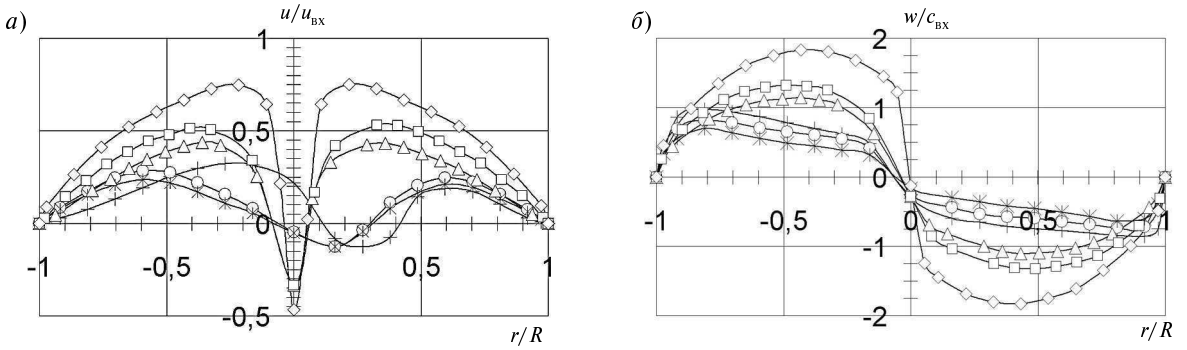


Рис. 6. Влияние величины относительного конфузорного сужения выходного сечения камеры $\bar{F}_{кон}$ закручивающего устройства моделей ВЗСМ на поле скоростей потока:

($а$ — осевой, $б$ — окружной): — $\bar{x} = 1{,}5$, сечение *VII* камеры закручивающего устройства, проходящее через ось тангенциального канала; — $\bar{x} = 2{,}3$, сечение *IX* на входе в конфузор; — $\bar{x} = 3{,}1$, сечение *XI* без конфузора ($\bar{F}_{кон} = 1$); — $\bar{x} = 3{,}1$, сечение *XI* на выходе из конфузора при $\bar{F}_{кон} = 0{,}563$; — $\bar{x} = 3{,}1$, сечение *XI* на выходе из конфузора при $\bar{F}_{кон} = 0{,}439$; — $\bar{x} = 3{,}1$, сечение *XI* на выходе из конфузора при $\bar{F}_{кон} = 0{,}25$

смещаются под действием центростремительных сил в приосевую область при всех значениях $\bar{F}_{\text{кон}}<1$. Диаметр возвратного приосевого тока в моделях с сужением $\bar{F}_{\text{кон}}<1$ уменьшается, и чем меньше величина сужения $\bar{F}_{\text{кон}}$, тем значительней уменьшается данный диаметр. Обобщением экспериментальных данных, приведенных на рис. 6, получено эмпирическое выражение относительного диаметра приосевого возвратного тока в зависимости от интегрального параметра $\Phi^{*}_{\text{вх}}$ закрутки потока на входе в трубу и сужения выходного сечения камеры закручивающего устройства ($\bar{F}_{\text{кон}} \le 1$) в следующем виде:

$$\bar{d}_{\text{от}} = 0,2\left(\Phi^{*}_{\text{вх}}\bar{F}_{\text{кон}} - 0,6\right)^{0,72}. \qquad (6)$$

Полученная эмпирическая зависимость используется в методике расчета ВЗСМ для ограничения минимального параметра закрутки на входе в трубу и величины местного сужения камеры закручивающего устройства, а также при расчете длины факела в вихревой трубе.

По результатам проведенных исследований на моделях в условиях с горением установлено, что при значениях конфузорного сужения меньше $\bar{F}_{\text{кон}}< 0,44$ режимы горения неустойчивы и характеризуются низкочастотными пульсациями факела при любых рабочих параметрах. Выявлено, что относительная величина сужения $\bar{F}_{\text{кон}} \ge 0,44$ в моделях ВЗСМ оказывает положительное влияние на режимы горения, обеспечивая высокую устойчивость факела с выходом его без задержек и срывов. Ввод конфузорного сужения камеры закручивающего устройства позволяет не только увеличить длину факела в трубе в соответствии с теоретическим обоснованием ВСПП, но и уменьшить разность температур на входе и выходе вихревой трубы ВЗСМ, тем самым уменьшая вероятность возникновения пульсационной неустойчивости горения, обусловленной термическим механизмом. Основные тепловые характеристики моделей ВЗСМ определялись по результатам экспериментальных исследований измерением массового расхода воздуха и газа на основных режимах горения, длины запального факела и температуры вдоль его радиуса и оси.

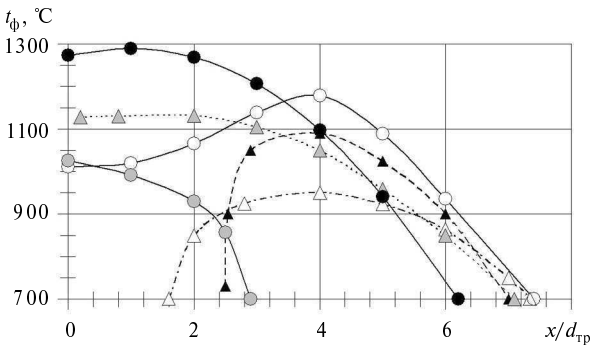


Рис. 7. Изменение среднего значения температуры факела вдоль его оси:
ВЗСМ — α = 0,7; — α = 1,0; — α = 1,5; ЗЗУ — α = 0,7; — α = 1,0; — α = 1,5

На рис. 7 представлена характеристика изменения температуры вдоль оси факела ВЗСМ и запально-защитного устройства (ЗЗУ) в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Температурная характеристика ВЗСМ превышает характеристику ЗЗУ. Наибольшие средние значения температуры в факеле ВЗСМ — 1200–1300 °С — соответствуют режимам горения при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0,7–1,05$. Этот диапазон принят в методике расчета ВЗСМ в качестве рабочего.

Влияние коэффициента избытка воздуха и интенсивности закрутки потока на длину свободного факела ВЗСМ представлено на рис. 8.

Для модельных конструкций ВЗСМ в результате аппроксимации полученных экспериментальных данных определена эмпирическая зависимость длины факела ВЗСМ от интенсивности закрутки потока на выходе из трубы и коэффициента избытка воздуха

$$\bar{L}_{\text{фсв}} = \frac{5,2\Phi^{*-0,78}_{\text{вых}}}{0,1367e^{1,99\alpha}}. \qquad (7)$$

Длина запального факела моделей, которая составляет $\bar{L}_{\text{ф}} = 4–7$, имеет место при обогащенном составе смеси и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,7–1,05$. Обеднение смеси ($\alpha \ge 2$) существенно сокращает длину факела в моделях ВЗСМ.

На рис. 9 приведена характеристика устойчивости факела для моделей ВЗСМ, которые различаются тепловой мощностью (2–120 кВт).

Анализ данной характеристики показывает, что при запуске ВЗСМ имеет место устойчивое горение с отсутствием проскока пламени внутрь трубы и его погасания во всем диапазоне изме-

нения расхода газа. До границы *I* расположена зона (см. рис. 9), в которой факел ВЗСМ занимает положение в полости вихревой трубы. Между границами *I* и *II* расположена зона горения свободного факела ВЗСМ, устойчивого не только в отношении отрыва или проскока пламени, но и к внешним высокоскоростным потокам, натекающим на запальный факел вихревого модуля под любым углом от 0 до 90° вследствие расположения стабилизационной хвостовой части факела в полости вихревой трубы. За пределами границы *II* расположена зона, в которой наблюдается режим горения с частичным отрывом факела ВЗСМ.

В соответствии с тепловой теорией зажигания, чем выше температура запального факела, тем меньше период задержки воспламенения и выше при прочих равных условиях вероятность инициирования запальным факелом реакции горения в зажигаемой смеси. Поэтому для практического использования высокотемпературный факел ВЗСМ наиболее эффективен (в сравнении с факелом ЗЗУ). Из анализа результатов экспериментальных исследований ВЗСМ следует, что его диапазон регулирования несколько уже, чем у ЗЗУ, и составляет 1:5. Однако эксплуатационная надежность ВЗСМ намного выше, чем ЗЗУ.

Одновременно использование предварительной закрутки смеси в ВЗСМ позволяет расширить рабочую характеристику факела и его устойчивость (в сравнении с типовыми прямоточными конструкциями запальных устройств) и повысить ресурс, исключив конструктивные элементы стабилизации в виде плохообтекаемых тел и защитных насадок.

Полученные впервые значения рабочей длины запального факела ВЗСМ и его характеристика устойчивости с диапазоном рабочего регулирования позволяют определять диапазоны оптимальных режимов горения и учитывать их при компоновке ВЗСМ с горелочными устройствами разного назначения.

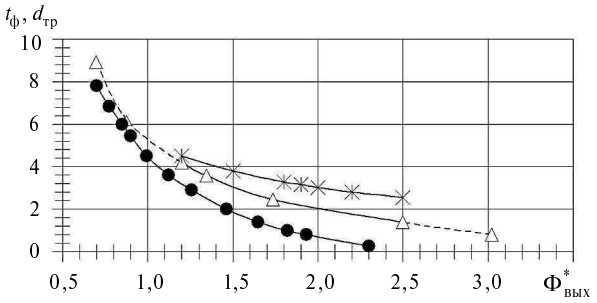


Рис. 8. Изменение длины запального факела при увеличении расхода природного газа и постоянном расходе воздуха:

— ЗЗУ; — модель ВЗСМ ($Ф^*_{вых}$ = 1,3); — модель ВЗСМ при постоянном $\alpha = 1$ и изменении интегрального параметра закрутки на выходе из трубы $Ф^*_{вых}$

Основные результаты выполненных исследований:

1. Создан лабораторный стенд для экспериментального исследования ВЗСМ на физических моделях. Разработанные физические модели ВЗСМ позволяют осуществлять широкий спектр их экспериментальных исследований с варьированием геометрических параметров в достаточно широком диапазоне.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден вихревой способ передачи пламени в трубах, позволяющий повысить тепловые и рабочие характеристики запальных и дежурных горелочных устройств КС и топок котлов турбоустановок. Впервые получена характеристика устойчивости факела ВЗСМ и определен диапазон его рабочего регулирования по расходу газа.

3. Получено аналитическое выражение зависимости интенсивности закрутки потока от конструктивного параметра закручивающего уст-

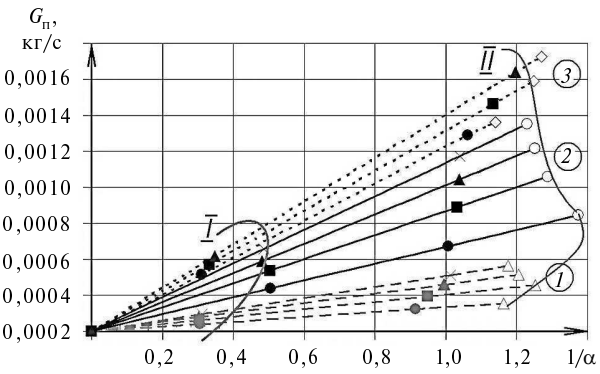


Рис. 9. Характеристика устойчивости факела в моделях ВЗСМ:

1 — модели с тепловой мощностью до 20 кВт; *2* — модели с тепловой мощностью от 20 до 60 кВт; *3* — модели с тепловой мощностью свыше 60 кВт; *I* — выход запального факела из трубы ВЗСМ в окружающую среду; *II* — частичный отрыв факела от устья трубы ВЗСМ

ройства и разработана математическая модель изменения интенсивности закрутки потока вдоль трубы с учетом ее длины, шероховатости внутренней стенки и начальной интенсивности закрутки.

4. Определены тепловые характеристики ВЗСМ на основных режимах горения, а также получена аналитическая зависимость изменения длины факела от коэффициента избытка воздуха α и интенсивности закрутки потока на выходе из трубы $\Phi^{*}_{вых}$.

5. Полученные результаты численно-экспериментальных исследований могут использоваться для разработки проектировочного расчета ВЗСМ для КС и топок котлов турбоустановок. Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности ВЗСМ необходим выбор следующих оптимальных параметров: начальной интенсивности закрутки потока с учетом шероховатости внутренней стенки вихревой трубы; коэффициента избытка воздуха; величины относительного конфузоного сужения; давлений воздуха и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сторожук, Я.П.** Камеры сгорания стационарных газотурбинных и парогазовых установок [Текст] / Я.П. Сторожук.— Л.: Машиностроение, 1978.— 230 с.

2. **Винтовкин, А.А.** Горелочные устройства промышленных печей и топок. Конструкции и технические характеристики [Текст] / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, Т.В. Калинова.— М.: Инжиниринг, 1999.— 553 с.

3. **Щенников, К.А.** Новые запальные системы вихревого типа для газотурбинных установок и других энергетических объектов [Текст] / К.А. Щенников, В.Г. Тырышкин, И.С. Бодров // Теплоэнергетика.— 1986. № 5.— С. 55–56.

4. **Щукин, В.К.** Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах [Текст] / В.К. Щукин, А.А. Халатов.— М.: Машиностроение, 1982.— 290 с.

5. **Толмачев, В.В.** Вихревой способ передачи и стабилизации фронта пламени для совершенствования электроискровых газовых запальных устройств энергетических установок [Текст] / В.В. Толмачев // Аэрокосмическая техника и высокие технологии— 2002: Матер. Всеросс. научно-техн. конф. / Под ред. Ю.В. Соколкина и А.А. Чекалкина.— Пермь: ПГТУ, 2002.— 263 с.

6. **Арсеньев, Л.В.** Стационарные газотурбинные установки [Текст] / Л.В. Арсеньев, В.Г. Тырышкин, И.А. Богов [и др.].— Л.: Машиностроение, 1989.— 543 с.

7. **Маев, В.А.** Запальные устройства камер сгорания НЗЛ [Текст] / В.А. Маев, А.В. Сударев, В.М. Веселовский // Энергомашиностроение.— 1970. № 12.— С. 34–35.

8. **Ольховский, Г.Г.** Опыт проектирования, наладки и промышленного освоения газотурбинных установок типа ГТ-100 [Текст] / Г.Г. Ольховский, И.С. Бодров, В.Я. Резниченко, Ю.Г. Корсов.— М.: Энергомашиностроение, 1978.— 52 с.

УДК 69.058.7

И.Д. Аникина, Г.П. Поршнев, В.В. Сергеев

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

Согласно статье 15, п. 2 ФЗ № 261 «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» основными целями энергетического обследования являются [1]:

получение объективных данных об объеме используемых энергетических ресурсов;

определение показателей энергетической эффективности;

определение потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

разработка перечня типовых общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и проведение их стоимостной оценки.

Дополнительно по соглашению между лицом, заказавшим проведение энергетического обследования, и лицом, его проводящим, может предусматриваться разработка по результатам энергетического обследования отчета, содержащего перечень мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, отличных от типовых общедоступных мероприятий в этом направлении.

Для достижения этих целей решается ряд задач, в число которых входят:

независимая оценка фактического состояния энергопользования предприятия;

определение показателей энергетической эффективности;

выявление причин возникновения потерь топливно-энергетических ресурсов;

оценка доли затрат и возможности снижения издержек предприятия по каждому из направлений энергопользования;

определение приоритетных направлений энергосбережения;

оценка потенциала энергосбережения по выбранным направлениям;

экспертиза энергетической эффективности проводимых или планируемых на предприятии инноваций;

разработка эффективных мероприятий для реализации выявленного потенциала энергосбережения;

разработка предложений по организации системы энергоменеджмента на предприятии;

составление программы энергосбережения;

разработка энергетического паспорта;

Значительное внимание при проведении энергетического аудита уделяется тепловизионному обследованию, которое позволяет обнаружить как строительные дефекты, так и возможные ошибки в проекте [2]. Оно заключается в тепловизионной съемке фасада здания, результатом которой является фотография этого фасада в инфракрасном изображении, где по оттенкам цвета можно установить поле температур на поверхности стены и по этому судить об относительно большей или меньшей величине теплового потока через выбранный участок площади [3].

Возможные цели тепловизионного обследования зданий:

выявление скрытых дефектов теплоизоляции ограждающих конструкций методами тепловизионного контроля;

определение теплопотерь здания и проверка соответствия теплоизоляции нормативам;

составление энергетического паспорта здания по данным отчета тепловизионного обследования;

использование результатов тепловизионного обследования в судебном процессе.

Тепловизионное обследование зданий позволяет определить:

скрытые дефекты теплоизоляции или конструктивные недоработки (некачественный монтаж оконных блоков, дефекты теплоизоляции стыков между панелями, мостики холода);

реальные теплопотери и сравнение их с нормативными;

места возможного запотевания стен;

недоработки в разводке отопительной системы, засоренность батарей;

места протеканий в кровле;

места прокладки труб или электрических нагревателей в обогреваемых полах.

Факторами риска в городских многоэтажных домах чаще всего являются закладные элементы в стеновых панелях, недостаточная теплозащита и промерзание углов, недостаточное утепление стен, перекрытий, покрытий цокольных этажей, нарушения швов и стыков между сборными конструкциями, нарушение технологии утепления (особенно мансард), использование несоответствующих проекту материалов или отступление от проекта.

Метод тепловизионного обследования основан на дистанционном измерении тепловизором полей температур поверхностей ограждающих конструкций, между внутренними и наружными поверхностями которых создан перепад температур, и вычислении относительных сопротивлений теплопередаче участков конструкции, значения которых, наряду с температурой внутренней поверхности, принимают за показатели качества их теплозащитных свойств [4].

Какой метод использовать при расчете теплового потока через наружные ограждения зданий по данным, полученным с помощью тепловизионного обследования?

При расчете теплоотдачи через наружную поверхность здания используется закон Ньютона — Рихмана:

$$Q = \alpha_{эф}\left(t_{ст} - t_{нар}\right)F, \qquad (1)$$

где Q — тепловой поток через наружную поверхность здания, Вт; $t_{ст}$ — температура наружной

стенки здания, °С; $t_{нар}$ — температура наружного воздуха, °С; F — площадь рассматриваемой поверхности, мI; $\alpha_{эф}$ — эффективный коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С), рассчитываемый по формуле

$$\alpha_{эф} = \alpha_{кон} + \alpha_{рад}, \quad (2)$$

где $\alpha_{кон}$ — коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м^2 °С); $\alpha_{рад}$ — коэффициент теплопередачи излучением, Вт/(м^2 °С);

Теплообмен в турбулентном пограничном слое определяется следующим уравнением:

$$\mathrm{Nu}_l = 0{,}037(\mathrm{Re}_l)^{0{,}8}(\mathrm{Pr})^{0{,}4}, \quad (3)$$

где Nu_l — число Нуссельта или безразмерный коэффициент теплоотдачи; Re_l — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Число Нуссельта характеризует теплообмен на границе «стенка — жидкость» и определяется по формуле

$$\mathrm{Nu}_l = \frac{\alpha_{кон} l}{\lambda}, \quad (4)$$

где l — длина участка, на котором считаются теплопотери; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С).

Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_l = \frac{w_0 l}{\nu}, \quad (5)$$

где w_0 — скорость набегающего потока, м/с; ν — кинематический коэффициент вязкости, м^2/с, характеризует соотношение сил инерции и сил вязкости.

Число Прандтля для газов практически не зависит ни от температуры, ни от давления данного газа и является величиной постоянной [5].

Плотность теплового потока, переданного излучением, можно определить, используя закон Ньютона — Рихмана

$$q_{рад} = \alpha_{рад}\left(t_{ст} - t_{нар}\right), \quad (6)$$

а также закон Стефана — Больцмана

$$q_{рад} = c_0 \varepsilon_{ст}\left[\left(\frac{T_{ст}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{нар}}{100}\right)^4\right], \quad (7)$$

где $c_0 = 5{,}67$ — излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/(м^2 К^4); $\varepsilon_{ст}$ — коэффициент теплового излучения стенки; $T_{ст}$ — температура наружной стенки здания, К; $T_{нар}$ — температура наружного воздуха, К.

Методика расчета теплопотерь состоит в следующем:

1. Готовим исходные данные:

$t_{ст}$ — получаем по данным тепловизионной съемки, °С; $T_{ст} = t_{ст} + 273$, К;

$t_{нар}$ — температура наружного воздуха, измеренная при проведении тепловизионного обследования, °С; $T_{нар} = t_{нар} + 273$, К;

F — площадь рассматриваемой поверхности; выбираем для расчета теплопотерь площадь участка 1 м^2;

l — длина участка, на котором считаются теплопотери; выбираем ее равной 1 м;

λ — коэффициент теплопроводности воздуха; выбирается по атмосферному давлению и температуре наружного воздуха при проведении тепловизионного обследования, Вт/(м·°С);

w_0 — скорость набегающего потока, или скорость ветра при проведении тепловизионной съемки (съемку рекомендуется проводить при небольших скоростях ветра), м/с;

ν — кинематический коэффициент вязкости воздуха; выбирается по атмосферному давлению и температуре наружного воздуха при проведении тепловизионного обследования, м^2/с;

Pr — число Прандтля для воздуха; выбирается по атмосферному давлению и температуре наружного воздуха при проведении тепловизионного обследования;

$c_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2 К^4) — излучательная способность абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{ст}$ — коэффициент теплового излучения стенки; выбирается в зависимости от материала наружной поверхности здания;

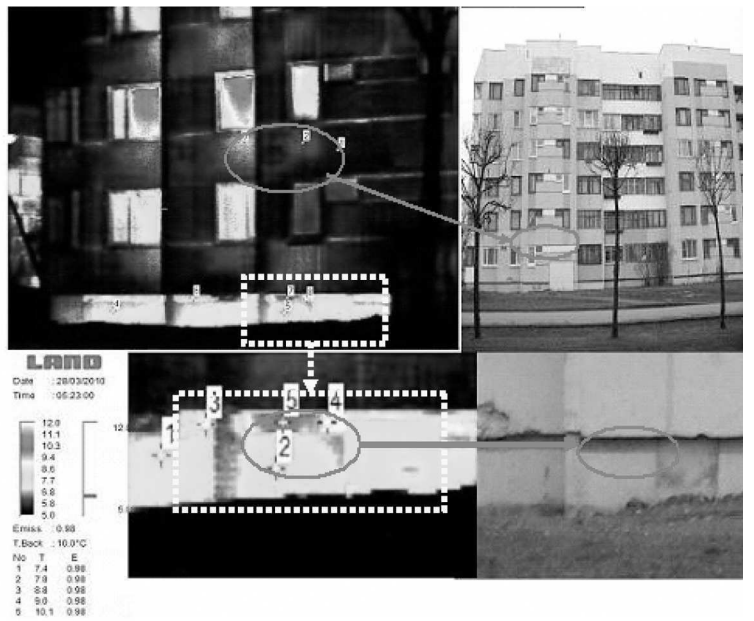
2. Из уравнения (5) находим число Рейнольдса Re_l, а из уравнения (3) — число Нуссельта Nu_l. После этого мы можем определить коэффициент теплопередачи конвекцией $\alpha_{кон}$, используя уравнение (4):

$$\alpha_{кон} = \frac{Nu_l \lambda}{l}.$$

3. Из уравнения (7) находим плотность теплового потока переданного излучением $q_{рад}$. Затем, используя уравнение (6), находим коэффициент теплопередачи излучением

$$\alpha_{рад} = \frac{q_{рад}}{\left(t_{ст} - t_{нар}\right)}.$$

4. Находим по уравнению (2) $\alpha_{эф}$ — эффективный коэффициент теплопередачи.



Термограмма фасада жилого дома по адресу ул. Ленинградская, д. 85/12

5. Находим тепловой поток через наружную поверхность здания Q, используя уравнение (1).

По предложенной методике были рассчитаны теплопотери ограждающих конструкций здания по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Ленинградская, д. 85/12.

Тепловизионное обследование здания проводилось 25.03.2010 с 05 часов 39 мин. по московскому времени при температуре наружного воздуха –7,8 °С и относительной влажности 49,6 % в соответствии с требованиями следующих нормативных документов: ГОСТ 26629-85 «Методы тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций» и СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий».

При электрофизических исследованиях параметров температуры и влажности воздуха и контроле качества теплоизоляции ограждающих конструкций использовали следующие приборы: тепловизор Land TI814 (зав. № 1561) и измеритель влажности и температуры Compart N8004 (зав. № 57577/8) с зондом температуры и влажности.

По данным рис. 1 были рассчитаны величины тепловых потоков участков наружного ограждения здания со следующими исходными данными: $t_{нар} = -7{,}8$ °С; $T_{нар} = t_{нар} + 273 = 265{,}2$ К; $F = 1$ м^2, $l = 1$ м; $\lambda = 2{,}36 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м °С); $w_0 = 2$ м/с; $\nu = 12{,}43 \cdot 10^{-6}$ м^2/с; Pr = 0,712; $c_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2 К^4); $\varepsilon_{ст} = 0{,}92$.

В таблице приведены величины тепловых потоков в зависимости от температуры наружной стенки, полученной по данным тепловизионного обследования.

В процессе термографирования жилого здания по адресу ул. Ленинградская, 85/12 было установлено:

значительные теплопотери наблюдаются в зоне цоколя здания;

температура наружных стен здания превышает температуру окружающего воздуха на 8 градусов, что свидетельствует о значительных тепловых потерях через стены;

в доме имеются два входа в подвальное помещение, на термограммах которых явно видны потери тепла;

в зоне установки батарей централизованного отопления также наблюдаются значительные теплопотери (зоны подоконных проемов);

Таблица 1

Тепловые потери через наружное ограждение здания

Параметр, ед. измер.	Значения параметра на пяти участках здания				
	1	2	3	4	5
$t_{ст}$, °С	4,2	5,0	6,6	7,5	9,5
Q, Вт	183,79	196,28	221,36	235,52	267,14

повсеместно наблюдались потери тепла через открытые форточки квартир, что может свидетельствовать о плохой регулировке отопительной системы.

Были разработаны рекомендации по уменьшению теплопотерь здания:

1. Использовать современные теплоизоляционные материалы при утеплении жилого дома, применение которых уменьшает теплопотери (на 46,5 % — при использовании в качестве утеплителя минеральной ваты (базальтовой) или пенопласта пенополистерола толщиной 150 мм; на 55,5 % — при использовании пеноплекса и теплекса толщиной 150 мм [6]).

2. Эффективнее регулировать отопительную систему. Например, использовать автоматическое регулирование теплового потока посредством радиаторных термостатических клапанов (РТК), которые предназначены для полного или частичного перекрывания потока теплоносителя, подаваемого системой отопления в отопительный прибор, при повышении температуры воздуха в помещении выше заданного уровня. Правильно подобранный и осознанно эксплуатируемый РТК способен сократить годовое потребление тепловой энергии на 10–20 %.

3. Использовать стеклопакеты вместо обычных окон. Современные стеклопакеты позволяют уменьшить теплопотери окна почти в два раза. Например, для десяти окон размером 1,0×1,6 м экономия достигает киловатта, что в месяц дает 720 киловатт·часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный Закон № 261** «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 г.

2. **Аникина, И.Д.** Тепловизионное обследование жилых зданий [Текст] / И.Д. Аникина, В.В. Сергеев // XXXIX неделя науки СПбГПУ: Матер. междунар. научно-практ. конф. Ч. III — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

3. **Ливчак, В.И.** Тепловизионное обследование не может заменить тепловые испытания зданий [Текст] / В.И. Ливчак // Энергосбережение. — 2006. — № 5.

4. **ГОСТ 26629–85.** Методы тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций [Текст].— М., 1985.

5. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст]: Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.— М.: Энергоатомиздат, 1981.

6. **Аникина, И.Д.** Сравнительный анализ эффективности применения современных теплоизоляционных материалов в жилых домах [Текст] / И.Д. Аникина, А.А. Калютик // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: матер. междунар. научно-практ. конф. Ч. III — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

7. **СНиП 23-02-2003.** Тепловая защита зданий [Текст].— М., 2003.

УДК 621.311:621.318

А.С. Адалев, В.Г. Кучинский, Н.С. Мазилкина, Е.Н. Попков, А.И. Фильчков, В.М.Чайка

ОТКЛЮЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ МЕЖФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов стали широко использоваться в различных областях. Эти машины обладают глубоким регулированием и высоким КПД из-за отсутствия электромагнитной системы возбуждения.

Поскольку поле возбуждения такой машины невозможно погасить, то ее поведение при

возникновении коротких замыканий (КЗ) на ее выводах имеет особенности по сравнению с электрическими машинами с электромагнитным возбуждением на роторе. В частности, предотвращение воздействия токов КЗ как на машину, так и на место возникновения КЗ возможно только путем отключения машины от этого места.

Защиту машины от токов трехфазного КЗ можно обеспечить включением в корень каждой звезды трехфазных вакуумных выключателей.

В статье исследуются режимы трехфазного короткого замыкания обмоток вентильной машины и определяются оптимальные алгоритмы отключения ее в аварийных режимах.

Расчетная модель

Рассматриваемая машина мощностью 5 МВт, имеющая на статоре две трехфазные обмотки, работает в двигательном режиме. Питание обмоток осуществляется от преобразователя частоты по двум независимым каналам. Поскольку схемы питания каждой из трехфазных обмоток машины идентичны, то выбранная расчетная схема будет моделировать только один канал питания двигателя, т. е. одну его трехфазную обмотку.

Параметры машины:

Номинальная мощность ..... 5 МВт
Номинальное фазное напряжение ..... 700 В
Номинальный фазный ток ..... 1200 А
Номинальная частота ..... 350 Гц
Число фаз 6

В расчетной модели, показанной на рис. 1, ключи К1, К2, К3 служат для моделирования режима короткого замыкания. Работа защитного выключателя электрической машины моделируется ключами К4, К5, К6. В модели принято, что отключение тока фазы выключателем будет происходить в момент первого перехода этого тока через ноль. Время срабатывания выключателя после возникновения режима КЗ было выбрано постоянным и равным 8 мс, что является предельно быстрым для существующих вакуумных выключателей.

Основные характеристики отключения режима трехфазного короткого замыкания на линейных выводах машины

Процесс развития токов КЗ зависит от момента времени, когда произошло короткое замыкание, т. е. от величин фазных ЭДС двигателя, которые являются источниками токов КЗ. В силу симметрии фазных ЭДС двигателя при изменении момента возникновения КЗ картина токов короткого замыкания будет повторяться с периодом 60 электрических градусов. Поэтому для учета влияния момента возникновения короткого замыкания на процесс развития токов достаточно проварьировать момент возникновения КЗ в диапазоне от 0 до 60 электрических градусов.

Момент реального прерывания тока КЗ в каждой фазе, возникающий при переходе этого тока через нулевое значение, — индивидуальный для каждой фазы.

Необходимо отметить, что после отключения фазы выключателя, в которой ток первым переходит через ноль, дальнейшее развитие короткого

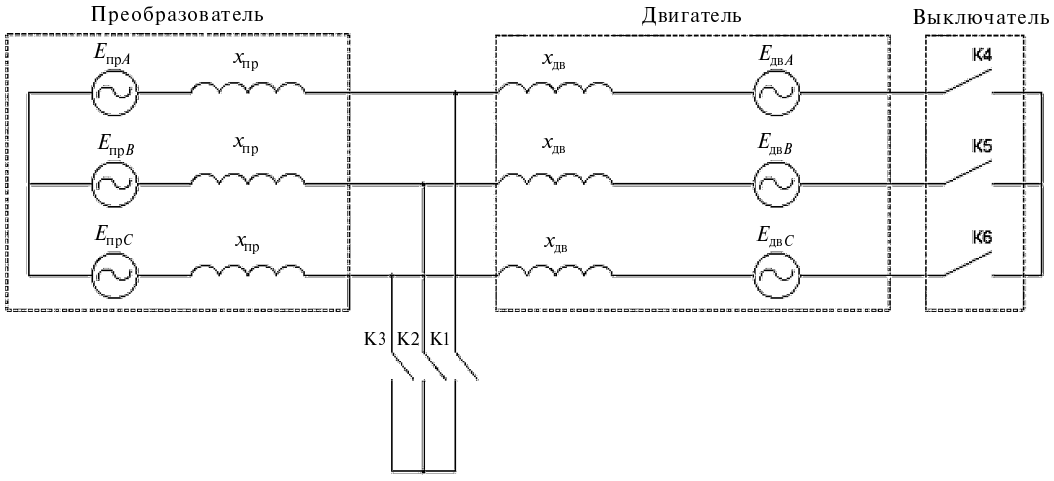


Рис. 1. Расчетная схема режима КЗ машины

замыкания осуществляется как двухфазное и сопровождается возникновением собственных апериодических составляющих ударных токов.

Таблица 1

Данные расчета длительностей КЗ, амплитуд токов в зависимости от момента возникновения КЗ

α, эл. град	T	T_2	I_a, А	I_b, А	I_c, А
0	3	–	5700	6386	3715
10	3	–	5260	6535	4305
20	3	–	4755	6577	4865
30	3	7	4180	6500	5435
40	3	11	3575	6343	5785
50	3	–	3115	6064	6140
60	3	–	3715	5700	6386

При расчетах в процессе варьирования момента возникновения КЗ фиксировались наиболее важные величины, такие, как максимальные токи в фазах (I_a, I_b, I_c) и количество периодов действия режима трехфазного КЗ (T) и двухфазного КЗ (T_2) . В табл. 1 показаны результаты расчета этих величин для режима внезапного трехфазного короткого замыкания в зависимости от момента его возникновения $t_{КЗ}$, который варьировался с шагом в 10 электрических градусов. Угол $\alpha = 0$ соответствует переходу линейного напряжения U_{AB} через ноль.

Графики изменения токов во времени показаны на рис. 2. Из рисунка следует, что время протекания трехфазного КЗ составляет три периода, после чего возникает длительный режим двухфазного КЗ (11 периодов).

Представляет интерес возможность сокращения длительности воздействия токов КЗ. Это прежде всего необходимо для того, чтобы снизить энерговыделение в зоне КЗ, которая может находиться в выходном каскаде преобразователя частоты, питающего обмотки вентильной машины. Выделение энергии в зоне КЗ и наличие сильноточной дуги могут нанести существенные повреждения дорогостоящим силовым полупроводниковым устройствам.

Алгоритм срабатывания вакуумного выключателя

Как показали проведенные расчеты, синхронное отключение всех трех вакуумных камер выключателя не позволяет в ряде случаев обеспечить быстрое отключение токов короткого замыкания. Причиной длительного протекания

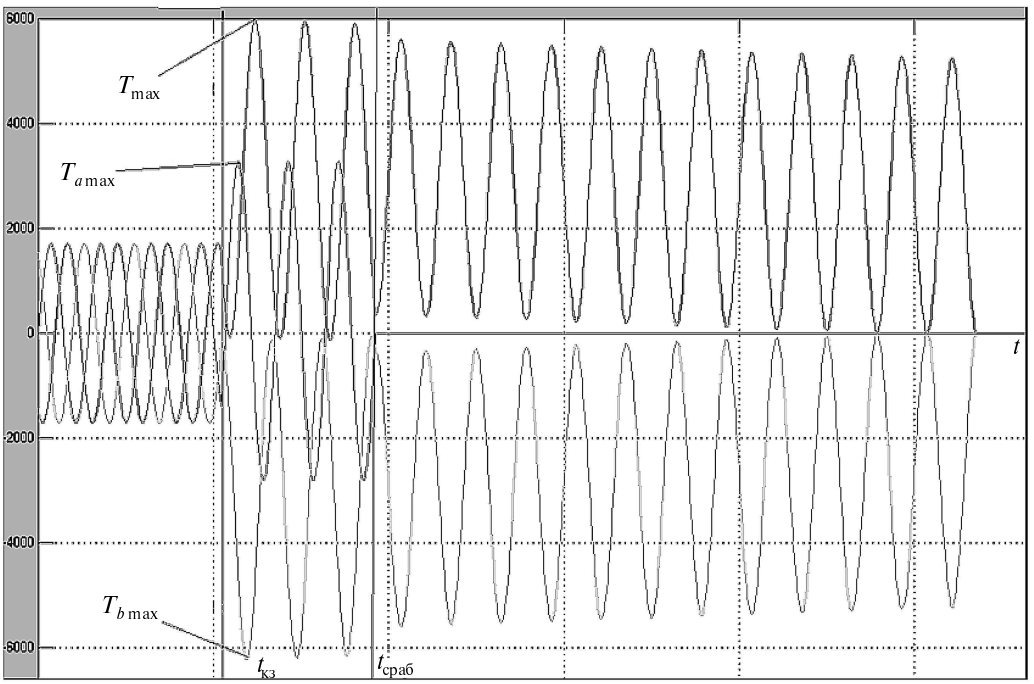


Рис. 2. Осциллограммы фазных токов трехфазного КЗ при использования выключателя с одновременным отключением фаз

токов КЗ служит большая апериодическая составляющая в токах двухфазного КЗ, которое возникает в случае отключения тока в одной из фаз двигателя при ликвидации начального трехфазного короткого замыкания.

В связи с этим был разработан специальный алгоритм, позволяющий максимально быстро обеспечить отключение токов КЗ. Этот алгоритм требует наличия индивидуальных приводов на каждом полюсе вакуумного трехфазного выключателя.

Алгоритм заключается в следующем:

1. После возникновения КЗ на интервале 1–1,5 периодов производится вычисление постоянных составляющих всех трех фазных токов.

2. В двух фазах с наибольшими значениями постоянных составляющих производится отключение соответствующих вакуумных дугогасительных камер.

3. Отключение вакуумной камеры третьей (оставшейся) фазы следует проводить спустя 7 периодов после момента регистрации факта КЗ.

4. При наличии КЗ во втором канале питания машины вычисление постоянных составляющих фазных токов в нем производится через 2–2,5 периода после подачи первой команды на отключение вакуумных камер в первом канале.

5. Дальнейший ход отключения во втором канале должен быть полностью идентичным алгоритму отключения фаз первого канала.

Таблица 2

Данные расчета по предложенному алгоритму длительностей КЗ и токов в зависимости от момента возникновения КЗ

α, эл. град.	T	T_2	I_b, А	I_a, А	I_c, А
0	3	–	6386	5706	3715
10	3	–	6535	5260	4305
20	3	1	6577	5200	4865
30	3	1	6500	4860	5435
40	3	1	6343	4486	5785
50	3	–	6064	3115	6140
60	3	–	5700	3715	6386

Результаты применения данного алгоритма показаны в табл. 2 и на рис. 3. Из этих результатов видно, что длительность протекания этапа двухфазного КЗ сократилась в самом тяжелом случае с 11 периодов до одного периода, а полная длительность токов КЗ сократилась с 14 периодов до 4 периодов.

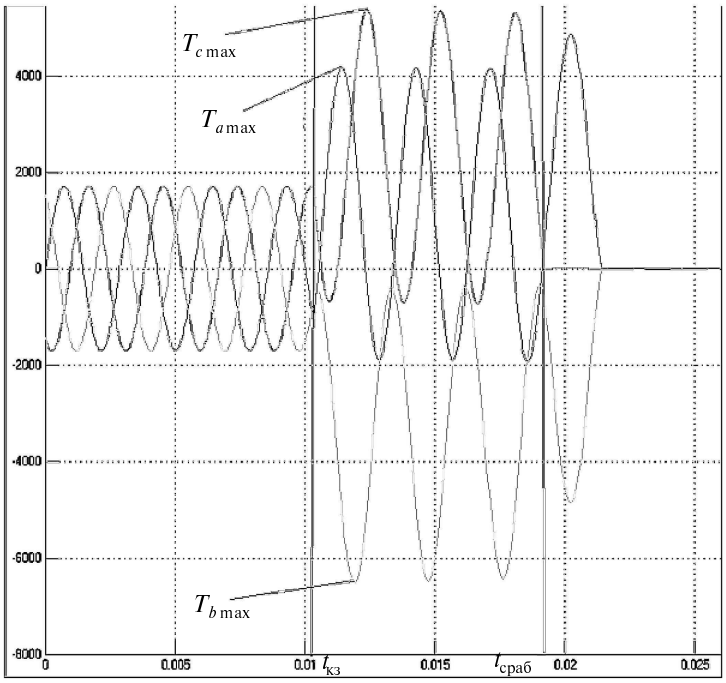


Рис. 3. Графики фазных токов КЗ при использовании алгоритма раздельного отключения фаз вакуумного выключателя

Проведенные расчеты позволили заключить:

1. Для оперативного отключения токов трехфазного КЗ вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов можно использовать трехфазный вакуумный выключатель, включенный в корень звезды.

2. Синхронное отключение всех трех полюсов выключателя не позволяет в ряде случаев обеспечить быстрое отключение токов КЗ.

3. Для оптимально быстрого отключения токов КЗ следует использовать вакуумный выключатель, имеющий независимые приводы на каждом полюсе.

4. Предложенный алгоритм срабатывания этих приводов выключателя обеспечивает сокращение длительности протекания токов короткого замыкания в наиболее тяжелых случаях с 14 периодов до 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Патент № 014727** Электрическая машина с постоянными магнитами [Текст] / ОАО «НПО «Русский Электропривод».— 2011 г.

2. **Патент № 015042** Система питания и управления многофазной вентильной машиной [Текст] / ОАО «НПО «Русский Электропривод».— 2011 г.

3. **Макаров, Е.Ф.** Справочник по электрическим сетям [Текст] / Е.Ф. Макаров.— М.: Энергия, 2007.— 638 с.

УДК 624.15:626/627

Д.А. Ивашинцов, Т.В. Иванова

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Задача сегодняшнего дня для гидротехников — попытаться изменить негативное восприятие нашей профессиональной деятельности широкой общественностью. Именно поэтому при разработке концепции экологической и социальной безопасности гидротехнических объектов необходимо с максимальной тщательностью подходить ко всем вопросам взаимодействия гидроэнергетических объектов (ГЭО) и социума, а также — ГЭО и природно-технической системы (ПТС) [1,2].

Для того, чтобы определить эти взаимоотношения и взаимовлияния, требуется, в первую очередь, определиться с понятиями социально-экологической и природно-технической систем, с характером и особенностями экологических, социальных и экономических (в части нас интересующей) факторов [3] .

Под социумом здесь понимается та часть общества на определенной территории страны, которая подпадает под те или иные воздействия ГЭО. Пространственные границы социума задаются пространственным масштабом воздействия ГЭО на него. Каждому ГЭО соответствует свой социум со своей территорией, определяемой специальными расчетами.

Под окружающей природной средой ГЭО здесь понимается та часть природы на определенной территории страны, которая испытывает на себе те или иные воздействия ГЭО.

Взаимосвязь социума и природной среды в подавляющей части проходит через материально-техническую сферу. Именно в ней материализуются антропогенные нагрузки, налагаемые на природу человеком.

Социально-экологическим проблемам, возникающим при активном природопользовании, в том числе в целях выработки электроэнергии, посвящены работы таких специалистов, как А.Б. Авакян, Н.В. Арефьев Ю.С. Васильев, А.Б. Векслер, Н.В. Зарубаев, В.В. Каякин, Р. Кини, И. Клима, А.И. Макаров, Ю.Г. Марков, Р.Е. Мунн, И.В. Семенов, М.П. Федоров, Н.И. Хрисанов и целого ряда других.

Гидроэнергетическое строительство, которое призвано преобразовать природные гидроэнергетические ресурсы в социально необходимый ре-

сурс — электроэнергию, ведется в целях улучшения материальных и социальных условий жизни людей, т. е. для достижения различного рода выгод экономического, экологического и социального характера. Однако, кроме положительных моментов, гидроэнергетике присущи и некоторые отрицательные эффекты, оказываемые ею на окружающую среду и человека и нередко приводящие к различного рода социально-экологическим нарушениям, провоцируя явления или процессы, способные наносить материальный, экологический и социальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую среду, экосистемы, отдельных людей и социальные образования.

Как показывают наши исследования, наиболее полный учет социально-экологического фактора в той или иной сфере деятельности возможен только в аспекте решения проблем безопасности. В рамках такого подхода можно выделить следующие основные принципы, характеризующие «культуру безопасности» в технике и природопользовании:

системный подход на всех этапах инженерной деятельности и природопользования (изыскания, научное обоснование, проектирование, анализ, строительство, испытания, эксплуатация, контроль и мониторинг, ремонт и реконструкция);

неформальное восприятие опыта эксплуатации, аварийности, экологических и социальных последствий имевших место аварий и нарушений, а также отношения общественности и местного населения к разным технологиям;

предотвращение проявления чувств самоуспокоенности при нормальной эксплуатации объектов;

всесторонний учет «человеческого» фактора, поскольку по сей день до 80 % аварий и нарушений на технических объектах происходят по вине человека;

приоритет требованиям социальной и экологической безопасности при принятии решений.

Гидроэнергетические объекты принято относить к разряду сложных природно-технических систем. При этом сложность определяется не только суммой и разнообразием взаимодействующих элементов выделяемой системы (сооружения, конструкции, устройства, оборудование) или характером внутренних и внешних связей. Важная особенность ГЭО связана с длительным временем их функционирования и наличием столь большого количества действующих факторов, что все они не могут быть учтены формальным образом, а некоторые из них носят принципиально случайный характер. В результате предсказание тенденций развития ГЭО на основе имеющихся данных представляется возможным только на ограниченных отрезках времени.

Чтобы обеспечить минимум экологических и социальных нарушений при гидроэнергетическом строительстве, необходимо создавать такие ГЭО, которые естественным образом «погружались» бы в окружающую природу и социально-экономическую среду. Практически это можно реализовать в том случае, когда максимальное количество элементов, имеющих отношение к природно-социальной среде, испытывающих влияние ГЭО и наоборот, включаются в ПТС.

Следствием нарушения устойчивости ПТС, как показывает практика, являются деградационные процессы, ведущие к потере качества ее технических и природно-социальных составляющих (гидросооружения, экосистемы, социумы и т. п.), упрощению и разрушению природно-экологических структур, снижению их хозяйственного, культурного и эстетического потенциала, ухудшению условий обитания биоценозов, природной и социальной среды жизни людей. При неблагоприятном стечении обстоятельств это может привести к развитию экологически конфликтной ситуации в ПТС и/или в окружающей ее среде.

Один из характерных признаков деградации ПТС — появление так называемых «побочных» эффектов. Побочными можно назвать дополнительные, сверх запланированных потери ресурсов естественной среды, вызываемые природопользованием и эксплуатацией сооружений.

В отличие от единовременных потерь, побочные эффекты могут проявить себя в любой момент времени, например спустя несколько десятилетий нормальной эксплуатации гидросооружений. Для создания устойчивой ПТС на базе ГЭО необходимо предусмотреть возможность управления такой ситуацией экономически оправданными методами, иначе, улучшая природно-экологическую обстановку, можно резко снизить функциональную надежность ПТС со всеми вытекающими отсюда убытками и потерями.

Методологическая основа обеспечения устойчивого развития ПТС, по нашему мнению, должна включать следующие основные принципы:

минимизацию единовременных безвозвратных природно-экологических потерь, вызываемых строительством и эксплуатацией ГЭО;

обеспечение устойчивого развития всех частей ПТС, ее технической, природной и социальной компонент в диапазоне допускаемых режимов эксплуатации ГЭО;

обеспечение управляемости процессов в ПТС и окружающей среде, в том числе посредством изменения режимов эксплуатации ГЭО.

Природно-технические системы в гидроэнергетике допускают активные управляющие воздействия в весьма широком диапазоне. Естественно, что первичной целью управления является обеспечение определенного равновесия между природными и социальными процессами внутри самой ПТС и развитие ее способностей к саморегулированию. Такое равновесие может быть достигнуто на разных уровнях взаимодействия собственно ГЭО и природно-территориального комплекса. Например, малые гидроэлектростанции сами по себе обычно не вызывают сколько-нибудь существенных необратимых социально-экологических эффектов и могут легко вписаться в окружающую природу и социальную среду. Средние ГЭО могут создавать благоприятные условия для устойчивого сосуществования как естественных, так и вновь образованных природных и социальных структур. Крупные же ГЭО коренным образом изменяют природные структуры, экосистемы и социумы. В этих условиях необходимо организовать и поддерживать функционирование ПТС на основе принципа обеспечения устойчивости новых природной и социальной сред.

В общем случае под управляемостью ПТС следует понимать ее способность подчиняться внешним воздействиям, которые направляются на реализацию требований по социальной и экологической безопасности. Важнейшими элементами управляемости в гидроэнергетике являются:

мониторинг ПТС и окружающей среды;

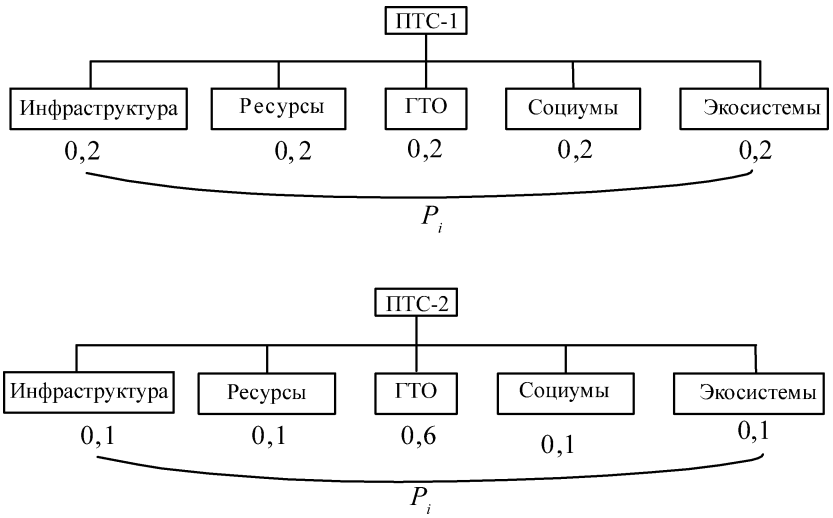
натурный контроль и диагностика гидросооружений (ГТС), распознавание их текущего и прогнозирование будущего технических состояний, профилактика и ремонты;

оперативное внедрение экономически выгодных природоохранных и компенсирующих мероприятий, а также сценариев защиты населения и окружающей среды при возможных авариях, социальных и экологических нарушениях.

По нашему мнению, системе управления должна принадлежать главная роль в обеспечении устойчивости ПТС формируемых ГЭО. В настоящее время это — единственно возможный путь реализации социально-экологических требований безопасной гидроэнергетики, так как уровни неблагоприятных внешних воздействий на водные объекты, экосистемы, социумы достигли таких значений, что способности ПТС к саморегулированию в большинстве случаев практически исчерпаны, и для обеспечения их устойчивого развития ими необходимо управлять.

Организация управления ПТС требует определенных затрат. При этом следует учитывать одно обстоятельство. Как внутри ПТС, так и вне ее, т. е. в окружающей систему среде, долговременное эффективное управление невозможно за счет средств, привлекаемых извне, ибо в этом случае будет поддерживаться конфликт между обществом и объектом, и он рано или поздно приведет к «отторжению» объекта.

Поэтому для устойчивого развития ПТС прежде всего необходимо обеспечить экономическую эффективность системы, т. е. такое состояние, при котором совокупные выгоды по ПТС в полной мере компенсируют все возможные затраты на ее функционирование и реализацию требований по безопасности. Как известно, гидротехническое строительство сопряжено с различными неблагоприятными последствиями для окружающей среды. Такие последствия принято называть явлениями, сопутствующими реализации ГТП. Сопутствующие явления, как правило, имеют общий для всех проектов характер, а степень их проявления в основном зависит от параметров гидротехнического комплекса в целом и параметров основных сооружений (плотины, водосбросы и т. п.). Наиболее существенные из сопутствующих явлений следующие: отчуждение территорий; изменение ландшафтов; изменение гидрологического режима и режима наносов, качества воды в бьефах; изменение гидрогеологических условий; деградация многолетней мерзлоты (в районах ее распространения); «наведенная» сейсмичность и пр. Сопутствующие явления приводят к различного рода потерям (природные, экологические, социальные, культурные, экономические): сельскохозяйственных угодий и месторождений полезных ископаемых; редких видов флоры и фауны; археологических и этнографических памятников; связанным с переустройством коммуникаций, переносом промышленных предприятий и др. Чаще всего вышеперечисленные потери планируются



Варианты формирования ПТС на базе ГТО:
а — ПТС-1; *б* — ПТС-2

(возможность их появления учитывается при проектировании) и носят, как правило, единовременный характер: они относятся к периодам строительства, наполнения водохранилища и первых лет эксплуатации ГТО. В ходе дальнейшей эксплуатации объекта потери окружающей среды могут увеличиваться либо уменьшаться в зависимости от стихийности или управляемости процесса изменения сопутствующих явлений. При потере устойчивости ПТС потери возрастают. Для создания устойчивой ПТС на базе ГТО необходимо предусмотреть возможность управления такой ситуацией экономически оправданными методами, иначе, улучшая природно-экологическую обстановку, можно резко снизить функциональную надежность ГТО — способность объекта выполнять заданные функции [3].

Устойчивость ПТС в значительной мере зависит от степени ее разнообразия. Согласно информационной теории для оценки разнообразия экосистем используется показатель разнообразия Шеннона — Винера [4], который можно записать в следующем виде:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log P_i, \qquad (1)$$

где $P_i = F_i/F$ — показатель, характеризующий долю присутствия (относительную площадь распространения) i-го вида в составе экосистемы; F_i — площадь распространения i-го вида; F — площадь экосистемы.

Чем выше разнообразие экосистемы (чем больше показатель H), тем выше ее устойчивость. Учитывая данное обстоятельство, известный эколог Макартур предложил для определения устойчивости экосистемы S использовать аналогичный подход:

$$S = -\sum_{i=1}^{n} P_i \log P_i, \qquad (2)$$

где P_i — показатель, характеризующий долю энергии, трансформированной i-м видом экосистемы.

Формулу (2) можно использовать и при оценке устойчивости ПТС. В качестве показателя, характеризующего долю энергии, трансформированной i-м компонентом системы, в данном случае можно выбрать с некоторой долей условности отношение балансовой стоимости (стоимость с учетом затрат и доходов) i-й компоненты системы W_i к обобщенной стоимости ПТС (WПТС):

$$P_i = W_i / W\text{ПТС}. \qquad (3)$$

Пример 1. Оценить устойчивость ПТС для двух вариантов ПТС-1 и ПТС-2, характеризующихся различным распределением относительных стоимостей составляющих ее компонент. Значения P_i приведены на рисунке. В результате расчетов по формуле (2) было получены показатели устойчивости S: для ПТС-1 он равен 0,7, для ПТС-2 — $S = 0{,}533$.

Таким образом, вариант ПТС-1 является более предпочтительным с точки зрения устойчивости системы, чем ПТС-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров, М.П.** Экологический инжиниринг в гидротехнике [Текст] / М.П. Федоров, С.Г. Шилин, Д.А. Ивашинцов.— СПб.: Изд-во ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева, 1995.

2. **Хрисанов, Н.И.** Экологическое обоснование гидроэнергетического строительства [Текст] / Н.И. Хрисанов, Н.В. Арефьев.— СПб: Изд-во СПбГУ, 1994.

3. **Векслер, А.Б.** Надежность,социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений [Текст] / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин.— СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002.— 591 с.

4. **Briggs, D.** Fundamentals of the Physical Environment [Текст] / D. Briggs, P. Smithson, K. Addison, K. Atkinson. Second Edition.— London & New York, 1997.

УДК 62-665.3

А.С. Алешина, Г.П. Поршнев, С.В. Скулкин

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Повышение энергоэффективности — это скрытый резерв для динамичного роста экономики за счет перераспределения высвобождающихся финансовых ресурсов и создания новых высокотехнологичных производств. Вопросы энергосбережения чрезвычайно актуальны в условиях как экономического роста (ввиду постоянного роста тарифов на энергоресурсы), так и экономического спада (вследствие необходимости сокращения эксплуатационных издержек). Для эффективного управления потреблением энергетических ресурсов и контроля экологических показателей деятельности предприятия необходима система энергетического менеджмента.

Энергетический менеджмент — это совокупность средств и методов, направленных на управление процессом энергопотребления и систематический контроль над энергетическими издержками. В его основе: декларация повышения энергоэффективности; планирование потребления энергоресурсов и повышения энергоэффективности; выработка целевых показателей энергоэффективности и путей их достижения; система мотивации персонала.

Можно выделить два типа энергетического менеджмента — оперативный и стратегический.

Оперативный энергоменеджмент позволяет:

исключить влияние случайных факторов на потребление энергоресурсов посредством формализованных управленческих процессов;

выявить и исключить факторы, ухудшающие показатели энергоэффективности;

выявить и стимулировать факторы, улучшающие показатели энергоэффективности;

реализовать корректирующие действия при отклонениях энергопотребления от целевых значений;

добиться минимально необходимого и достаточного уровня энергопотребления при действующих технологиях и оборудовании.

Оперативный энергетический менеджмент также служит основной движущей силой при реализации организационных и малозатратных энергосберегающих мероприятий.

Стратегический энергоменеджмент позволяет:

сформировать модель поведения персонала;

обеспечить наибольшую эффективность инвестиций в энергосбережение;

обеспечить контроль достижения результатов при внедрении энергосберегающих мероприятий;

обеспечить максимальную отдачу от реализации энергосберегающих мероприятий.

Требования к системе энергоменеджмента устанавливает международный стандарт ISO 50001:2011.

Кроме энергетического аспекта, реализация системы энергетического менеджмента вызвана необходимостью уменьшения нагрузки на окружающую среду от увеличения отходов и выбросов. Для снижения негативного влияния принимаются более строгие требования к энерге-

тической эффективности во всем мире. В целях повышения энергоэффективности многие иностранные предприятия планируют внедрить или уже внедрили систему энергоменеджмента на основе международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы Энергоменеджмента — Требования с руководством по эксплуатации».

В основе стандарта ISO 50001:2011 лежит цикл Деминга, или цикл PDCA «Plan-Do-Check-Act», т. е. планирование — выполнение — проверка — воздействие (управление и корректировка)), — циклически повторяющийся процесс принятия решения, используемый в управлении качеством.

ISO 50001:2011 устанавливает требования к созданию, внедрению, поддержанию и совершенствованию системы энергетического менеджмента, цель которого заключается в предоставлении компаниям структурированного и всеобъемлющего руководства по оптимизации процесса потребления энергетических ресурсов и системному управлению данным процессом. Энергетика имеет решающее значение для работы организаций и может быть существенной статьей расходов независимо от рода деятельности.

Предприятия, применяющие систему энергетического менеджмента по стандарту ISO 50001, имеют возможность сократить издержки на потребление энергии и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Стандарт ISO 50001:2011 снабжает полноценной стратегией действий как в менеджерской области, так и в технических аспектах любую организацию, независимо от ее размера, чтобы она смогла реально повысить свою энергоэффективность. Его главное предназначение — помочь организации интегрировать энергоэффективность в ее текущие управленческие практики. Успешная реализация зависит от усилий и принятия требований этого стандарта со стороны всех уровней организации, особенно со стороны высшего руководства.

Стандарт ISO 50001:2011 может быть реализован для внутренней и внешней выгоды предприятия. Сертификация независимым аудитором на соответствие предприятия системе менеджмента ISO 50001:2011 не является обязательным требованием самого стандарта.

В ряде российских предприятий уже применяются элементы энергоменеджмента, например разрабатываются и реализуются программы, планы и проекты энергосбережения, осуществляются закупки более энергоэффективного оборудования, анализируются возможности для улучшения энергоэффективности отдельных производств и/или процессов.

Стандарт — универсальный, так как использует подход «один размер, пригодный для всех» («one size fits all»), и потому он применим любой организацией независимо от ее размеров и отраслевой принадлежности. Требования стандарта сформулированы как предписывающие «то, что должно быть сделано, не определяя, как это сделать». Метод достижения каждого из этих требований организация определяет сама исходя из собственных нужд и потребностей. В результате у различных организаций в зависимости от их размера, структуры и вида деятельности могут быть различные способы выполнения требований стандарта.

Стандарт применим лишь в отношении тех факторов, касающихся расхода энергии, которые могут быть проверены и на которые организация может влиять.

Применение энергоменеджмента в организации — инновационное решение, которое связано с модернизацией существующих методов управления. Внедрение системы энергоменеджмента — это лишь один из инструментов энергосбережения. Но даже применение только этого инструмента может (по предварительным оценкам) принести целый ряд выгод организационного, финансового и репутационного характера, а в итоге — содействовать конкурентоспособности организации.

Другими словами, применение энергетического менеджмента на предприятии способствует определению потенциала энергосбережения данного предприятия. Под потенциалом энергосбережения мы будем понимать максимальные потери топлива, тепловой, механической и электрической энергии, которые можно полностью или частично вернуть в энерготехнологический цикл с помощью соответствующих энергосберегающих мероприятий. Определение не является строгим, однако не содержит внутренних противоречий и, как представляется, вполне соответствует интуитивному восприятию проблемы.

Ключевой аспект предложенного определения — подчеркнутая связь потенциала энергосбережения с итоговым результатом энергетического обследования.

В частности, известные проблемы практической реализации энергосберегающих мероприятий могут рассматриваться в качестве ограничений или критериев выбора того или иного подхода к оценке потенциала. В свою очередь результаты сравнения эффективности возможных мер экономии энергоресурсов могут послужить основой для сопоставительного анализа различных технических приемов вычисления потенциала энергосбережения.

Оценка потенциала энергосбережения неразрывно связана с выбором и оценкой энергосберегающих мероприятий, типовых и нетиповых.

Очевидно, что в потенциал энергосбережения следует включать энергетический эффект только тех мероприятий, которые окупятся за нормативный срок их применения. Энергетический эффект от всех возможных мероприятий, не требующих никаких вложений (например, организационных), включается в потенциал энергосбережения по умолчанию. Энергетический эффект от мероприятий с неизвестным сроком окупаемости учитывается по усмотрению лиц, ответственных за проведение энергетического экспресс-обследования, с соответствующими примечаниями.

При наличии нескольких решений, альтернативных по отношению друг к другу, указывается то, которое имеет наибольший энергетический эффект. При наличии нескольких решений, влияющих на эффективность друг друга, энергетический эффект учитывается в зависимости от предполагаемой очередности их внедрения.

Потенциал энергосбережения рассчитывается суммированием энергетических эффектов для набора энергосберегающих мероприятий.

После проведения энергетического обследования на предприятии руководству может быть предложено к внедрению (реализации) несколько мероприятий для снижения расхода топлива на выработку тепловой энергии.

Далее будут рассмотрены три мероприятия, проведение которых способствует значительному сокращению расхода топлива без существенных капитальных вложений.

Известно, что присосы воздуха через обмуровку котла, неплотности притворов смотровых лючков и газоходов котлов приводят к перерасходу топлива. Устранение 10 % присосов воздуха через неплотности обмуровки котлов позволит снизить перерасход используемого топлива на 0,5 %. Выполнение данного мероприятия на предприятиях промышленного сектора проводят с помощью:

заделки трещин в обмуровке котлов; устранения неплотностей притворов смотровых лючков и неплотностей в газоходах котлов; замены старой обмуровки на новую (или на более современную); проведения испытаний на предмет выявления присосов воздуха.

Обмуровка котлов производится двумя способами: при помощи огнеупорного кирпича (тяжелая обмуровка) и специальными огнеупорными составами с использованием армирующей сетки (облегченная обмуровка).

Заделка трещин и неплотностей в обмуровке выполняется при помощи огнеупорных смесей с добавлением жидкого стекла (для повышения прочности), а устранение неплотности притворов смотровых лючков — при помощи асбестового шнура.

При выборе организации, которая будет производить работы, необходимо руководствоваться наличием разрешительных и проектных документов на выполнение данного вида работ, а также опыта выполнения подобных работ.

Возможный эффект от устранения присосов воздуха (возможная экономия топлива, т у. т./год, в зависимости от потребления топлива) иллюстрирует рисунок. Эффект от применения данного мероприятия достигается за счет повышения коэффициента полезного действия котла.

Другое мероприятие, также способствующее снижению расхода топлива на выработку тепловой энергии, — наладка водно-химического режима источников теплоснабжения.

Несоблюдение ведения водно-химического режима на источниках теплоснабжения приводит к загрязнению внутренних поверхностей нагрева котлов, точечной коррозии тепловых сетей, увеличению гидравлического сопротивления котлов и, как следствие, расхода электрической энергии насосами. Все эти причины приводят к увеличению расхода топлива на выработку тепловой энергии.

В настоящее время на большинстве котельных РФ применяются различные методы ведения водно-химического режима:

удаление солей жесткости из подпиточной и питательной воды при помощи Na-катионирования;

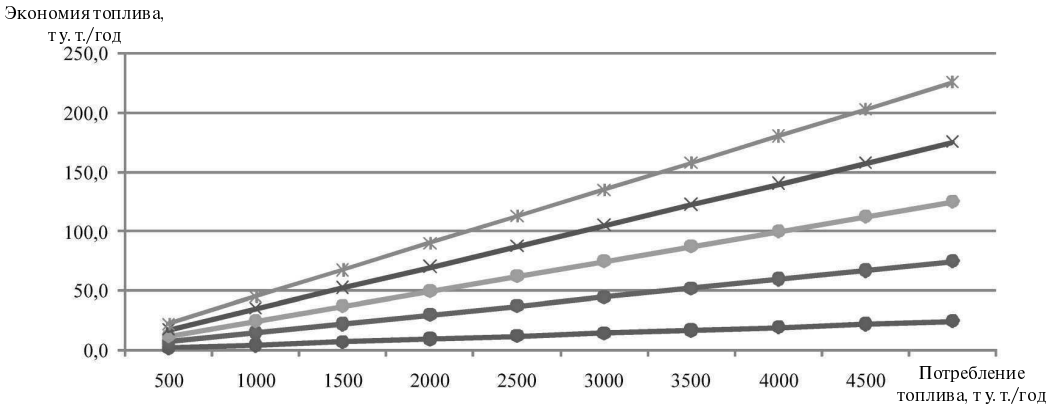


Рис. 1. Возможный эффект от устранения присосов воздуха в котле:
— снижение присосов воздуха на 10 %; — снижение присосов воздуха на 30 %;
— снижение присосов воздуха на 50 %; — снижение присосов воздуха на 70 %;
— снижение присосов воздуха на 90 %

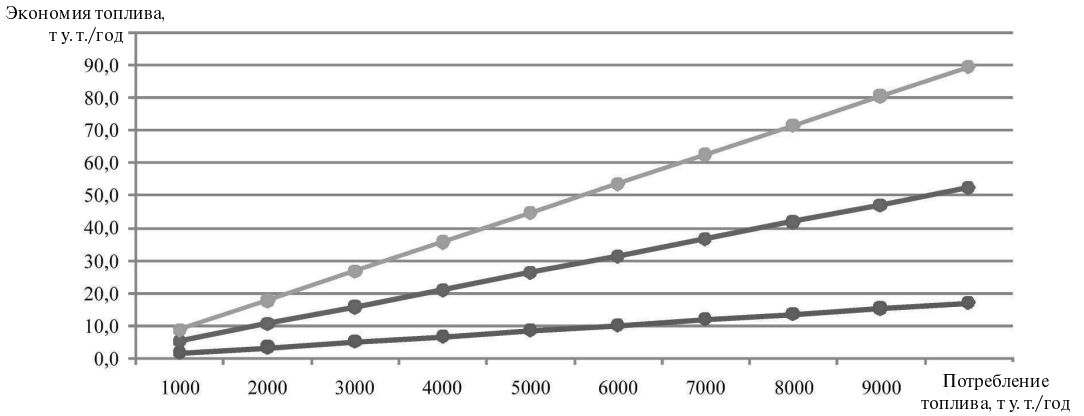


Рис. 2. Возможный эффект от наладки водно-химического режима источников теплоснабжения:
— увеличение отложений на 1 мм; — увеличение отложений на 2 мм;
— увеличение отложений на 3 мм

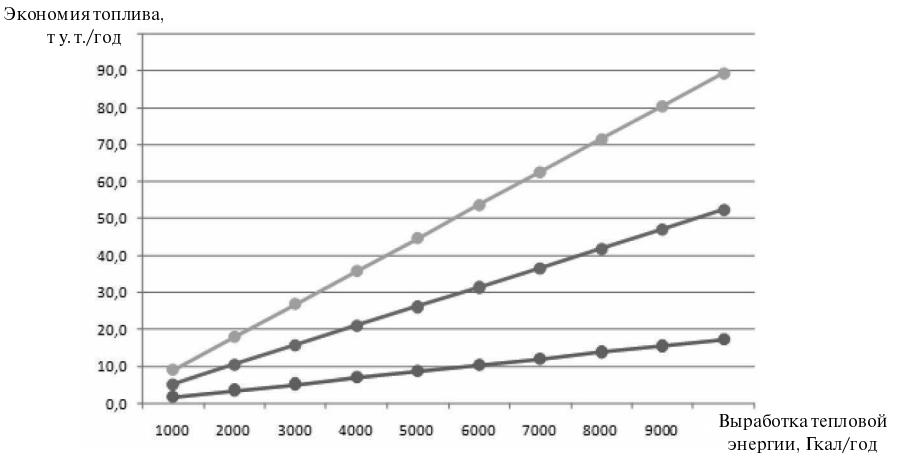


Рис. 3. Возможный эффект от чистки поверхностей нагрева топливоиспользующих агрегатов:
— уменьшение отложений на 1 мм; — уменьшение отложений на 2 мм;
— уменьшение отложений на 3 мм

давление растворенных агрессивных газов в деаэрационных установках вакуумного и атмосферного типа;

подщелачивание подпиточной воды;

обезжелезивание воды при помощи установок обратного осмоса.

Соблюдение водно-химического режима согласно режимным картам ВПУ (установки докотловой обработки воды), а также действующим нормам и правилам позволит не только снизить расход топлива на выработку тепловой энергии, но и повысить ресурс работы оборудования источников и потребителей, снизить аварийность на энергетическом оборудовании.

Возможный эффект от наладки водно-химического режима источников теплоснабжения (возможная экономия топлива, т у. т./год, в зависимости от выработки тепловой энергии, Гкал/год) демонстрирует рис. 2. Эффект от применения данного мероприятия также достигается за счет повышения коэффициента полезного действия котла.

Третьим мероприятием, которое, на наш взгляд, должно обязательно проводиться на предприятии для снижения удельного расхода топлива на выработку тепловой энергии и при этом не требует существенных капитальных вложений, является чистка поверхностей нагрева топливоиспользующих агрегатов.

По результатам проведенных инструментальных измерений на топливоиспользующем оборудовании можно судить о загрязненности поверхностей нагрева, которая, как правило, приводит к ухудшению теплообмена продуктов сгорания с поверхностями нагрева, а также к увеличению сопротивления газового тракта котла. В связи с этим для обеспечения нормальной эксплуатации агрегата необходимо систематически чистить его поверхности нагрева.

Для удаления с нагревательных и других поверхностей котла сажи, кокса, золы, окалины, продуктов разрушения футеровки и продуктов коррозии регулярно производится их наружная чистка. Основные способы очистки поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов, применяемые в настоящее время, — это паровая обдувка, импульсная очистка, дробеочистка, виброочистка, а в отдельных случаях — ручная очистка. Применение одного из данных способов позволит повысить теплопередачу и, следовательно, увеличить коэффициент полезного действия.

Периодичность очисток должна быть определена внутренними инструкциями предприятия по результатам количественного анализа внутренних отложений.

Возможный эффект от чистки поверхностей нагрева топливоиспользующих агрегатов (возможная экономия топлива, т у. т./год, в зависимости от выработки тепловой энергии, Гкал/год) представлен на рис. 3. Эффект от применения данного мероприятия достигается за счет повышения коэффициента полезного действия котла за счет увеличения теплопередачи.

Для повышения энергетической эффективности промышленных предприятий России и реализации политики в области энергосбережения подобный анализ должен не только проводиться после каждого энергетического обследования на предприятии, но и стать неотъемлемой частью непрерывного самообследования.

По результатам анализа трех наименее затратных мероприятий как с технической, так и с экономической точки зрения можно судить о величине ежегодной экономии энергоресурсов, а также о повышении энергоэффективности функционирования предприятия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон № 261** «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 г.

2. **ISO 50001:2011.** Energy management systems. Requirements with guidance for use. (ISO 50001:2011 «Системы Энергоменеджмента — Требования и руководство эксплуатации»)

УДК 621.9.02(075.8)

Ю.М. Панкратов

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОРЕЗНЫХ ДОЛБЯКОВ

Характерной особенностью проектирования долбяков для нарезания эвольвентных зубчатых колес является необходимость выполнения проверки семи условий на заострение зубьев долбяка, интерференцию и подрезание ножек шестерни и колеса, срезание вершин зубьев шестерни и колеса. При обычном расчете в случае невыполнения какого-либо из этих условий заново назначают смещение исходного контура и снова выполняют эти проверки [1, 2], что требует большой вычислительной работы: приходится многократно решать трансцендентные уравнения для отыскания углов по их инволютам. Приводимый ниже пример решения этой задачи представляет результаты расчета, в том числе в виде графической картины всех проверок, что позволяет не только выбирать рациональные значения проектных параметров, но и дает возможность визуально оценивать близость или удаленность проектных параметров от их недопустимых значений.

Долбяк представляет корригированное зубчатое колесо, имеющее в общем случае как положительную, так и отрицательную коррекцию, что обусловлено необходимостью обеспечения его заднего угла α_a. Торцевое сечение II–II долбяка (рис. 1) называется исходным (расчетным) сечением, при зацеплении с зубчатыми колесами оно образует нулевую передачу. Расстояние A от переднего торца I–I нового долбяка до исходного сечения называется смещением исходного сечения (контура), которое в общем случае считается положительным смещением. В исходном сечении начальная окружность совпадает с делительной окружностью, а толщина зуба S_0 по дуге делительной окружности, размеры головки h_{a0} и ножки h_{f0} зуба будут равны размерам исходного контура рейки долбяка. Долбяк характеризуется и передним углом γ_a. Переточка долбяка производится по передней поверхности, вследствие чего с каждой переточкой размер A будет уменьшаться. Поэтому для повышения срока службы долбяка стремятся выбрать A как можно большим. Но при этом возрастает опасность заострения зубьев, что приводит к снижению стойкости долбяка. Кроме того, возрастает опасность интерференции зубьев шестерни и колеса, нарезанных этим долбяком.

Таким образом, первая основная задача при проектировании долбяка — выбор приемлемого смещения A исходного сечения. Вторая задача —

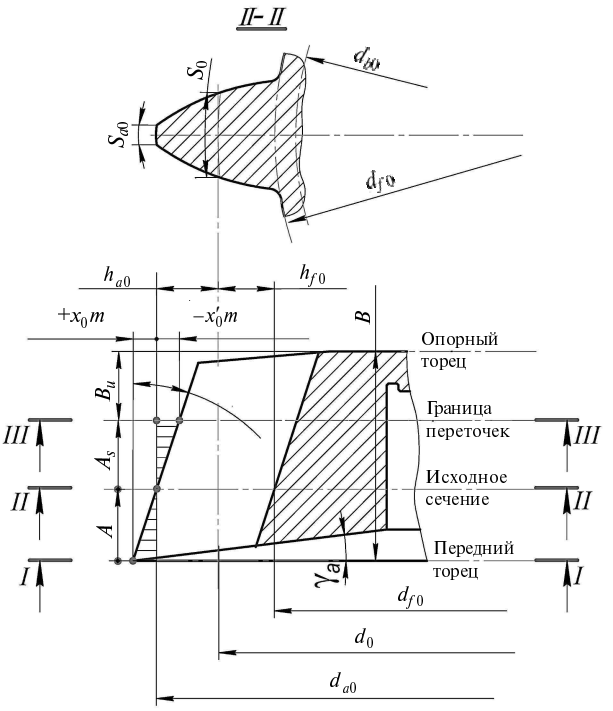


Рис. 1. Расчетная схема долбяка

выбор расстояния A_s от исходного сечения до сечения III–III, являющегося границей допустимых переточек долбяка (см. рис.1.). Поскольку с каждой переточкой диаметральные размеры долбяка уменьшаются, то возрастают опасность срезания боковых сторон у вершины зубьев и опасность подрезания ножек зубьев нарезаемых шестерни и колеса, значит, требуется проверка еще четырех условий.

В большинстве методик [1, 2] решение этих задач производят следующим образом: назначается (или вычисляется по эмпирическим формулам) смещение A исходного сечения и выполняется проверка соблюдения первых трех условий на заострение зубьев долбяка и на отсутствие интерференции зубьев шестерни и колеса. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, значение A корректируют и вновь проверяют все три условия, и так до тех пор, пока все они не будут соблюдены, т. е. действуют по артиллерийскому принципу «перелет — недолет». То же самое повторяется и при назначении расстояния A_s, но теперь уже при проверке четырех условий. Это требует большой вычислительной работы и, главное, в результате такого подбора A и A_s не известно, как далеко мы находимся от границ нарушения этих (уже семи) условий. Между тем, знание границ позволит выбрать рациональные значения A и A_s и в конечном итоге — увеличить общий срок службы долбяка. Приведем пример работы программы по расчету прямозубых дисковых долбяков для нарезания колес внешнего зацепления с модулем $m = 1–12$, в которой вывод всех результатов сделан на экран дисплея, что намного упрощает решение указанных выше задач.

Исходными данными, которые вводятся в диалоговом окне, являются: m — модуль нарезаемой пары зубчатых колес; α — угол профиля исходного контура; h^*_{a0} — коэффициент высоты головки зуба; c^* — коэффициент радиального зазора; Z_1 — число зубьев шестерни; Z_2 — число зубьев колеса, $D_{0\,\text{ном}}$ — номинальный диаметр делительной окружности долбяка; x_1 — коэффициент смещения исходного контура шестерни; x_2 — коэффициент смещения исходного контура колеса; ΔR_{a1} — допустимое срезание боковых сторон у вершины зуба шестерни; ΔRa_2 — допустимое срезание боковых сторон у вершины зуба колеса; WO — вид обработки ($WO = 0$ — черновая; $WO = 1$ — чистовая).

В зависимости от введенного модуля m и номинального диаметра делительной окружности $D_{0\,\text{ном}}$ программа сама выберет из ГОСТ 9323–79, который в нее уже занесен, высоту долбяка B, требуемую в дальнейших расчетах.

Этих данных достаточно, чтобы построить в масштабе осевое сечение зуба долбяка с уже известными задним α_a и передним γ_a углами и высотой B (рис. 2). Слева от долбяка на расстоянии, например, 0,5 B поместим координатную систему, по оси ординат которой будем откладывать смещение A исходного сечения от переднего торца (сечение I–I) долбяка, т. е. нуль отсчета по оси A будет совпадать с передним торцом долбяка.

По оси абсцисс будем откладывать значения проверяемых признаков, которые должны быть больше нуля (не заходить в область отрицательных значений, заштрихованную и отмеченную надписью «Запретная область» — см. рис. 2). В такой координатной системе построим для исходных данных сначала три графика для проверки на заострение зубьев долбяка и отсутствия интерференции шестерни и колеса, нарезанных долбяком, поскольку все эти три показателя зависят от величины смещения исходного сечения A.

Для построения на графике линии признака P_{za0} по заострению достаточно варьировать расстояние A в диапазоне, например, от $A_{\min} = -0{,}6B$ до $A_{\max} = B$ с шагом $\Delta A = 0{,}05B$. Будет построена линия признака P_{za0} (см. рис. 2), которая указана выноской «Заострение». Точка перехода этой линии в область отрицательных значений («Запретная область») и определит максимальное возможное смещение A для данного долбяка. Программа с помощью линейной интерполяции между двумя ближайшими значениями P_{za0} с разными знаками относительно границы запретной области найдет эту точку, пометит ее окружностью с радиусом в 4 пиксела и выноской «A по заострению». Численное значение этой точки будет даже выведено в левом верхнем углу экрана в транспаранте «$A_{\text{заостр}} = \ldots$».

В литературных источниках приводится несколько способов определения начального значения смещения A: от различных эмпирических формул до использования различных графических зависимостей. Наиболее распространенный из них — вычисление коэффициента смещения исходного контура x_0 в зависимости от числа

зубьев Z_0 долбяка по эмпирической формуле $x_0 = 0{,}01(Z_0 - 10)$, которая позволяет вычислить начальное значения смещения как $A = x_0 m/\mathrm{tg}\alpha_a$.

Для сравнения это значение также выведено на графике окружностью с радиусом в 4 пиксела с выноской «Рекоменд. *A*» (см. рис. 2). Как оказалось, эта формула — уж слишком «эмпирическая», поскольку не учитывает всего многообразия возможных сочетаний параметров долбяков, тем более, параметров нарезаемой пары зубчатых колес.

Далее выполняется проверка на отсутствие интерференции зубчатых колес, которая также зависит от смещения *A*. Интерференция представляет наложение эвольвентных профилей зубьев нарезанных колес с переходными кривыми. Зацепление сопряженных зубчатых колес будет правильным, если не будет контакта эвольвентного участка профиля зуба колеса с переходной кривой зуба шестерни и наоборот. Разработаны разные способы проверки на интерференцию, но чаще для нового долбяка исследуют отсутствие интерференции нарезанных им зубчатых колес с помощью проверки соблюдения следующих двух неравенств: для шестерни — $\rho_{12} \geq \rho_{10}$, для колеса — $\rho_{21} \geq \rho_{20}$, где ρ_{12} — радиус кривизны граничной точки профиля зуба шестерни Z_1, необходимый для нормального зацепления с колесом Z_2 (рис. 3); ρ_{21} — радиус кривизны граничной точки профиля зуба колеса Z_2, необходимый для нормального зацепления с шестерней Z_1, (см. рис. 3: если на нем поменять все индексы «2» колеса на индексы «1» для шестерни, а все индексы «1» шестерни — на индексы «2» колеса); ρ_{10} — радиус кривизны граничной точки профиля зуба шестерни Z_1 при нарезании долбяком; ρ_{20} — радиус кривизны граничной точки профиля зуба колеса Z_2 при нарезании долбяком.

Тогда признаки отсутствия интерференции можно записать так:

для шестерни — $P_{u1} = \rho_{12} - \rho_{10} \geq 0$;

для колеса — $P_{u2} = \rho_{21} - \rho_{20} \geq 0$.

Для построения линий признаков P_{u1} и P_{u2} мы также будем варьировать смещение *A*, но поскольку каждому значению *A* соответствует свой коэффициент смещения исходного контура x_0, то для каждого значения *A* его необходимо пересчитывать: $x_0 = \dfrac{A\,\mathrm{tg}\alpha}{m}$.

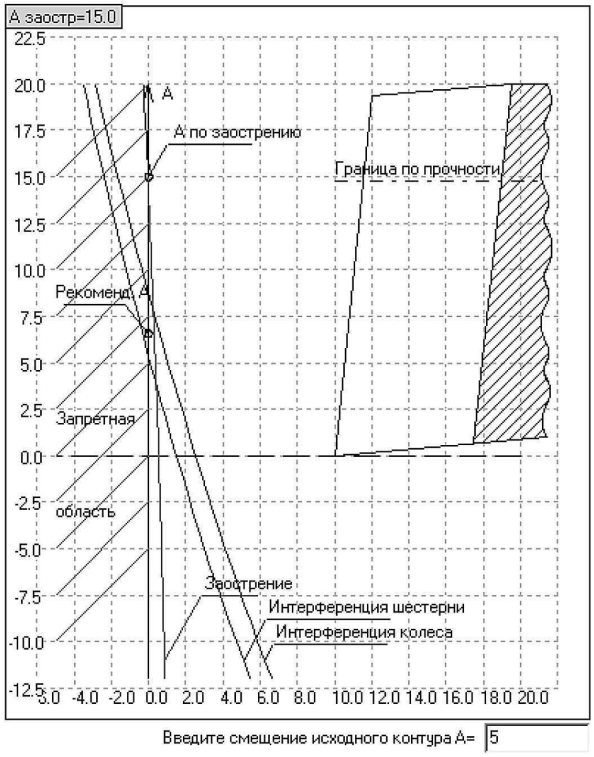


Рис. 2. Проверка долбяка на заострение его зубьев и отсутствие интерференции шестерни и колеса

Линии этих признаков выводят на экран синим цветом и на них указывают выноски «Интерференция шестерни» и «Интерференция колеса» (см. рис. 2). Для нашего примера из трех точек пересечения оси *A* линиями признаков наименьшее значение соответствует линии интер-

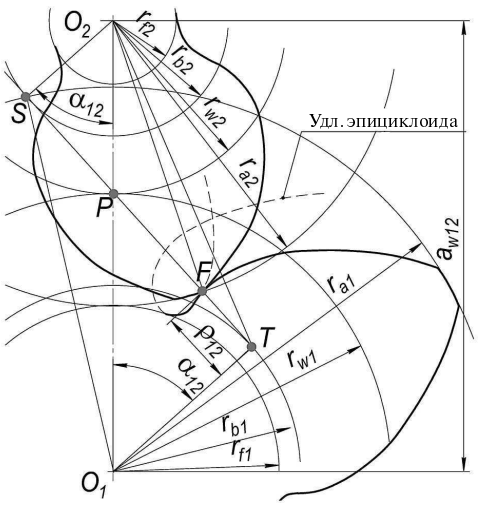


Рис.3. Проверка на интерференцию при зацеплении шестерни и колеса

ференции шестерни P_{u1}. Поэтому на запрос в диалоговом окне «Введите смещение исходного контура A = ...» необходимо вводить наименьшее из этих трех значений и, если это необходимо, даже с некоторым гарантированным запасом по этому признаку. Рекомендуемое формулой значение A для нашего примера оказалось больше значения A, выбираемого по интерференции шестерни, которое оказалось немного больше 5 мм.

После ввода в диалоговое окно значения A = 5 на экране появится новое изображение зуба долбяка (рис. 4), где исходное сечение будет уже смещено относительно переднего торца на введенную величину A. Вместо оси A появится ось A_s, у которой нуль отсчета теперь совпадает с исходным сечением. По этой оси будем откладывать расстояние A_s от исходного сечения до границы допустимых переточек долбяка. Эта граница, допускаемая прочностью долбяка, располагается ниже опорной плоскости на величину B_u, которую для долбяков с модулем m = 1–10 мм определяют как $B_u \approx 3\sqrt{m}$, но не менее 4 мм. На экране она уже изображена штрих-пунктирной линией с надписью «Граница по прочности».

В такой координатной системе и выполняются четыре проверки на несрезание боковых сторон у вершины зубьев шестерни и колеса, а также на неподрезание ножек их зубьев, поскольку все они зависят от A_s. Срезание боковых сторон у вершин зубьев может быть при нарезании долбяком с большим числом зубьев Z_0 колес с малым числом зубьев. Хотя срезание части кромок у головок зубьев и уменьшает коэффициент перекрытия зубчатой передачи, но в некоторых случаях оно допускается, поскольку создает эффект естественного фланкирования, что позволяет уменьшить динамические нагрузки и, следовательно, снизить шум передачи.

На экране будут построены четыре линии этих признаков (для P_{a1} и P_{a2} — красным цветом, для P_{f1} и P_{f2} — синим) с соответствующими выносками (см. рис. 4). По оцифровке оси A_s можно определить границу возможных переточек. Во-первых, она должна располагаться ниже границы переточек по прочности, которая уже выведена на экран раньше. Во-вторых, она должна проходить ниже любой точки пересечения четырех признаков с осью A_s, если такие точки имеются. Если таких точек в пределах

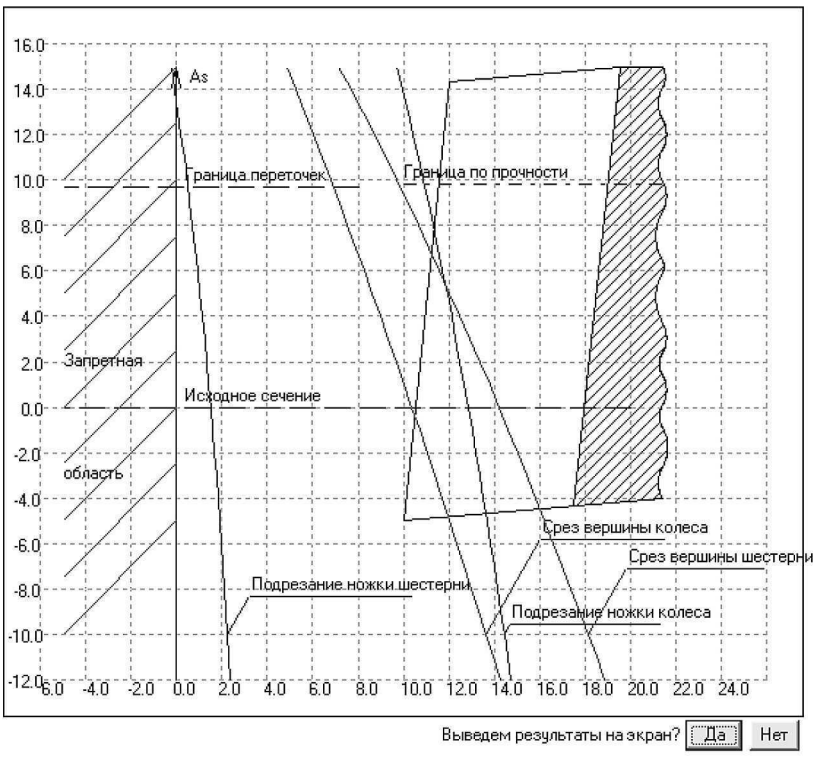


Рис. 4. Проверка долбяка на несрезание боковых сторон у вершины зубьев шестерни и колеса и неподрезание ножек их зубьев

Число зубьев Zo	33,000
Высота долбяка B	20,000
Толщина ступицы B1	10,000
Диаметр отверстия d отв	44,450
Толщина предельно сточенного долбяка Sp	5,300
Диаметр делительной окружности d o	99,000
Вершинный задний угол alfa a (градусы)	6,000
Передний угол gamma a (градусы)	5,000
Диаметр основной окружности d bo	92,928
Расстояние от исходного сечения до торца нового долбяка A	5,000
Высота головки зуба в плоскости переднего торца h tao	4,276
Высота ножки зуба в плоскости переднего торца h tfo	3,224
Толщина зуба по дуге делительной окружности S to	5,098
Диаметр окружности вершин зубьев d tao	107,551
Толщина зуба по окружности выступов S tao	1,260
Расстояние от исходного сечения до торца сточенного долбяка As	9,700
Делительная толщина зуба на передней поверхности S so	5,070
Высота головки зуба на передней поверхности до хорды h ao	4,357
Толщина зуба на передней поверхности по хорде S o	5,067
Минимальная толщина долбяка по прочности Bи	5,196

	град	мин	сек
Профильный угол долбяка на делительном цилиндре alfa o	20	10	15
Боковой задний угол на основном цилиндре alfa бу	2	4	32
Боковой задний угол на делительном цилиндре alfa б	2	12	40
Половина угловой толщины зуба на передней поверхности psi	2	56	2

Выведем на принтер? Да Нет

Рис. 5. Таблица результатов расчета долбяка, выводимая на экран

высоты долбяка до границы по прочности нет, то можно считать, что все четыре признака для данного долбяка и нарезаемой пары колес соблюдаются.

После ввода этой границы в диалоговое окно на запрос «Введите границу переточек $A_s = ...$» на экране появится штриховая линия границы допустимых переточек с надписью «Граница переточек» (см. рис. 4). После утвердительного ответа на диалоговый запрос «Выведем результаты на экран?» будет выведена таблица результатов расчета долбяка (рис. 5), в которую, кроме уже вычисленных значений, будут включены следующие параметры, необходимые для построения чертежа долбяка и его эксплуатации:

делительная толщина зуба на передней поверхности

$$S'_0 = S_0 + 2\left(A - h_{ta0}\mathrm{tg}\gamma_a\right)\mathrm{tg}\alpha_б,$$

половина угловой толщины зуба на передней поверхности (с точностью до 1″) $\psi = S'_0 / d_0$;

высота головки зуба до хорды

$$\overline{h_{a0}} = \frac{2h_{ta0} + d_0(1-\cos\psi)}{2\cos\gamma_a};$$

толщина зуба на передней поверхности по хорде $\overline{S_0} = d_0 \sin\psi$;

толщина предельно сточенного долбяка $S_p = B - A - A_s$;

толщина предельно сточенного долбяка, допускаемая по прочности B_u.

После утвердительного ответа на диалоговый запрос «Выведем на принтер?» результаты будут отпечатаны на принтере.

Построение графических изображений проверяемых признаков, кроме того, что еще раз подтверждает справедливость известного принципа «лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать», позволяет устанавливать смещение исходного контура A и границу допустимых переточек A_s с запасом (или с нарушением, если это допустимо) по тому или иному признаку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Таратынов, О.В.** Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ [Текст] / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков, Ю.П. Тарамыкин [и др.]; Под ред. О.В. Таратынова.— М.: Высшая школа, 1991.— 423 с.

2. Справочник конструктора-инструментальщика [Текст] / Под общ. ред. В.И. Баранчикова.— М.: Машиностроение, 1994.— 560 с.

УДК 621.983.044

С.Ф. Головащенко, А.В. Мамутов, В.С. Мамутов

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА LS-DYNA ДЛЯ РАСЧЕТА КАНАЛА РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ*

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ) изделий из листовых металлов и труб по параметрам точности и предельного формоизменения заготовки обеспечивает показатели, лучшие по сравнению с традиционными способами штамповки. За рубежом ЭГИШ эффективно применяется для изготовления деталей аэрокосмической техники [1], в автомобильной промышленности [2] и для других приложений. Процесс характеризуется преобразованием энергии конденсаторной батареи в энергию плазмы при высоковольтном разряде в жидкости, расширением плазменного канала, распространением импульсного давления в жидкости, деформированием заготовки и ее взаимодействием со штамповочным инструментом. Применение процессов ЭГИШ без предварительного компьютерного моделирования крайне неэффективно и сопряжено с большими материальными потерями.

В одномерной и двумерной постановке задача гидродинамики с учетом деформируемой заготовки и граничных условий на стенке разрядного канала раньше численно решалась дифференциально-разностным методом [3–5]. Перспективно направление компьютерного моделирования ЭГИШ с использованием конечно-элементного комплекса LS-DYNA 971, исходно спроектированного на расчет процессов ударного взаимодействия жидкости с оболочкой. Применительно к ЭГИШ такие расчеты сделаны в работах [6, 7]. Однако в них не рассматривался вопрос формирования плазменного канала в жидкости и граничное условие на стенках канала разряда задавалось приближенно. Цель нашего исследования — разработка модели канала разряда применительно к ЭГИШ в программном комплексе LS-DYNA 971.

Для моделирования канала разряда можно воспользоваться уравнением баланса энергии, согласно которому энергия, выделяющаяся в канале разряда, идет в основном на увеличение внутренней энергии образующейся в нем плазмы и на работу расширения над окружающей жидкостью [8, с. 72]:

$$\frac{d}{dt}\frac{p_k V_k}{\gamma - 1} + V_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \qquad (1)$$

где $\gamma = 1{,}26$ — показатель адиабаты для плазмы, образованной из водопроводной воды; $V_к$ и p_k — объем канала и давление в нем; N — мощность выделения энергии в канале. Авторами работы [8, с. 70–71] показано, что расширение канала за счет тепловых эффектов мало по сравнению с чисто гидродинамическим процессом расширения.

Для оценки корректности моделирования канала разряда в комплексе LS-DYNA 971 выбран экспериментально проверенный в условиях ЭГИШ тестовый численный расчет одномерной цилиндрической задачи гидромеханики. Для отладки модели канала нет необходимости учета взаимодействия жидкости с деформируемой оболочкой. Поэтому расчет осуществлялся приме-

* Исследования проводились в рамках проекта CRDF № RUE2-11043-ST-07

нительно к жесткой цилиндрической камере, на боковой стенке которой можно измерять параметры давления. В качестве исходных данных численного расчета был выбран вариант разряда в цилиндрической камере *2* (рис. 1) с внешним радиусом $R_k = 50$ мм. Разряд осуществлялся при помощи инициирующей проволочки *3* из нихрома длиной $L = 160$ мм и диаметром 0,3 мм. Эксперимент проводился на электрогидроимпульсной установке с емкостью конденсаторной батареи $C = 50$ мкФ и напряжением заряда до 30 кВ (*1*).

Для задания функции мощности выделения электрической энергии в канале разряда $N(t)$ необходимо знать параметры разрядного тока $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$. Разрядный ток измерялся поясом Роговского *5* с интегрирующей R_1C_1 цепочкой *6*. Импульсное напряжение на электродах измерялось при помощи сильноточного малоиндуктивного делителя напряжений *7*. Запуск развертки осциллографа *9* осуществлялся вспомогательным поясом Роговского *4*. В центр боковой стенки разрядной камеры устанавливался мембранный датчик *8*.

Погрешности измерения разрядного тока и импульсного напряжения составляют менее 5 %, а параметры и тарировка мембранного датчика обеспечивают погрешность измерения амплитуды импульсного давления порядка 15 % [3]. Соотношения длины и радиуса разрядной камеры выбраны таким образом, чтобы давление, отраженное от торцов камеры, не влияло на амплитуду давления, измеряемую мембранным датчиком.

Пример измеренных осциллограмм тока и напряжения для тестового варианта при разряде с напряжением заряда конденсаторной батареи $u_0 = 12{,}5$ кВ представлен на рис. 2, *а*.

По кривым тока и напряжения определялась функция мощности $N(t) = u(t)i(t)$, график которой представлен на рис. 2, *б*. Амплитудное значение давления на стенке разрядной камеры для данного варианта разряда составляло 79,5±6,5 МПа с доверительной вероятностью 95 %.

Функция мощности (рис. 2, *б*) вместе с уравнением баланса энергии (1) применялась для задания граничного условия на стенке канала разряда в одномерной тестовой задаче гидромеханики. Рассматривалось движение идеальной сжимаемой жидкости в радиальном направлении, определяемое уравнением движения [9, с. 293]

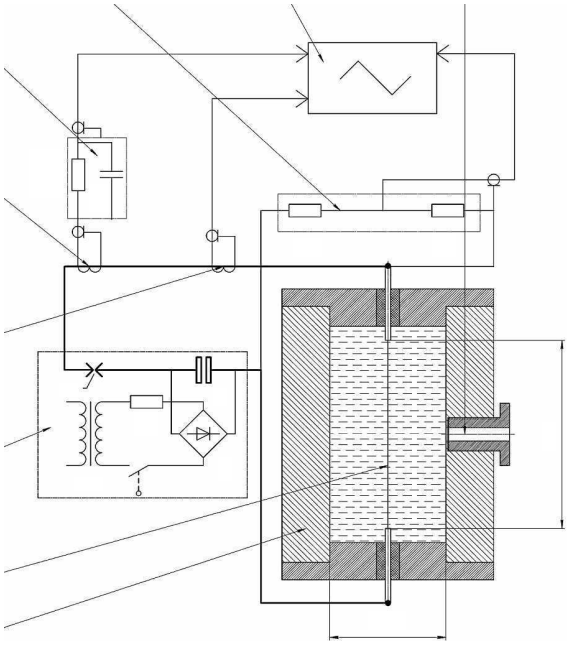


Рис. 1. Схема измерений функции мощности: *1* — электрогидроимпульсная установка (*T* — повышающий трансформатор, *R* — ограничивающее ток сопротивление; *B* — выпрямитель; *C* — конденсаторная батарея; *D* — управляемый разрядник); *2* — цилиндрическая разрядная камера; *3* — инициирующий проводник; *4* — пояс Роговского запускающий развертку осциллографа; *5* — пояс Роговского для измерения импульсного тока; *6* — интегрирующая *RC*-цепочка; *7* — делитель импульсного напряжения; *8* — мембранный датчик; *9* — импульсный осциллограф

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial t} = -\frac{r(r_0,t)}{\rho_0 r_0}\frac{\partial p}{\partial t}, \qquad (2)$$

где t — время, p — давление, r — эйлерова координата точек жидкости, r_0 — лагранжева координата, ρ_0 — начальная плотность жидкости, υ — скорость в радиальном направлении, определяемая соотношением

$$\upsilon = \partial r / \partial t . \qquad (3)$$

Задача решалась в лагранжевой постановке. Поэтому условие сплошности при численном расчете определялось постоянством массы лагранжевой ячейки.

В качестве уравнения состояния жидкости при ЭГИШ обычно используют адиабату Тэта с параметрами для водопроводной воды

$$p = p_0 + B\left[\left(\rho/\rho_0\right)^n - 1\right], \qquad (4)$$

где p_0 — атмосферное давление; ρ — плотность воды; $\rho_0 = 1000$ кг/м^3 — начальная плотность;

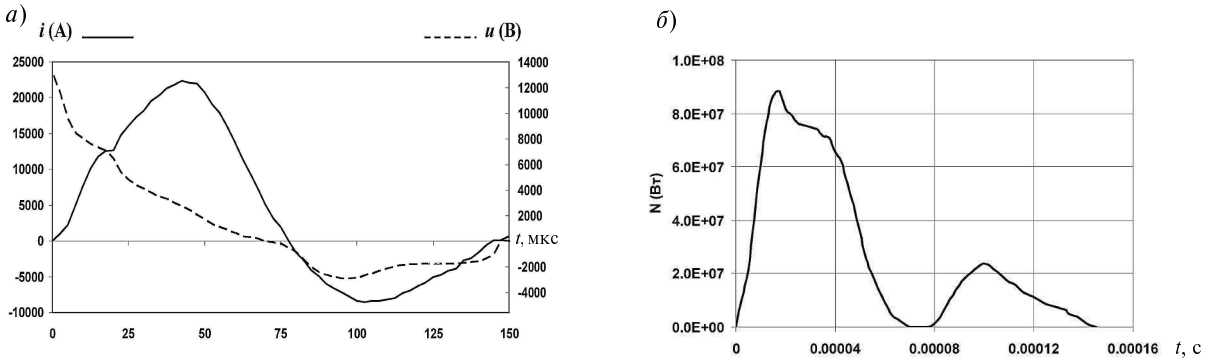


Рис. 2. Оцифрованные осциллограммы (*а*) тока $i(t)$ (*1*), напряжения $u(t)$ (*2*) и рассчитанная кривая мощности $N(t)$ (*б*)

B = 304,7 МПа; n = 7,15. При моделировании воды в комплексе LS-DYNA 971 использовалась модель жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID*, в которой зависимость между плотностью и давлением имеет вид

$$p = -K\ln(\rho_0/\rho), \quad (5)$$

где K — модуль объемного сжатия. Аппроксимация зависимости (4) в пределах $p \in [0{,}1;100]$ МПа дает значение $K \cong 2{,}35$ ГПа.

Для цилиндрического канала разряда длиной L и площадью поперечного сечения S в предположении, что канал сохраняет цилиндрическую форму, уравнение баланса энергии (1) может быть записано в виде

$$\frac{N(t)}{L_1} = \frac{1}{\gamma - 1}\frac{d(p_k S)}{dt} + p_k \frac{dS}{dt}. \quad (6)$$

При определении площади канала $S = \pi r_k^2$ через радиус канала r_k соотношение (6) определяет граничное условие на стенке канала $r_0 = r_{k0}$, где r_{k0} — начальный радиус канала.

Второе граничное условие при $r_0 = R_k$ определяет жесткая граница на стенке цилиндрической камеры (см. рис. 1):

$$r = R_k;\ \upsilon = 0. \quad (7)$$

Тестовая задача одномерной гидромеханики (2)–(7) с нулевыми начальными условиями решалась дифференциально-разностным методом [9] с шагом интегрирования по лагранжевой координате $\Delta r_0 = (R_k - r_{k0})/201$ и с шагом по времени $\Delta t = 5\cdot 10^{-12}$ с. Для реализации граничного условия (6) на каждом временном шаге была организована итерационная процедура по типу Ньютона — Рафсона. Программа численного расчета сделана на языке C^{++}.

Первое слагаемое под знаком дифференциала в выражении (1), определяющее энергию плазмы, может быть преобразовано к виду

$$p_k = (\gamma - 1)(\rho_p/\rho_{p0})E, \quad (8)$$

где E — удельная энергия плазмы в канале разряда, определяемая отношением вводимой энергии к начальному объему канала: $E = E_p/V_0$; ρ_p — плотность плазмы; ρ_{p0} — начальная плотность плазмы. В комплексе LS-DYNA 971 соотношение (8) может быть задано при помощи уравнения состояния *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK* через общее полиномиальное выражение

$$p_k = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E; \quad \mu = \rho_p/\rho_{p0}, \quad (9)$$

если принять $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, а $C_4 = C_5 = \gamma - 1$. При этом в качестве кривой, задающей ввод энергии, следует принять отношение мощности ввода энергии к начальному объему канала: $N^*(t) = N(t)/V_0$.

В качестве модели материала для плазменного канала используется *MAT_NULL*, в карте которой задается начальная плотность плазмы ρ_{p0}, а в качестве модели жидкости — *MAT_ELASTIC_FLUID* с зависимостью (5) между давлением и плотностью жидкости.

При расчете использовалась однослойная модель с 3D элементами и экспоненциальным сгущением сетки вблизи канала разряда (рис. 3, *а*). Начальный радиус канала был принят равным r_{k0} = 1 мм, а начальная плотность плазмы — ρ_{p0} = = 100 кг/м^3. Расчет осуществлялся с использованием алгоритма ALE. Пример расчета давления для элемента с номером 5022, примыкающе-

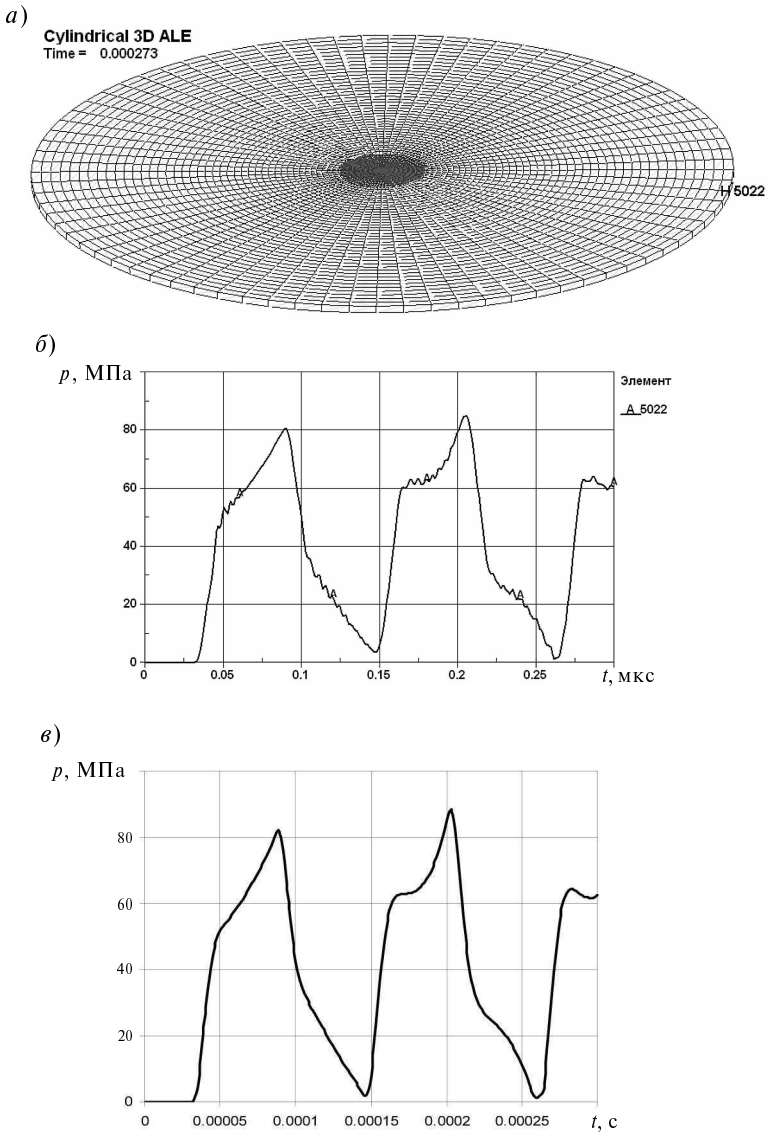


Рис. 3. Результаты численного расчета:

а — однослойная расчетная модель;
б — расчет давления в комплексе LS-DYNA 971; *в* — тестовый расчет

го к неподвижной границе, представлен на рис. 3, *б*. На рис. 3, *в* показаны результаты численного расчета тестовой гидродинамической задачи: давление на стенке камеры в течение двух пульсаций газового канала.

Можно отметить, что в пределах 300 мкс, что характерно для средней продолжительности нагружения заготовки в процессах ЭГИШ, отличие решений находится в пределах погрешностей численного расчета из-за ограниченного числа конечных элементов. Для камер рассматриваемой геометрии и размеров на практике канал разряда не сохраняет свою геометрию и после достижения максимального значения при схлопывании теряет устойчивость и разрушается. Поэтому максимальное экспериментально измеренное давление находится в пределах первой пульсации давления. Видно, что пиковое давление во временных пределах, определяющих цилиндрическую волну, находится в границах доверительного интервала для экспериментально полученного значения.

В расчетах начальный радиус разрядного канала и начальная плотность плазмы задава-

лись достаточно произвольно. Ниже приведена оценка влияния данных параметров на величину пикового давления при первой пульсации газового пузыря.

Величина начального радиуса варьировалась в пределах от радиуса исходной инициирующей проволочки ($r_{k0} = 0{,}15$ мм) до $r_{k0} = 20$ мм. Для оценки влияния начального радиуса принят параметр

$$\gamma_r = [p_{\text{m}}(0{,}15) - p_{\text{m}}(r_{k0})]/p_{\text{m}}(0{,}15),$$

где $p_{\text{m}}(0{,}15)$ — максимальное давление в интервале времени $t \in [0, 150]$ мкс. Результаты численных расчетов так отражают влияние начального радиуса канала:

r_{k0}, мм	γ_r
0,15	1
0,5	0,0099
1	0,0153
2	0,0706
2,5	0,1038
5	0,3102
10	0,6517

Из этих данных видно, что если выбрать начальный радиус канала достаточно малым ($r_{k0} \le 1$ мм), погрешность не превышает 1,5 %. Слишком малая величина радиуса приводит к определенным проблемам вычислений при конечно-элементной разбивке полости плазменного канала.

Величина начальной плотности плазмы варьировалась в интервале $\rho_{p0} \in [10, 10000]$ кг/м^3. Результаты численных расчетов таковы:

ρ_{p0}, кг/м^3	$p_m(\rho_{p0})$, МПа
10	80,72
100	80,88
1000	80,04
10000	80,02

Как видим, величина начальной плотности плазмы практически не влияет на результаты расчета. Следует отметить, что с увеличением ρ_{p0} несколько ухудшается гладкость кривых $p(t)$.

Таким образом, в рамках конечно-элементного комплекса LS-DYNA 971 разработан подход к моделированию канала разряда при расчете процессов электрогидроимпульсной штамповки. Данная методика при известной функции выделения энергии в канале разряда может быть использована для моделирования электрогидроимпульсной штамповки при другой форме канала, а также для определения реальной формы канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тараненко, М.Е.** Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [Текст] / М.Е. Тараненко.— Харьков: ХАИ, 2011.— 272 с.

2. **Golovashchenko, S.** Electrohydraulic Forming of Automotive Panels [Текст] / S. Golovashchenko, V. Mamutov // Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries // Proc. of TMS. San Fran-cisco, 2005.— P. 65–70.

3. **Вагин, В.А.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов [Текст] / В.А. Вагин, Г.Н. Здор, В.С. Мамутов.— Минск: Наука и техника, 1990.– 208 с.

4. **Вагин, В.А.** Особенности математического моделирования процессов электрогидроимпульсной формовки [Текст] / В.А. Вагин, В.С. Мамутов // Сб. «Математическое моделирование в машиностроении». Труды СПбГТУ. № 466.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997.— С. 59–72.

5. **Мамутов, В.С.** Компьютерное моделирование электрогидроимпульсной вытяжки-формовки [Текст] / А.В. Мамутов, В.С. Мамутов, К.И. Поздов, С.М. Тарелкин // Сб.: Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении.— Краматорск: Изд-во Донбасской госуд. машиностроительной академии, 2004.— С. 217–224.

6. **Mamutov, A.V.** Finite element modeling off shells wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal [Текст] / A.V. Mamutov, V.S. Mamutov, S.A. Matveev // International workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPIE.— Bellingham, Wash.— 2004. Vol. 5400-38.— P. 240–243.

7. **Мамутов, В.С.** Компьютерные расчеты листовой электрогидроимпульсной формовки в закрытую матрицу произвольной формы [Текст] / В.С. Мамутов // Матер. VII Междунар. школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред».— Николаев, 2007.— С. 58–60.

8. **Наугольных, К.А.** Электрические разряды в воде [Текст] / К.А. Наугольных, Н.А. Рой.— М: Наука, 1971.— 155 с.

9. **Рихтмайер, Р.** Разностные методы решения краевых задач [Текст] / Р. Рихтмайер, К. Мортон.— М.: Мир, 1972.— 419 с.

УДК 658.512.2.011.56:004

С.К. Лавровский, В.В. Ходак

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ PLM

В области конструкторского проектирования и технологической подготовки производства изделий машиностроения принципы CALS нашли свое отражение в создании программных систем*, обеспечивающих комплексную поддержку этапов жизненного цикла изделия (ЖЦИ) на основе концепции PLM (Product Lifecycle Management).

Согласно ее основным положениям реальные бизнес-процессы отображаются в виртуальной информационной среде, в которой определение продукта представлено в виде полного электронного описания изделия, а среда его создания и среда эксплуатации — в виде систем моделирования соответствующих процессов. Все три составляющие (определение продукта, среда его создания и среда эксплуатации) оказываются взаимосвязаны и непрерывно развиваются на всем протяжении ЖЦИ. К PLM-решениям относятся системы PDM/CAD/CAE/CAM, обладающие высоким уровнем функциональности и информационной интеграции. Они обеспечивают автоматизацию решения задач проектирования и подготовки производства, позволяют организовать работу над проектом в едином информационном пространстве предприятия.

Можно выделить три основных требования к PLM-решениям:

возможность универсального, безопасного и управляемого способа доступа и использования информации, определяющей изделие;

поддержание целостности информации, определяющей изделие, на протяжении всего жизненного цикла изделия;

управление и поддержка бизнес-процессов, реализуемых при создании, распределении и использовании информации.

Применение PLM-технологий позволяет создать качественно новую среду для промышленных предприятий. Успешное развитие бизнеса в современных условиях им обеспечивают системы хранения и управления данными об изделии, настроенные под конкретные производственные условия компании. Установление партнерских отношений с крупными предприятиями подразумевает обмен документацией, инженерными данными, информационными моделями проектов, а также прозрачность процесса выполнения заказа, четкую и отлаженную модель бизнес-процессов.

Вышеперечисленные требования — непременное условие выхода предприятия на мировой рынок. Заключение договоров с зарубежными компаниями предполагает, что исполнитель имеет возможность (обладает технологией и имеет обученный персонал), во-первых, использовать предоставленные электронные модели документов, а во-вторых, обеспечить двустороннее взаимодействие с заказчиком, прозрачность выполнения заказа. Таким образом, PLM представляет собой инструмент по управлению проектированием, производством и взаимодействием с партнерами, клиентами и поставщиками.

PLM-система дает возможность осуществить переход к принципу CPC, что означает совместную разработку, производство и реализацию продукции. В связи с тенденцией постепенного отказа от бумажной документации и перехода к полному электронному описанию изделий (EPD) внедрение PLM-технологий на сегодняшний день объективно служит центральным звеном развития промышленности, условием выхода на мировой уровень.

PLM-система позволяет значительно снизить потери времени на поиск необходимой информации, исключить ее ненужное дублирование, уменьшить вероятность возникновения ошибок и обеспечить их выявление на более ранних стадиях проекта. За счет этого предприятие

---

* **Зильбербург, Л.И.** Информационные технологии в проектировании и производстве [Текст] / Л.И. Зильбербург, В.И. Молочник, Е.И. Яблочников.— СПб: Политехника, 2008.— 304 с.

может увеличить прибыль, повысить качество и конкурентоспособность своих изделий, ускорить процесс вывода на рынок инноваций.

Любая страна, желающая занять лидирующие позиции в мировой экономике, должна стремиться к повышению конкурентоспособности своей продукции, инвестиционной привлекательности предприятий, обеспечению гарантированного уровня качества на всех стадиях жизненного цикла изделий, достижению технологической независимости в наиболее важных областях промышленности, росту производства наукоемкой продукции.

Реализация перечисленных целей возможна только благодаря глубокой модернизации промышленности на основе использования современных достижений науки и техники, новых информационных технологий. При этом должны учитываться основные тенденции развития современного производства, к которым можно отнести следующие:

облик изделия во все большей степени формируется исходя из требований его будущего потребителя. Это относится не только к обеспечению определенного уровня качества в течение срока службы изделия, но и к стоимости владения им;

широко используется кооперация предприятий, при которой основная доля производства приходится на поставщиков, а головные предприятия выполняют финишные операции и окончательную сборку изделия;

создание многих видов продукции происходит в рамках так называемых виртуальных предприятий (под таким предприятием понимается неформальная структура, формируемая географически распределенными независимыми партнерами, объединяемыми на основе информационных технологий посредством компьютерных сетей на время выполнения совместного заказа);

специализация компаний-поставщиков по конструктивному и производственно-технологическому принципу изменяется в сторону системной специализации, при которой предприятие стремится продавать определенную систему (например, пилотажно-навигационный комплекс) целиком независимо от того, как она будет распределена на конечном изделии;

владельцы интеллектуальной собственности на производство изделий конкретной торговой марки (с ограничением по срокам и объемам выпуска) переводят лицензионное производство на территории с благоприятными экономическими условиями;

получает распространение так называемое риск-разделенное партнерство, которое предполагает участие в инвестировании создания продукции не только основного его производителя, но и партнеров — поставщиков, влечет за собой более равномерное распределение рисков (финансовых, технических и пр.), что благоприятно сказывается на финансовых показателях;

прием специалистов на работу осуществляется на контрактной основе на период выполнения работ по конкретному проекту, при этом штат постоянных сотрудников компании имеет тенденцию к уменьшению.

Для предприятий, выполняющих крупномасштабные и наукоемкие проекты, для которых характерны многономенклатурность изделий и длительный цикл разработки, производства и эксплуатации, наиболее актуальна проблема организации совместной работы множества географически удаленных бизнес-партнеров, участвующих в проекте по созданию изделия. При этом необходимо обеспечить интеграцию и совместное использование информации, порождаемой на всех этапах ЖЦИ, в рамках единого информационного пространства. Применение PLM-технологий — стратегическое направление, следуя которому можно обеспечить рост конкурентоспособности выпускаемой продукции и эффективности производства.

Фактически реализации концепции PLM представляет собой внедрение целого комплекса специализированных программных средств (см рисунок):

При выборе программных продуктов для реализации концепции внимание специалиста по внедрению должно быть сосредоточено на выборе решения с оптимальным для предприятия функционалом, в той или иной мере принципы PLM могут быть реализованы и при частичном охвате жизненного цикла изделия.

В приведенной таблице представлены ведущие российские и мировые разработчики PLM-систем.

Класс решения определяет возможности системы по полноценной реализации концепции PLM. Системы Mid-range существенно ограничивают возможности внедрения, так как имеют ряд ограничений на используемые структуры

и типы данных. Hi-end системы позволяют внедрить концепцию на предприятиях любого размера в полном масштабе.

На данной стадии целесообразно также внедрить «пилотный» проект — автоматизировать типовой для предприятия процесс, изучив на нем возможности системы и проведя обучение специалистов. Практически все производители PDM-систем предоставляют возможность опытной эксплуатации в течение 3–5 месяцев, что позволяет провести испытания, не оплачивая стоимость лицензии; обычно в течение этого срока компании-реселлеры проводят обучение специалистов компании.

После выбора PDM-системы и успешного внедрения «пилотного» проекта обычно необходимо адаптировать существующие на предприятии специализированные отраслевые программные продукты для обмена данными с PDM-системой. В связи с тем, что на предприятии может быть накоплен значительный объем информации, адаптация может занять длительное время.

Стадия непосредственного внедрения включает в себя обучение всех связанных с системой специалистов, написание должностных инструкций для конечных пользователей, настройку отчетов в соответствии с принятыми на предприятии стандартами, регламентирование прав доступа к информации различными группами пользователей.

Стандарты в области PLM. Эффективность применения PLM-технологий предполагает обязательное соблюдение всеми участниками

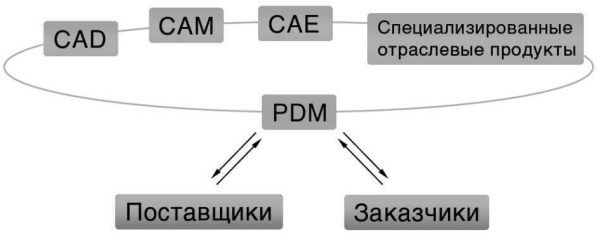


Рис. Состав программного комплекса для реализации концепции PLM

определенных и жестко регламентированных стандартов, принципов, процедур, правил, технических решений. Стандарты и методические материалы в области PLM определяют общий подход, способ представления и интерфейсы доступа к данным различного типа, вопросы защиты информации и ее электронной авторизации (цифровой подписи). В свою очередь, стандарты и методические материалы можно классифицировать по нескольким признакам: целевой аудитории, объекту описания, привязке к той или иной стадии ЖЦИ.

В первом приближении можно выделить следующие основные группы международных стандартов в области PLM-технологий:

стандарты в области системной и программной инженерии;

функциональные стандарты, определяющие процессы и методы формализации данных об изделии и процессах;

информационные стандарты по описанию данных об изделиях и процессах;

Ведущие мировые и российские разработчики PLM-систем

Компания	Класс решения	Компоненты PLM-системы			
		CAD	CAM	CAE	PDM
Dassault Systemes	Hi-end	CATIA			ENOVIA, SmarTeam
	Mid-range	SolidWorks	CAMWorks	Cosmos	PDMWorks
Siemens PLM Software(ранее UGS)	Hi-end	Unigraphics			Teamcenter
	Mid-range	Solid Edge	NX CAM Express	Femap	Teamcenter Express
PTC	Hi-end	Pro/ENGINEER Wildfire			Windchill
Autodesk	Mid-range	Autodesk Inventor	–	–	Vault/Productstream/ Buzzsaw
Аскон	Mid-range	Компас 3D	–	–	Лоцман:PLM
Топ Системы	Mid-range	T-FLEX CAD 3D	T-FLEX ЧПУ	T-FLEX Анализ	T-FLEX DOCs

стандарты информационного обмена, контролирующие носители информации и процессы обмена данными между системами;

стандарты в области защиты информации;

стандарты электронной цифровой подписи;

стандарты в области менеджмента качества (ИСО 9000) и экологического менеджмента (ИСО 14000).

На сегодняшний день действуют более 230 международных стандартов в области PLM, 150 из которых утверждены в 2004 году. Это характеризует динамику развития международной нормативной базы в области PLM-технологий и доказывает востребованность этих стандартов.

В международном масштабе работы по стандартизации в области PLM проводятся в рамках деятельности международной организации по стандартизации в технических комитетах ИСО.

По оценкам экспертов, эффективность производства, реализованного на базе PLM-технологий, примерно на 30–40 % выше эффективности традиционного производства. Внедрение PLM-технологий позволяет обеспечить сокращение:

затрат на разработку и производство наукоемкой продукции — на 20–30 %;

затрат, связанных с браком и устранением дефектов продукции — на 15–20 %;

затрат в период эксплуатации продукции — на 20–25 %;

времени вывода новых образцов продукции на рынок — на 60–70 %.

Мировой рынок полностью отторгает продукцию, не снабженную электронной документацией и не обладающую средствами интегрированной логистической поддержки постпроизводственных стадий ЖЦИ. Сегодня иностранные заказчики отечественной продукции выдвигают требования, удовлетворение которых невозможно без внедрения PLM-технологий:

представление конструкторской и технологической документации в электронной форме;

представление эксплуатационной и ремонтной документации в форме интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР), снабженных иллюстрированными электронными каталогами запасных частей и вспомогательных материалов и средствами дистанционного заказа запчастей и материалов;

организация системы интегрированной логистической поддержки изделий на постпроизводственных стадиях ЖЦИ;

наличие и функционирование электронной системы каталогизации продукции;

наличие на предприятиях соответствующих требованиям стандартов ИСО 9000:2000 систем менеджмента качества и т. д.

Таким образом, задача развития и внедрения PLM-технологий на промышленных предприятиях становится государственной проблемой, от решения которой зависит эффективность развития экономики в целом.

УДК 621.719.048.4

М.Т. Коротких, Л.А. Ушомирская, Н.Б. Кириллов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНО-ДУГОВОГО МЕТОДА

Среди приоритетных областей реализации ключевых многопрофильных технологий существенное влияние на потенциал промышленного производства могут оказать технологии, основанные на электрофизических процессах. Механическая обработка труднообрабатываемых сталей и сплавов не всегда обеспечивает увеличение производительности труда. В связи с этим возникает необходимость использования иных технологических процессов создания размерных заготовок, наиболее производительным из которых сейчас считается метод электроконтактно-

дуговой обработки (ЭКДО), относящийся к методам электроэрозионной обработки. Он имеет и черты методов с использованием концентрированных потоков энергии.

Значительную потребность производства в технологическом процессе разрезания заготовок для изготовления различных деталей обеспечило применение высокопроизводительного метода ЭКДО. Обработке подвергали различные материал — легированные стали, титановые сплавы, высокопрочные сплавы и др. — на различных технологических операциях, к которым относятся: разрезание различных заготовок (например, рельсов в ремонтных условиях); обработка плоских, цилиндрических и конических поверхностей тел вращения; прошивание цилиндрических отверстий, пазов. Использовали различное оборудование, оснащенное специальной оснасткой для ЭКДО, например модернизированный станок модели 4А821М, имеющий следующие технические характеристики:

Мощность установки ЭКДО ..... до 120 кВт
Производительность съема металла ..... до 110 см^2 / мин
Рабочее напряжение ..... 26–32 В
Сила рабочего тока ..... до 2500 А
Диаметр заготовки ..... до 160 мм
Диаметр электрода–инструмента (ЭИ) ..... до 840 мм
Толщина ЭИ ..... 1,2–1,5 мм
Относительный износ ЭИ ..... до 14 %
Шероховатость обработанной поверхности (черновой режим), *Rz* ..... до 170 мм
Зона термического влияния ..... 0,2–0,5 мм

Рабочая зона станка модели 4А821М показана на рис. 1.

В качестве электрода-инструмента рекомендуется применять диск из сталей марок Ст3, Ст5 холоднокатаного проката толщиной 1,2–1,5 мм и диаметром 840 мм. Увеличение толщины диска снижает производительность резания, увеличивает толщину реза, затрудняет его рихтовку и увеличивает нагрузку на двигатель. Диск представлен на рис. 2.

Технологические и электрические параметры электроконтактного резания различных марок материалов приведены в табл. 1.

На основании выполненных исследований разработаны и внедрены ряд установок для электроконтактно-дуговой обработки броней конусов из стали марки 110Г13Л, разрезки рельсов, статической балансировки рабочих колес, для высокопроизводительной обработки пазов, а также для комбинированной электроконтактно-дуговой абразивной обработки (ЭКДАО) стандартных плоских образцов для механических испытаний.



Рис. 1. Рабочая зона станка модели 4А821М

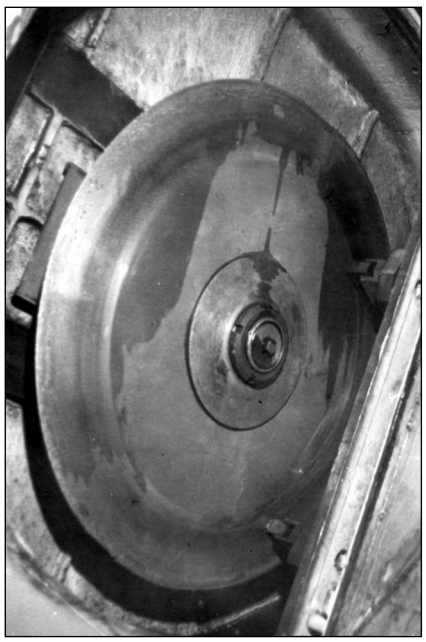


Рис. 2. Электрод-инструмент (диск) толщиной 1,2–1,5 мм для электроконтактно-дуговой резки заготовок

Таблица 1

Результаты электроконтактно-дугового разрезания заготовок различных марок материалов на станке модели 4А821М

Заготовка		Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, А	Время разрезания, с	Производительность, $см^2$/мин	Ширина реза, мм
Марка материала	Диаметр, мм					
ВТ-6	110	28–32	2000	44	135	3,5
12Х18Н10Т	90	28–32	2000	19	200	3,0
ЭИ811	80	28–32	1200	23	130	3,0
ЖС6	160	28–32	1800	100	120	3,5
ДИ-8	65	31–35	2000	27	111	3,5

На предприятиях черной и цветной металлургии широко применяют детали и узлы горного оборудования, изготовленные из высокопрочных сплавов (ЧХ28Н2, ЧХ9Н5, 30Х24Н12СХ и др.). Обработка лезвийным инструментом заготовок из этих материалов сопряжена с большими затратами и износом металлорежущего инструмента. Специалистами научно-производственной фирмы «Квалитет» (г. Усть-Каменогорск) разработаны и внедрены на ряде горно-металлургических предприятий установки ЭКДО, созданные на базе серийного металлорежущего оборудования: токарно-винторезные и токарно-карусельные станки с диаметром планшайб от 1000 до 8000 мм. Установки внедрены на различных предприятиях для размерной обработки деталей из стали марки 110Г13Л (броня конусов дробилок, дробящие плиты, футеровки щековых дробилок, колосники холодильников «Волга-125С» и др.); чугунов ЧХ28Н2, ЧХ9Н5 (детали песковых насосов); деталей, восстановленных наплавлением сормайта (конуса доменных печей); для отрезки прибылей литья из труднообрабатываемых материалов [1].

Основные технические характеристики установок ЭКДО для отрезки прибылей литья и разбалансировки рабочих колес песочных насосов представлены в табл. 2.

Для выполнения получистовых и чистовых операций ($R_a \le 1{,}5$ мкм) изготовления деталей из различных материалов предлагается также высокопроизводительный комбинированный метод электроконтактно-дуговой абразивной обработки. Принципиальная схема этого метода, сочетающего в себе ЭКДО и шлифование, показана на рис. 3 [2].

Таблица 2

Основные технические характеристики установок для ЭКДО

Операции	Технические характеристики					
	Производительность, $см^3$/с	Рабочее напряжение, В	Сила рабочего тока, А	Размеры электрода-инструмента (ЭИ), мм	Относительный износ ЭИ, %	Шероховатость обработанной поверхности, *Rz*, мм
Обработка и отрезка литейных прибылей	до 55	24–42	до 6000	(12–25)×600 (обработка), (2–6)×600 (отрезка)	До 3	$Rz \le 160$ (черновой режим); *Rz*, = 30–40 (чистовой режим),
Разбалансировка рабочих колес песковых насосов:						
исполнение I	< 2,5	< 40–45	3000	35×35×200	< 3,0–3,5	–
исполнение II	< 4,0	< 40–45	5000	35×35×200		–

Электрод-инструмент *1* и абразивный круг *2* закрепляют на общей оправке в шпинделе станка и при вращении комбинированного инструмента производят съем металла с заготовки *3*, перемещающейся с заданной подачей; в качестве рабочей жидкости используют техническую воду с добавками укринола (1 %) и $CaCO_3$ (1 %). Этот метод рекомендован для обработки плоских и цилиндрических поверхностей заготовок.

Конструкция рабочей поверхности электрода-инструмента выполнена прерывистой в виде пластин. Его параметры:

Диаметр инструмента	до 300 мм
Ширина паза	5–6 мм
Количество пазов	20
Угол каждого паза	45°

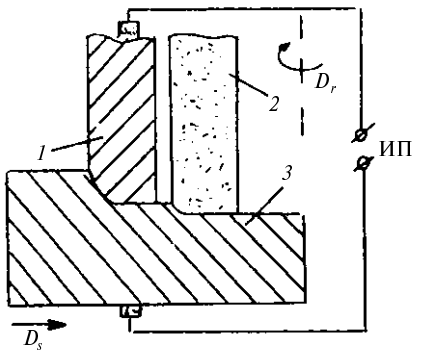


Рис. 3. Принципиальная схема электроконтактно-дуговой абразивной обработки плоскости:
1 — электрод-инструмент; *2* — абразивный инструмент; *3* — заготовка; ИП — источник питания

Минимальная глубина зоны термического влияния, образовавшаяся после обработки электродом-инструментом, $h = 0{,}43$ мм.

Абразивный инструмент может быть сплошным либо сборным, состоящим из отдельных абразивных сегментов. Он полностью удаляет поверхностный слой с измененными свойствами, полученными после ЭКДО, и формирует поверхность в соответствии с требованиями по качеству и точности обработки.

В качестве источника питания применяют многопостовой выпрямитель ВМГ-500 мощностью 317 кВт со ступенчатым регулированием напряжения в диапазоне 30–60 В.

При выполнении черновых и чистовых операций обработки деталей из труднообрабатываемых материалов возможно применение высокопроизводительных методов: электроконтактно-дугового и комбинированного электроконтактно-дугового абразивного. При этом шероховатость обработанной поверхности при черновых операциях составляет Rz = 160–200 мкм, а при чистовых $Rz \le 1{,}5$ мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ушомирская, Л.А.** Технологические аспекты электроконтактно-дуговой абразивной обработки [Текст] / Л.А. Ушомирская // Металлообработка.— 2001. № 1.— С. 41–43.

2. **Карецкий, Ю.Н.** Применение метода электроконтактно-дуговой обработки для отрезки прибылей в литейном производстве [Текст] / Ю.Н. Карецкий, У.С. Сулейманов, Л.А. Ушомирская // Металлообработка.— 2006. № 3.— С. 13–15.

УДК 621.771

А.В. Мамутов, В.С. Мамутов

РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЛЕКСА LS-DYNA

Конечно-элементный (КЭ) комплекс LS-DYNA — универсальный многоцелевой программный комплекс, который может быть эффективно использован для расчета пластического формоизменения листового металла в процессах листовой штамповки [1]. Исходно комплекс разрабатывался и предназначался для расчета высокоскоростных процессов. Поэтому импульсные и динамические расчеты не требуют специальной адаптации при его исполь-

зовании [2]. Для решения квазистатических задач реализуется известный из численных методов математической физики метод установления. Если создать условия, когда волновые процессы и силы инерции не оказывают существенного влияния на процесс деформирования, то можно моделировать процессы квазистатической листовой штамповки. При расчете штамповки в жестких штампах, чтобы получить статическое решение, можно ограничить скорость инструмента величиной 7–10 м/с. При моделировании квазистатической листовой штамповки подвижными средами (полиуретан, жидкость и т. п.) нагрузка определяется некоторым законом давления (линейный или синусоидальный). Существует оптимальная длительность давления, при которой ошибка от влияния волновых и динамических процессов не превышает приемлемого для практических расчетов значения [3].

В статье показаны возможности программного комплекса LS-DYNA для расчета процессов импульсной, квазистатической и комбинированной листовой штамповки подвижными средами, а также показаны особенности задания параметров нагрузки при моделировании штамповки подвижными средами.

Расчет электрогидроимпульсной вытяжки-формовки. Применение LS-DYNA для расчета процесса электрогидроимпульсной листовой штамповки представляется наиболее эффективным использованием данного КЭ комплекса. В качестве примера представлен расчет вытяжки-формовки квадратной (100×100 мм) заготовки в закрытую ступенчатую матрицу. Расчет осуществлялся для латуни Л68 толщиной h_0 = = 0,5 мм в предположении изотропности материала и степенного закона деформационного упрочнения с параметрами B = 740 МПа, m = = 0,45. Упругие константы материала приняты следующие: $E = 1{,}15 \cdot 10^{11}$ Па — модуль Юнга; ν = 0,35– коэффициент Пуассона. Плотность материала задавалась равной ρ = 8300 кг/м^3. Зазор между прижимом и заготовкой оставался в процессе формоизменения заготовки постоянным и равным 0,15 мм. Коэффициент кулоновского трения принят μ = 0,1. Расчет велся для четверти заготовки, так как деформируемая система имеет две плоскости симметрии. Временной закон импульсного давления задавался зависимостью

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta),$$

где p_0 — амплитудное значение давления; θ — характеристическое время, за которое давление уменьшается в e раз; t_m — время нарастания давления. Нормирующие величины N_p, a, b определены соотношениями

$$N_p = \exp[a(1 - \ln(a/b))];$$
$$a = c\,[1 - c\,(1 - \ln c)];$$
$$b = a/c,\ c = t_m/\theta.$$

При расчете были приняты следующие параметры давления: θ = 85 мкс, t_m = 25 мкс. Амплитуда давления варьировалась. Типичная проблема при штамповке такой детали — отскок заготовки от матрицы в центре — достаточно хорошо прогнозируется расчетом (рис. 1).

Комбинированная статико-импульсная вытяжка—формовка тонколистовой заготовки. Комбинирование статического и импульсного нагружения тонколистовой заготовки часто позволяет увеличить степень вытяжки заготовки по сравнению с простым случаем нагружения статической или импульсной нагрузкой. Рассматривается расчет комбинированного многоциклового процесса статико-импульсной вытяжки—формовки тонколистовой заготовки из латуни Л68 толщиной h_0 = 0,5 мм, когда последовательное статическое формоизменение осуществляется жестким пуансоном, а импульсное нагружение — за счет давления, возникающего при электрическом разряде в жидкости. При реализации процесса есть определенные ограничения на степень формоизменения по каждому виду нагружения. Если задать большую степень формоизменения, то за счет сжимающих тангенциальных напряжений при статическом нагружении может начаться складкообразование. На рис. 2 видно начало образования складки в угловой зоне заготовки. Последующее импульсное нагружение может эти складки не разгладить, что приведет к браку детали.

Формоизменения заготовки под действием квазистатической нагрузки подвижными средами. Для оценки сходимости волнового решения к статическому решению рассматривается деформирование тонколистовой заготовки под действием полусинусоидального импульса давления

$$p = p_0 \sin(\pi t/T_0),\ t \le T_0;$$
$$p = 0;\quad t > T_0.$$

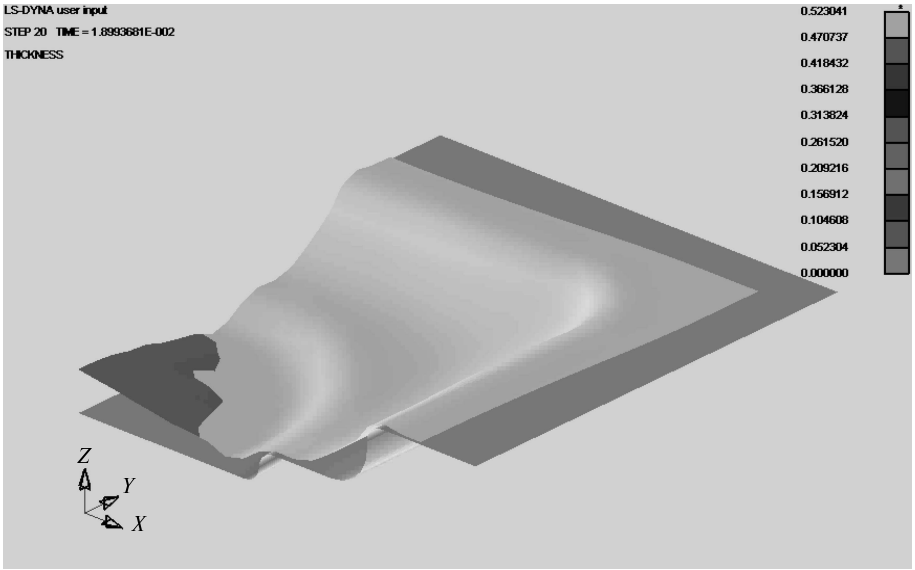


Рис. 1. Расчет высокоскоростного взаимодействия заготовки с матрицей (прижим условно не показан)

Плоская заготовка, закрепленная по круговому контуру, деформируется, не ограниченная рельефом матрицы. Материал заготовки — изотропный со степенным законом упрочнения, определяемым параметрами B и m. Для оценки сходимости приняты два параметра: сходимость в среднем

$$\psi_1 = \left[n^{-1} \sum_{j=1}^{n} \left(\varepsilon_d - \varepsilon_s \right)_j^2 \right]^{0,5} \Big/ \varepsilon_{so} ,$$

и сходимости по максимуму

$$\psi_2 = \max_j \left[abs(\varepsilon_d - \varepsilon_s) / \varepsilon_{so} \right]_j ,$$

где ε_d, ε_s — интенсивности тензора пластических деформаций соответственно при динамическом и при статическом решении для точки заготовки, определенной конечным элементом с номером j; n — общее количество элементов; ε_{so} — среднее значение интенсивности тензора логарифмических деформаций при статическом решении задачи.

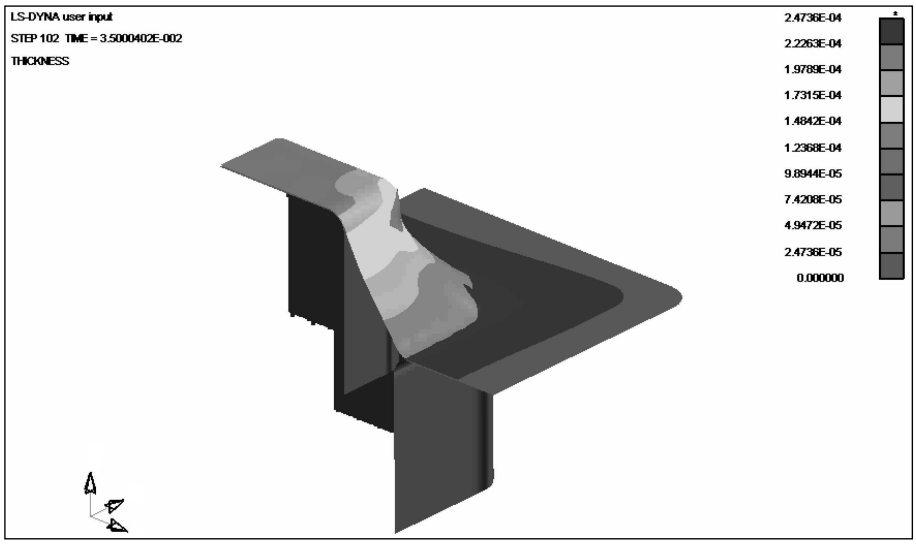
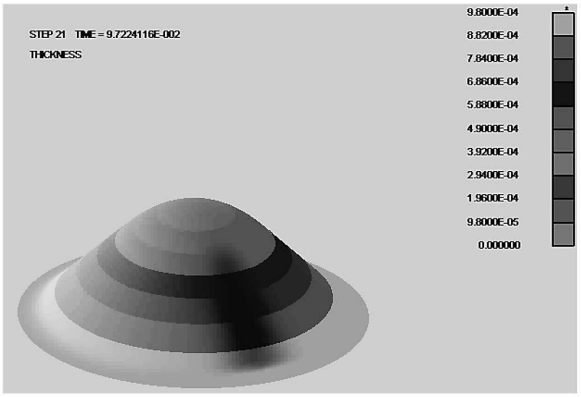


Рис. 2. Начало складкообразования в процессе многоцикловой статико-импульсной вытяжки—формовки

Сходимость динамического решения к статическому решению достаточно хорошо описывается монотонными зависимостями $\psi_1(\eta_1)$ и $\psi_2(\eta_1)$, где η_1 — отношение максимального прогиба к радиусу заготовки, $\eta_1 = y_0/R$; R — радиус контура закрепления; y_0 — максимальный прогиб. Для получения таких зависимостей при фиксированных моментах времени определялись значения относительного прогиба η_1, которому ставились в соответствие значения интенсивности тензора деформаций точек оболочки. В качестве статического решения брался вариант решения, полученный при длительности давления $T_0 = 0{,}1$ с, в котором определялась величина ε_{s0}. Кроме относительного параметра η_1 выбраны также безразмерные параметры, влияющие на зависимости $\psi_1(\eta_1)$ и $\psi_2(\eta_1)$:

$$\eta_2 = T_0(B/\rho)^{0.5}/R; \quad \eta_3 = p_0/p_{0s}(\eta_1);$$

а)



б)

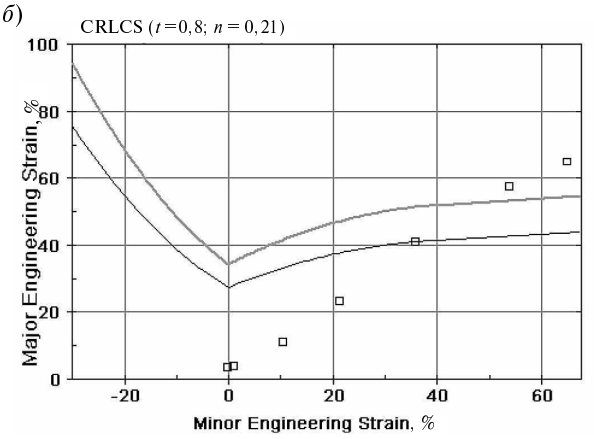


Рис. 3. Квазистатическая вытяжка-формовка в коническую матрицу:

а — заготовка, *б* — диаграмма предельных деформаций в осях «первая главная относительная деформация — вторая главная относительная деформация»

$$\eta_4 = m; \quad \eta_5 = B/E; \quad \eta_6 = \nu.$$

Здесь p_{0s} — давление при статической штамповке, необходимое для достижения относительного прогиба η_1.

Установлено, что при относительном прогибе оболочки больше $\eta_1 \geq 0{,}15$–$0{,}2$, что характерно для формообразующих операций листовой штамповки, и при величинах $\eta_2 > 3$ различие статического и динамического решений по величине интенсивности тензора логарифмических деформаций в среднем и по максимуму становится менее 10 %. Когда значение T_0 соответствует $\eta_2 > 8$–15, различие становится меньше 1–5 %; при выборе $\eta_2 > 10$–20 погрешность расчета, определяемая влиянием динамических эффектов, имеет порядок 1 %. Влияние параметров η_3–η_6 на уровень ошибки существенно ниже, чем влияние первых двух параметров. Данные выводы можно в первом приближении распространить и на заготовку произвольной формы.

Рассмотрим в качестве примера квазистатическую вытяжку—формовку тонколистовой заготовки из алюминиевого сплава в коническую матрицу с углом конуса 45°; радиус заготовки — 55 мм; радиус матрицы — 50 мм. Характеристики материала заготовки задавались следующие: упругие константы — модуль Юнга $E = 7{,}05 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}31$; параметры степенного закона упрочнения — $B = 390$ МПа, $m = 0{,}18$; плотность материала — $\rho = 2700$ кг/м^3. Коэффициент кулоновского трения принят $\mu = 0{,}1$.

Определение параметров давления осуществлялось следующим образом. Согласно рекомендациям, представленным выше, значение параметра безразмерного времени нагружения $\eta_2 = T_0(B/\text{г})^{0{,}5}/R$ должно быть примерно $\eta_2 \geq 10$–20, чтобы обеспечить точность расчета порядка 1 %. Для этого необходимо выполнить условие

$$T_0 \geq (10\text{–}20)\, R/(B/\text{г})^{0{,}5} \cong 0{,}013\text{–}0{,}026 \text{ с}.$$

Поэтому можно выбрать синусоидальный импульс давления длительностью $T_0 = 0{,}025$ с.

Пример квазистатической вытяжки—формовки тонколистовой заготовки в коническую матрицу для момента деформирования, соответствующего относительному прогибу $\eta_1 = 0{,}75$, представлен на рис. 3, *а*. Для прогнозирования разрушения заготовки применялась диаграмма

предельных деформаций (FLD). Отмечены конечные элементы вдоль образующей деформированной заготовки. На рисунке с диаграммой предельных деформаций (рис. 3, *б*) отмеченные точки показаны в виде «р«. Для центральной области заготовки отмеченные точки выходят за критическую кривую FLD. Это предсказывает разрушение, что реально и наблюдалось в эксперименте.

Таким образом, на конкретных примерах показаны возможности КЭ комплекса LS-DYNA для расчета процессов импульсной, квазистатической и комбинированной листовой штамповки подвижными средами. На основе оценки сходимости волнового решения к статическому предложена методика задания параметров давления для расчета процессов листовой штамповки подвижными средами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bradley, N.M.** Implicit Springback Calculation using LS-DYNA [Текст] / N.M. Bradley // Livermore Software Technology Corporation Simulation for the Millennium Southfield.— 5th International LS-DYNA Users Conference.— MI. USA.— September 21–22, 1998.

2. **Mamutov, A.V.** Finite element modeling off shells wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal [Текст] / A.V. Mamutov, V.S. Mamutov, S.A. Matveev // International workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering.— Proc. of SPIE.— Vol. 5400-38.— P. 240–243.— Bellingham, Wash, 2004.

3. **Mamutov, A.V.** Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming Using LS-DYNA Code [Текст] / A.V. Mamutov, V.S. Mamutov // International workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPAS.— 2005. Vol. 9.— P. 72–74. St. Petersburg.

УДК 621.757.002-52

Г.А. Алексеев

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

Применение большинства средств измерений и определение их метрологических характеристик невозможно без использования изделий, на поверхности которых нанесены различного рода штрихи, отсчетные линии, риски, знаки и т. п., т. е. прецизионный регулярный микрорельеф (ПРМ), как правило, метрологического, оптического или спектроскопического назначения. Термин «прецизионный регулярный микрорельеф» здесь и далее означает, что речь идет о номинальных размерах, характеризующих микрогеометрию поверхности, сравнимых с длиной волны видимого диапазона. Проблема обеспечения и контроля качества образования прецизионного регулярного микрорельефа обусловлена наличием номинальных размеров микронеровностей, находящихся вне пределов разрешающей способности оптических средств измерений, так как ПРМ в определенных случаях представляет собой поверхностную наноструктуру. Другая особенность заключается в жестких требованиях к точности выполнения геометрических параметров ПРМ, обусловленных спецификой назначения соответствующих изделий, и к допустимой наноразмерной погрешности измерений линейных размеров. Так, например, размеры микрорельефа по высоте могут изменяться от 127 до 42,5 нм с увеличением плотности штрихов дифракционных решеток от 1200 до 3600 на один мм, а относительная погрешность должна находиться в пределах 10^{-2}–10^{-5}. Соответственно, абсолютные допустимые отклонения могут выходить за рамки существующих квалитетов ISO, а расстояния между штрихами — за рамки шаговых параметров шероховатости.

К изделиям, на поверхности которых образуется ПРМ, относятся штриховые меры, шкалы, сетки, лимбы, дифракционные решетки,

миры, испытательные тесты, меры шероховатости, различного рода кодирующие меры линейного и углового перемещения и другие подобные им, во многом определяющие точность измерений. Требования, предъявляемые к качеству формообразования ПРМ, к точности его расположения и размерам, к точности выполнения профиля и его постоянству по всей поверхности, к гладкости и зеркальности граней, — весьма жесткие, находящиеся в некоторых случаях на грани технологических возможностей современного оборудования. Эти требования, определяемые спецификой назначения соответствующих изделий, принципиально отличаются от требований к качеству поверхности и к точности выполнения размеров и формы микрогеометрии при других видах механической обработки. Они возрастают с повышением точности измерений и качеством выпускаемых изделий и обусловливают существенные особенности формирования ПРМ как особого вида специальной механической обработки.

Для выполнения требований к качеству ПРМ необходимо создать специальные условия его образования, которые следуют из анализа процесса формообразования во взаимосвязи с точностью изготовления алмазного прецизионного инструмента и с учетом влияния статической и кинематической ориентации. Это невозможно без создания методов и средств контроля качества образования ПРМ.

Создание ПРМ отличается от других видов прецизионной механической обработки рядом характерных технологических особенностей, среди которых следует отметить:

разделение функций резцового (формообразование штриха) и делительного (позиционирование заготовки) механизмов делительной машины в процессе автоматизированного образования ПРМ;

необходимость обеспечения особых условий для стабилизации инструмента в процессе образования ПРМ при относительно малых технологических нагрузках по сравнению с жесткостью привода и особой чувствительности динамической системы резцового механизма к возмущающим воздействиям;

необходимость тщательного анализа качества используемых слоев и заготовок с целью выбора и обеспечения оптимальных механических, отражающих и других свойств, в значительной мере определяющих качество образования ПРМ;

необходимость особой износостойкости инструмента, используемого для образования ПРМ, что обусловлено жесткими требованиями к постоянству формы и размеров микрогеометрии с одновременным обеспечением стабильности работы машины в течение длительного времени без вмешательства оператора в автоматическом режиме;

существенную зависимость качества образования ПРМ от точности формы рабочей части инструмента, используемого для нанесения микрогеометрии, и точности ее ориентации относительно заготовки;

специфику обеспечения качества ПРМ, обусловленную тем, что номинальные размеры могут находиться в пределах упругих деформаций элементов оборудования, и ряд других.

Механическое образование ПРМ может осуществляться различными способами: профилированием, вырезанием, совместным их воздействием, удалением покрытий (гравированием), а также выдавливанием.

При профилировании образование штриха осуществляется резцами в виде лодочки, большей частью несмметричной. При этом процессе материал претерпевает сложную пластическую деформацию, выдавливается и сдвигается в направлении, перпендикулярном движению резца.

При гравировании штрихи и знаки образуются удалением слоя металла, лака или грунта со стеклянных заготовок либо металлического покрытия с последующим травлением или без него.

При совместном вырезании и профилировании резец имеет переднюю грань, которая снимает стружку на определенную глубину штриха, а остальная рабочая часть, имеющая форму «лодочки», выдавливает шрих до заданной глубины. В некоторых случаях короткие отдельные штрихи выдавливаются симметричными клиновидными инденторами. Получение отпечатка индентора в процессе определения микротвердости вдавливанием также можно рассматривать как один из видов образования микрорельефа метрологического назначения.

Следует отметить, что для каждого вида образования микрорельефа технология, оборудование и инструмент имеют свою специфику. Так, проблема изготовления дифракционных решеток

заключается в том, что на плоской или сферической стеклянной поверхности, которая обычно покрыта тонким отражающим металлическим слоем, полученным испарением в вакууме, требуется образовать систему большого числа (до 3600 на 1 мм) строго параллельных штрихов ступенчатого профиля. При этом необходимо обеспечить высокую точность расстояния между штрихами (например, для решетки, имеющей 1200 штр./мм расстояние между шрихами равно 0,83 ± λ/40 мкм, где λ — средняя длина волны спектрального интервала), оптическую зеркальность рабочей грани профилируемых штрихов, а также постоянство профиля и глубины штриха. Требования к точности расположения и форме микрорельефа других из перечисленных изделий ниже, чем соответствующие требования при изготовлении штрихов дифракционных решеток. Несмотря на это, требования к образованию микрорельефа этих изделий достаточно жестки и обусловлены спецификой их назначения. Так, штрихи испытательных таблиц не должны иметь отклонений по ширине, глубине и длине штриха от номинальных размеров более ±5 %, прозрачность штриха должна составлять не менее 97–99 %, края штрихов должны быть ровными и обеспечивать хорошую контрастность между прозрачными и непрозрачными интервалами, неравномерность краев допускается не более 0,001 мм, отклонения углов таблиц от номинальных значений не должны превышать ±1,0 %.

На качество прецизионного микрорельефа влияет большое количество факторов, среди которых в зависимости от назначения ПРМ ранее были выделены три наиболее существенные группы. При формообразовании микрорельефа с различной геометрией выбором параметров этих групп следует обеспечить стабилизацию процесса на основе синтеза координатной, скоростной и инерционной связанностей как линейного, так и нелинейного характера.

В резцовом устройстве делительной машины имеет место связанность колебаний, обусловленная как его конструктивными особенностями, так и взаимодействием инструмента с заготовкой. Конструктивная связанность включает инерционную, скоростную и координатную. Несмотря на то, что эти связанности не вызывают неустойчивых режимов, они приводят к колебаниям резцедержателя, которые вызваны колебаниями резцовой балки при отклонениях ее от равновесного положения под воздействием возмущений, идущих от привода и от внешних источников. Поэтому они должны быть по возможности устранены или сведены к минимуму. Полностью устранить конструктивную связанность не представляется возможным, т. к. для этого необходимо, чтобы угол q_0 наклона прямой, соединяющей ось подвеса качающейся части суппорта и вершину резца к плоскости заготовки в положении равновесия, был равен нулю. По конструктивным соображениям (ось подвеса находится над заготовкой) это невозможно. Уменьшить конструктивную связанность можно, сводя к минимуму угол q_0, жесткость пружин подвеса c_φ, уменьшая до определенного значения жидкостного трения в демпфере резцедержателя и размещая центр масс на прямой, соединяющей ось подвеса с вершиной резца.

Анализ степени связанности показывает, что как координатная, так и скоростная связанности по конструкции могут быть уменьшены до допустимых значений путем сочетания конструктивных параметров. Вследствие взаимодействия резца с заготовкой возникают координатная и скоростная связанности, обусловленные процессом формообразования. Координатная связанность в данном случае — наиболее сильная, вызванная ею неустойчивость не может быть компенсирована демпфированием и другими видами связанностей.

Следует отметить, что степень связанности по процессу значительно превышает степень связанности по конструкции. Поэтому для стабилизации процессов образования прецизионного регулярного микрорельефа в первую очередь необходимо обеспечить устойчивость динамической системы резцового устройства при наличии координатной связанности. Линейная координатная связанность, определяемая неконсервативными позиционными силами, возникающими вследствие взаимодействия инструмента с заготовкой, характеризуется матрицей коэффициентов c_{ij}:

$$c_{11} = \frac{c_\varphi}{j}\left\{\left[\frac{\partial F_z}{\partial c}\cos q_0 + \frac{\partial F_x}{\partial c}\sin q_0\right] l\cos q_0 + \right.$$

$$\left. + \left[\frac{\partial F_z}{\partial q}\cos q_0 + \frac{\partial F_x}{\partial q}\sin q_0\right]\right\}\frac{l}{j};$$

$$c_{12} = \frac{c_\varphi}{j}\left\{\left[\frac{\partial F_z}{\partial c}\cos q_0 + \frac{\partial F_x}{\partial c}\sin q_0\right]\times\right.$$

$$\left.\times\, l\cos q_0 + \frac{c_\varphi}{l}\right\}\frac{1}{j};$$

$$c_{21} = \frac{c_\varphi}{j}\left\{\left[\frac{\partial F_z}{\partial c}\sin q_0 + \frac{\partial F_x}{\partial c}\cos q_0\right] l + \right.$$

$$\left. + \frac{c_\varphi}{l}\right\}\frac{1}{M}\sin q_0;$$

$$c_{22} = \left\{c_x - \left[\frac{\partial F_z}{\partial c}\sin q_0 + \frac{\partial F_x}{\partial c}\cos q_0\right]\sin q_0\right\}\frac{1}{M}.$$

Поэтому можно изменять линейную координатную связанность за счет выбора таких параметров, как момент качающейся части суппорта и ее масса, масса резцовой балки, расстояние от оси подвеса качающейся части до оси резца и угол ее наклона к плоскости заготовки в положении равновесия, жесткость пружин подвеса качающейся части суппорта и жесткость соединения резцовой балки с приводом, форма резца и механические свойства заготовки. Динамическая система резцового механизма устойчива по линейной координатной связанности для любого соотношения параметров в том случае, если параметр неконсервативности д положителен[*]. Для этого необходимо выполнение условия

$$\beta' < q_0,$$

где $\beta' = \operatorname{arctg}\dfrac{\dfrac{\partial F_x}{\partial c}}{\dfrac{\partial F_x}{\partial c} + \dfrac{c_\varphi}{l^2}}$.

Из этого условия следует, что его целесообразно использовать при выборе параметров, определяющих процесс образования прецизионного микрорельефа профилированием бицилиндрическими и биконическими резцами, удалением слоя, комбинированными методами (вырезание — профилирование; вырезанием с применением упора), т. е. в тех случаях, когда угол между направлением вектора производной от силы, действующей на резец по глубине штриха, и плоскостью заготовки мал. Уменьшение этого угла достигается следующими способами: в случае применения бицилиндрических и биконических резцов увеличением радиуса кривизны лезвия; в случае удаления слоя — за счет выбора соответствующего коэффициента трения между резцом и подложкой; при комбинированном методе «вырезание — профилирование» — путем увеличения доли общей глубины штриха, образуемой пластическим деформированием; при вырезании в резцовом устройстве делительной машины — за счет изменения соотношения между силами, действующими на резец и на упор в процессе образования прецизионного микрорельефа.

Условие устойчивости невозмущенной системы в случае образования микрорельефа удалением слоя имеет вид

$$\mu_y < \operatorname{tg} q_0,$$

где μ_y — коэффициент трения между резцом и заготовкой.

В случаях применения пирамидальных резцов при профилировании, а также при образовании микрорельефа вырезанием параметр неконсервативности может быть отрицательным, и для устойчивости по координатной связанности, обусловленной процессом формообразования, необходимо выполнить условие устойчивости, в соответствии с которым существуют верхняя и нижняя границы устойчивости. Существенный момент: конструктивная связанность, определяемая при $c_0 = 0$, мала за счет того, что парциальная частота колебаний резцедержателя значительно больше парциальной частоты колебаний резцовой балки. Поэтому при уменьшении c_0 парциальная частота резцедержателя уменьшается и связанность возрастает, что требует соответственного уменьшения жесткости пружин подвеса и коэффициента жидкостного трения в демпфере резцедержателя при одном и том же угле q_0.

Инерционная связанность может быть устранена соответствующим расположением центра масс качающейся части суппорта. Координатная связанность, обусловленная конструкцией резцового устройства, не может быть полностью устранена. Она может быть сведена к минимуму за счет уменьшения жесткости подвеса и угла q_0. Из зависимости коэффициентов b_{ij} от параметров системы следует, что демпфирование резцедержателя и демпфирование в направляющих резцовой бал-

[*] **Алексеев, Г.А.** Динамика нанесения прецизионного микрорельефа [Текст] / Г.А. Алексеев. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1986.

ки обусловливают наличие конструктивной скоростной связанности в динамической системе резцового устройства, которая существует при наличии конструктивной координатной связанности. С увеличением как демпфирования резцедержателя, так и демпфирования в направляющих резцовой балки при заданной конструктивной координатной связанности скоростная связанность увеличивается. При заданных демпфированиях резцедержателя и в направляющих резцовой балки с увеличением конструктивной координатной связанности влияние скоростной координатной связанности возрастает.

Производя динамический синтез стационарной скоростной связанности при наличии координатной, следует учитывать три фактора: демпфирование по обобщенным координатам, конструктивную скоростную связанность и скоростную связанность, обусловленную взаимодействием резца с заготовкой. Характер влияния этих факторов определяется характером координатной связанности. Применительно к резцовому механизму делительной машины такими факторами являются: демпфирование резцедержателя $\mu_д$, демпфирование в направляющих резцовой балки $\mu_ч$ и зависимость коэффициентов b_{ij} от производных силы, действующей на резец по углу ψ, определяющему ориентацию резца относительно заготовки и по скорости движения резцовой балки V. Коэффициенты b_{ij}, характеризующие линейную скоростную связанность и демпфирование, можно представить в виде

$$b_{11} = \mu_д b^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial \psi}\frac{\cos q_0}{V} - \frac{\partial P}{\partial V}\sin q_0\right] l^2 \cos(\beta - q_0);$$

$$b_{12} = \mu_д b^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial \psi}\frac{\sin q_0}{V} - \frac{\partial P}{\partial V}\cos q_0\right]\cos(\beta - q_0) - \mu_д b^2 + \frac{\sin q_0}{l};$$

$$b_{21} = -\left[\frac{\partial P}{\partial \psi}\frac{\cos q_0}{V} - \frac{\partial P}{\partial V}\sin q_0\right] l^2 \sin(\beta - q_0) - \mu_д b^2 + \frac{\sin q_0}{l};$$

$$b_{22} = \mu_д + \left[\frac{\partial P}{\partial \psi}\frac{\sin q_0}{V} - \frac{\partial P}{\partial V}\cos q_0\right] l^2 \cos(\beta - q_0).$$

Зависимости коэффициентов b_{ij}, позволяют проследить влияние отдельных факторов на колебания резца в процессе образования ПРМ.

Таким образом, качество формообразования прецизионного регулярного микрорельефа в резцовом устройстве динамической машины достигается созданием взаимосвязанных условий, обеспечивающих стабилизацию процесса пластического деформирования материала заготовки; ограничения возмущающих воздействий; постоянство глубины и профиля формирующего микрорельефа на всей заштрихованной поверхности в очень жестких границах, обусловленных спектральными и другими характеристиками изделий. Теоретические и экспериментальные исследования процесса образования ПРМ позволяют: выявить основные факторы, влияющие на качество результата; определить их допустимые значения для каждого вида формирования ПРМ; разработать методики обеспечения качества ПРМ путем создания специальных условий его образования (к ним относятся: точностные требования к изготовлению и ориентации в процессе эксплуатации бицилиндрических, биконических, пирамидальных и других алмазных монокристальных резцов; усилия, действующие в процессе формирования ПРМ; условия и технологические режимы образования ПРМ профилированием, удалением покрытий и другими методами). Делительная машина работает без вмешательства оператора в течение длительного времени (до десяти и более суток при изготовлении сложных изделий) в автоматическом режиме, и возможный брак обнаруживается уже после окончания работы. Поэтому особое значение имеет предварительный контроль параметров, характеризующих процесс образования ПРМ, и диагностика стабильности работы механизмов делительной машины. К основным условиям, которые целесообразно предварительно контролировать, относятся в первую очередь следующие требования (см. таблицу):

к виброзащите делительных машин, включая ограничения значения скорости колебания основания делительной машины в вертикальном направлении V_{KZ}, в направлении подачи делительной каретки V_{KY}, в направлении движения резцовой балки V_{KX};

к параметрам резцовых устройств и условиям образования штрихов, включая ограничения на угол наклона качающейся части суппорта, минимальную глубину штриха, жесткость привода, положение центра масс качающейся части суппорта и коэффициент трения в демпфере резцедержателя;

Требования к параметрам, характеризующим процесс образования ПРМ

Характеристика, ед. измерения	Условие—ограничение характеристики	Граничное значение характеристики при плотности, штр/мм	
		1200	2400
Требования к виброзащите делительных машин			
Скорость V_{KZ} колебаний в направлении оси OZ, мм/с	$V_{KZ\,\text{доп}} \le \frac{2\Delta C_{\text{доп}} Jw}{mX_C l}$	$2{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$
Скорость V_{KY} колебаний в направлении оси OY, мм/с	$V_{KY\,\text{доп}} \le \frac{JVw^2}{F'_{Z\varphi} l^2} C_{\text{доп}}$	$3{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$
Скорость V_{KX} колебаний в направлении оси OX, мм/с	$V_{KX\,\text{доп}} \le \frac{2\Delta C_{\text{доп}} Jw}{mZ_C l}$	$6{,}0\cdot10^{-2}$	$3{,}0\cdot10^{-2}$
Параметры резцового устройства и условия образования штрихов			
Минимальная глубина $C_{\min}$ штриха, мкм	$C_0 > C_{\min}$	0,0128	0,0180
Угол q_0 наклона качающейся части суппорта, рад	$\text{tg}q_0 \ge \frac{F'_{XC}}{F'_{ZC} + C\varphi / l^2}$	0,0175	0,0175
Жесткость C_x привода, Н/м	$C_{X\,\text{доп}} \le C\varphi MJ^{-1}$	128	128
Отношение координат (X_C, Z_C) центра масс качающейся части	$\frac{x_C}{z_C} \le \text{tg}q_0$	0,0175	0,0175
Демпфирование М резцедержателя, Нс/м	$M_{\text{доп}} \le \frac{1}{b^2}\sqrt{JC_\varphi}$	0,33	0,33
Параметры резцов. Погрешности формы и ориентации.			
Погрешность установки φ, рад	$\varphi_{\text{доп}} \le \sqrt{2B\text{ctg}\beta\Delta C_{\text{доп}}}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	$1{,}1\cdot10^{-5}$
Прогиб проекции лезвия f, мкм	$f_{\text{доп}} \le \varphi_{\text{доп}} B^{-1/2} C_0^{1/2}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$0{,}5\cdot10^{-2}$
Радиус притупления лезвия, мкм	$r_{\text{доп}} \le \Delta C_{\text{доп}} \sin^{-1}\alpha$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$0{,}5\cdot10^{-2}$
Высота $R_{Z\max}$ микронеровностей, мкм	$R_{Z\,\text{доп}} \le 10\Delta C_{\text{доп}}$	$1\cdot10^{-3}$	$0{,}5\cdot10^{-3}$
Износостойкость лезвия $M^{\text{из}}$, Г/(мм^2·с)	$M_{\text{из доп}} \ge AV_{\text{п}} Q_{\text{доп}} L^{-1} P_p^{-1}$	$5{,}25\cdot10^{-8}$	$1{,}31\cdot10^{-8}$

к параметрам инструмента, погрешности формы и ориентации, в их числе ограничения на погрешность установки лезвия резца в направлении профилирования, на искривление проекции лезвия резца в направлении профилирования, на искривление проекции лезвия резца на плоскость заготовки, на радиус притупления лезвия, максимальную высоту микронеровностей граней и износостойкость лезвия;

к механическим свойствам материала заготовок, включая ограничения по диапазонам изменения микротвердости, пластичности, степени упрочнения и степени упругого восстановления.

В таблице обозначены: C_0 — глубина штриха; $\Delta C_{\text{доп}}$ — допустимое отклонение глубины штриха, определяемое из допустимых пределов изменения спектральных характеристик дифракционной решетки; J — момент инерции неуравновешенной массы качающейся части суппорта; l, $l_{\text{ц}}$ — расстояние от оси резца до оси подвеса и до центра масс качающегося части суппорта; $C_{\min}$ — минимальная глубина штриха, превышение которой обеспечивает стабилизацию процесса его образования, определяется по зависимости $C_{\min} = \frac{4BV_{\max}^2}{F'_{ZC} l^2}$; $V_{\max}$ — максималь-

ное значение скорости резца; F_z — вертикальная составляющая силы, действующей на резец; B — расстояние от оси подвеса до демпфера; $B = \frac{R_1 \sin\alpha + R_2 \sin\beta}{2R_1 R_2 \cos\alpha \cos\beta(\mathrm{tg}\alpha + \mathrm{tg}\beta)}$ — для бицилиндрических, $B = \frac{1}{R}$ — для биконических резцов; C_φ — жесткость пружины подвеса качающейся части; M — масса резцовой балки; f — прогиб проекции лезвия резца на жесткость заготовки, определяемый в зависимости от погрешностей изготовления; r — радиус притупления лезвия резца; R_z — максимальная высота микронеровностей на рабочей поверхности резца; d_1 — длина отпечатка основного лезвия трехлезвенного индентора; d_2 — длина отпечатка соответствующих вспомогательных лезвий; $H_{упр}$ — микротвердость упрочненного материала; $\Delta\alpha$ — отклонение угла профиля от соответствующего угла резца, обусловленное упругим восстановлением; $Q_{доп}$ — допустимый износ, определяемый по спектральным характеристикам решетки; L — суммарная протяженность штрихов решетки; $P_р$ — давление на рабочей поверхности резца, действующее в процессе образования штриха; $V_п$ — линейная скорость планшайбы при определении нестойкости лезвия в процессе его заточки; A — постоянный коэффициент, зависящий от материала заготовки.

При расчете требований к характеристикам процесса образования ПРМ ориентировались на следующие диапазоны механических свойств материала заготовок:

Микротвердость H, Н/мм^2	400–2000
Пластичность d_2/d_1	0,4–0,7
Степень упрочнения $H_{УПР}/H$	1,2–1,5
Упругое восстановление $\Delta\alpha/\alpha$	0,1–0,2

Приведенные в таблице допустимые значения параметров определены для дифракционной решетки 100×100 мм с углами профиля $\alpha = 10°$; $\beta = 50°$; $H = 1000$ Н/мм^2; для бицилиндрических резцов с R = 2 мм; $J = 6{,}81 \cdot 10^{-5}$ кг/м^2; M = = 0,875 кг; $C_\varphi = 0{,}01$ Нм/рад; $b = 0{,}05$ м; $l = 0{,}075$ м; $V_п = 15$ м/с; $A = 140$; $\Delta\alpha = \pm 5$ %; $m = 0{,}02$ кг.

Механическое образование ПРМ характеризуется тем, что как номинальные размеры, так и допустимые отклонения могут находиться в нанометровом диапазоне, вне разрешающей способности оптических средств измерений, и является особым видом специальной механической обработки. Для обеспечения качества этого процесса необходимо выполнение условий устойчивости по координатной и скоростной связанностям и создание минимальной связанности в резцовом устройстве делительной машины.

УДК 620.178.1:620.178.3

К.П. Манжула

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТВЕРДОСТИ С ПРЕДЕЛОМ ВЫНОСЛИВОСТИ МЕТАЛЛА ИЗ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

В статье представлены результаты исследования корреляционной связи твердости по Виккерсу с пределом выносливости металла зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений из стали 09Г2С и 10ХСНД, а также с пределами выносливости стали 09Г2С и 10ХСНД в состоянии поставки.

Известно, что твердость металла находится в корреляционной связи с такими механическими характеристиками, как предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел временного сопротивления разрыву $\sigma_в$. В расчетах на сопротивление усталости сварных соединений из низколегированных сталей в конечном итоге требуется знать связь твердости с пределом многоцикловой выносливости σ_{-1}. В нашей работе рассматривается корреляционная связь твердости по Виккерсу (*HV*) металла участка крупного зерна ЗТВ сварных соединений из стали 09Г2С и 10ХСНД, а также связь твердости по Виккерсу с пределами выносливости

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей

Марка стали и толщина проката	Химический состав металла, %							
	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	S	P
09Г2С	0,14	0,60	1,5	–	0,030	0,10	0,030	0,030
10ХСНД	0,12	0,79	0,68	0,53	0,41	0,73	0,0175	0,021

основного металла этих сталей в состоянии поставки. Химический состав марок сталей приведен в табл. 1.

В сварных соединениях участок крупного зерна ЗТВ совпадает с переходом наплавленного металла к основному металлу и характеризуется резким изменением геометрии соединения, что вызывает повышенную концентрацию напряжений и образование усталостных трещин. При расчетной оценке сопротивления усталости учитываются усталостные характеристики металла именно этого участка [1, 2]. Протяженность участка по ширине, как правило, не превышает 2 мм, что создает сложности в определении его предела выносливости. Поэтому исследования проводились на образцах-имитаторах участка крупного зерна ЗТВ. Заготовки вырезались из листов прокатного металла толщиной $d = 16$ мм (09Г2С) и $d = 20$ мм (10ХСНД) в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, из которых изготавливались круглые образцы длиной 140 мм и диметром корсетной части 6 мм.

На быстродействующем дилатометре проходящим током с обдувкой аргоном в образцах имитировался сварочный термический цикл, соответствующий реальным крестовым сварным соединениям, изготовленным из проката

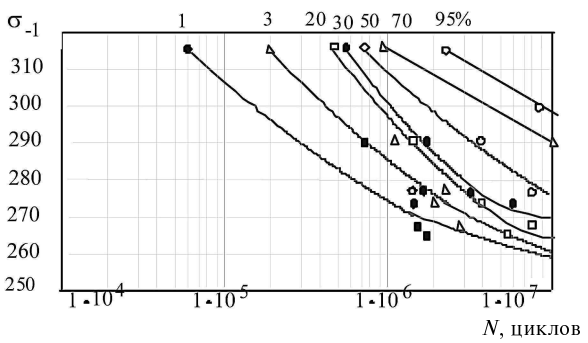


Рис. 1. Кривые усталости металла стали 09Г2С, соответствующие разным вероятностям разрушения

толщиной $\delta = 8$ мм и $\delta = 10$ мм. Сварному соединению с толщиной листа $\delta = 8$ мм соответствовала скорость охлаждения $v = 5$ °С/с, соединению из листа толщиной $\delta = 10$ мм соответствовала $v = 40$ °С/с. Скорость охлаждения контролировалась хромель-алюмелевой термопарой диаметром 0,15 мм, привариваемой в центре корсетной части образца. Имитация сварочного цикла позволила получить однородную структуру на длине 10 мм [4] в центральной корсетной части образцов.

Сравнение структур металла образцов-имитаторов и участка крупного зерна ЗТВ соответствующего сварного соединения путем проведения металлографического анализа, а также анализа фазового состава металла в центральном сечении образцов-имитаторов и в ЗТВ соответствующих сварных соединений на установке «ДРОН-2» показало полную идентичность структур.

Испытания всех образцов проводились при изгибе с вращением с частотой нагружения 3000 циклов в минуту. Группа образцов из основного металла стали 09Г2С в количестве 60 штук предназначалась для определения статистических характеристик сопротивления усталости. Испытания проводились модифицированным методом пробитов на шести уровнях напряжений с предварительной оценкой предела выносливости на базе $1{,}2 \cdot 10^7$ циклов. Результаты испытаний показаны на рис. 1.

Вычисление среднего значения предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ и его среднего квадратического отклонения $s_{\sigma_{-1}}$ для $N = 10^7$ циклов проводились заменой непрерывного распределения дискретным. Получены следующие значения: $\bar{\sigma}_{-1} = 282{,}0$ МПа, $s_{\sigma_{-1}} = 13{,}8$ МПа; $\upsilon_{\sigma_{-1}} = 0{,}049$, где $\upsilon_{\sigma_{-1}}$ — коэффициент вариации. Предельная ошибка определения предела выносливости приближенно равна [5]

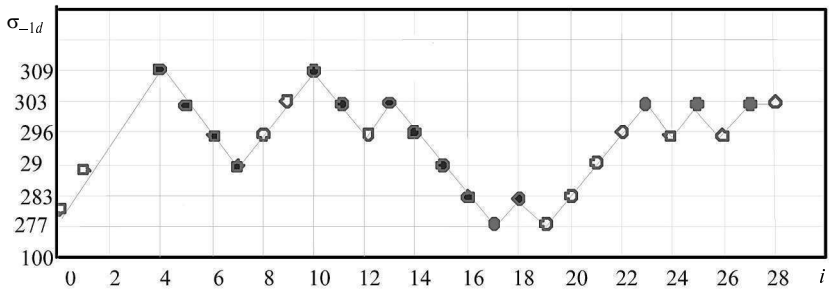


Рис. 2. Результаты испытания цилиндрических образцов-имитаторов ЗТВ соединения из стали 09Г2С методом «лестницы»

(● — образец не разрушился ◇— образец разрушился)

$$\Delta_p = \pm Z_p \frac{s_{\sigma_{-1}}}{\sqrt{n/k}} f(p), \qquad (1)$$

где Z_p — квантиль нормального распределения; k = 2–3 — коэффициент, зависящий от числа параметров кривой усталости; $f(p)$ —табулированная функция. Для вероятностей P, равных 50 и 90 %, предельные ошибки соответственно $\Delta_{0,5} = 0$ и $\Delta_{0,95} = \pm 7{,}05$ МПа.

Группа образцов-имитаторов ЗТВ сварного соединения (V= 5 °С/с) из стали 09Г2С объемом 30 штук испытывалась методом «лестницы» в предположении нормальности распределения предела выносливости, поскольку метод не позволяет выявить закон распределения. Интервал между уровнями напряжений принимался d = 7 МПа. Светлые точки на рис. 2 соответствуют образцам, не разрушившимся при испытаниях в течение $N_G = 10^7$ циклов нагружения, а темные — разрушившимся образцам.

Вычисленные по результатам испытаний значения: $\bar{\sigma}_{-1}$ = 302 МПа; $s_{\sigma_{-1}}$ = 16,7 МПа, $\upsilon_{\sigma_{-1}}$ = = 0,055. Повышение предела выносливости металла ЗТВ стали 09Г2С (v = 5 °С/с) составляет ν = 302/282 = 1,07 при коэффициенте вариации $\upsilon = \sqrt{\upsilon^2_{\sigma_{-1},1} + \upsilon^2_{\sigma_{-1,2}}} = 0{,}075$.

Группа образцов из основного металла стали 10ХСНД объемом 26 штук, предназначенная для статистической оценки предела выносливости, также испытывалась методом «лестницы» (рис. 3). По результатам испытаний получены следующие статистические характеристики предела выносливости: $\bar{\sigma}_{-1}$ = 325,5 МПа; $s_{\sigma_{-1}}$ = 4,1 МПа; $\upsilon_{\sigma_{-1}}$ = = 0,012.

Образцы-имитаторы ЗТВ соединений стали 10ХСНД испытывались в меньшем объеме. Результаты испытаний, соответствующие вероятности разрушения P = 50 %, представлены на рис. 4. Среднее значение предела выносливости образцов-имитаторов при v = 5 °С/с составило $\bar{\sigma}_{-1}$ = 325 МПа, при скорости v = 40 °С/с — $\bar{\sigma}_{-1}$ = 406 МПа.

Замеры твердости на шлифах, изготовленных из образцов-имитаторов и образцов из основного металла, проводились через 1мм, а на основном металле — не ближе 5 мм от края, что-

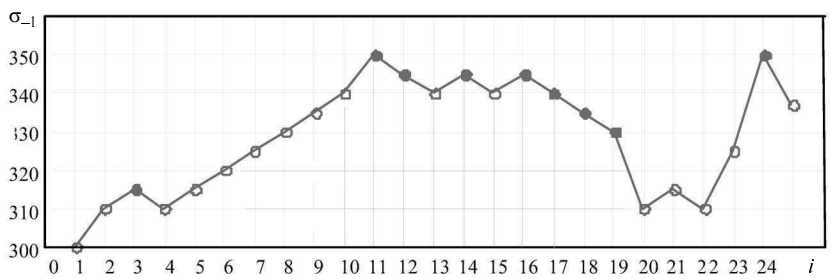


Рис. 3. Результаты испытания цилиндрических стали 10ХСНД методом «лестницы»

(◇— образец не разрушился ●— образец разрушился)

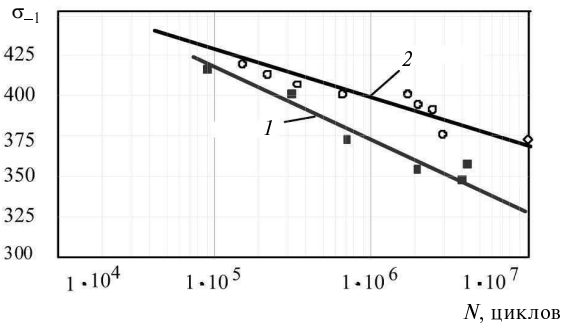


Рис. 4. Кривые усталости металла ЗТВ при скорости охлаждения v, равной 5 °С/с (*1*) и 40 °С/ с (*2*)

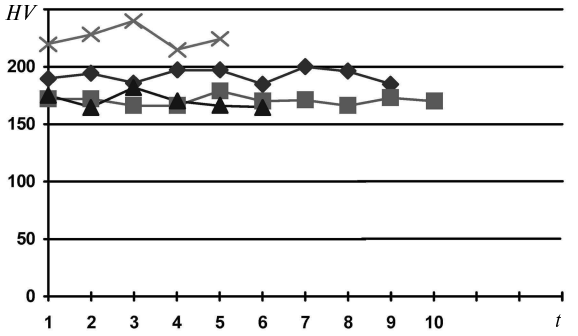


Рис. 5. Средние значения твердости в основном металле и образцах-имитаторах ЗТВ (сталь 09Г2С):

— 09Г2С поставка; — 09Г2С отжиг; — 09Г2С отжиг и нагружение — ЗТВ v = 5 °С/с

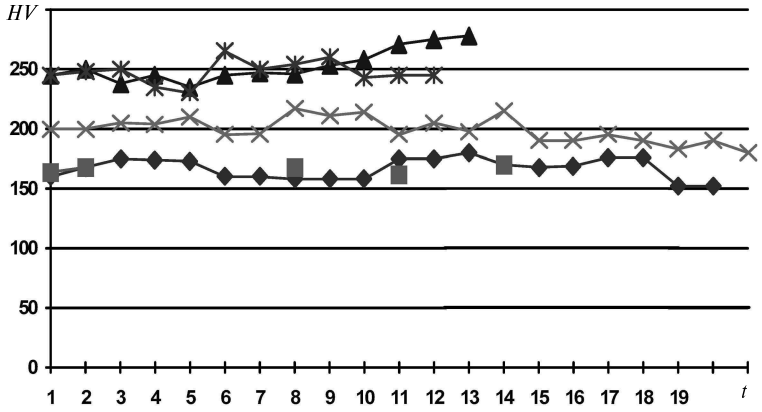


Рис. 6. Средние значения твердости в основном металле и образцах-имитаторах ЗТВ (сталь 10ХСНД):

— 10ХСД 10 мм; — 10ХСД 20 мм; — ЗТВ св. соед.; — ЗТВ v = 5 °С/с; — ЗТВ v = 40 °С/с

бы исключить влияние прокатной поверхности. Часть образцов из основного металла подвергалась отжигу при температуре 650 °С и выдержке в течение 1,5 час. На шлифах из основного металла и образцов-имитаторов ЗТВ соединений делалось 6–20 замеров твердости, по которым определялось среднее значение $\overline{HV_i}$ На рис. 5 и 6 показаны результаты измерений твердости $\overline{HV_i}$ по каждому шлифу в основном металле и образцах-имитаторах.

Отжиг понижает усталостные характеристики основного металла, а циклическое нагружение на пределе выносливости не оказывает никакого влияния на изменение твердости (средние значения твердости до и после циклического нагружения отличаются менее чем на 1 %). Твердость металла ЗТВ выше твердости основного металла. Средние значения твердости и их средние квадратические отклонения приведены в табл. 2.

Взаимосвязь статистических оценок предела выносливости σ_{-1} с твердостью HV по Виккерсу определим в виде

$$\overline{\sigma}_{-1} = \upsilon_\sigma \overline{HV}; \quad (2)$$

$$S_{\sigma-1} = \upsilon_s s_{HV}, \quad (3)$$

где υ_σ и υ_s — коэффициенты пропорциональности между средним значением предела выносливости и средним квадратическим отклонениям твердости.

На основании результатов усталостных испытаний цилиндрических образцов основного металла и образцов-имитаторов ЗТВ и данных

Таблица 2

Статистические оценки твердости основного металла и образцов-имитаторов ЗТВ сварных соединений

Сталь	Исследуемый металл	Число измерений	Среднее значение $\overline{HV}$	Среднее квадратич. отклонение s_{HV}	Границы 95% доверит. интервала
Сталь 09Г2С	Основной металл в состоянии поставки	50	190,7	4,9	±1,36
	Основной металл после отжига	50	170,6	4,6	±1,28
	Основной металл после отжига и циклического нагружения	24	172	5,6	±2,24
	Образцы-имитаторы ЗТВ при v = 5 °С/с после циклического нагружения	40	224,4	9,2	±2,85
Сталь 10ХСНД	Основной металл ??20 мм	121	167,46	8,59	±1,53
	Основной металл ??10 мм	17	169,42	6,73	±3,2
	Образцы-имитаторы ЗТВ при v = 5 °С/с	33	201,6	9,1	±3,1
	Образцы-имитаторы ЗТВ при v = 40 °С/с	10	247,3	10,7	±6,63

Таблица 3

Уравнения связи статистических оценок предела выносливости с твердостью по Виккерсу

Исследуемый металл	$\overline{\sigma}_{-1} = \upsilon_\sigma \overline{HV}$	$s_{\sigma-1} = \upsilon_s s_{HV}$
Основной металл стали 09Г2С в состоянии поставки	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,48\overline{HV}$	$s_{\sigma-1} = 2,85 s_{HV}$
Основной металл стали 09Г2С после отжига при T = 650 °С и выдержке t = 1,5 ч	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,65\overline{HV}$	$s_{\sigma-1} = 3 s_{HV}$
Основной металл стали 10ХСНД в состоянии поставки	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,73\overline{HV}$	—
Металл ЗТВ при v = 5 °С/с (сталь 09Г2С)	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,35\overline{HV}$	$s_{\sigma-1} = 1,8 s_{HV}$
Металл ЗТВ при v = 5 °С/с (сталь 10ХСНД)	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,61\overline{HV}$	...
Металл ЗТВ при v = 40 °С/с (сталь 10ХСНД)	$\overline{\sigma}_{-1} = 1,64\overline{HV}$	...

табл. 2 рассчитаны значения коэффициентов υ_s и υ_s. В табл. 3 приведены уравнения связи с рассчитанными коэффициентами.

Анализ коэффициентов уравнений не позволяет выявить устойчивую связь между этими характеристиками, возможно, из-за недостаточности проведенных экспериментов или вследствие отсутствия такой связи. Уравнения, содержащиеся в табл. 3, характеризуют корреляционные связи для исследованных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Манжула, К.П.** Метод вероятностного расчета пределов выносливости сварных соединений при стационарном режиме нагружения [Текст] / К.П. Манжула, В.Н. Юшкевич // Проблемы прочности. 1982.— № 6.— С. 43–47.

2. **Юшкевич, В.Н.** Метод расчета пределов выносливости элементов металлоконструкций [Текст] / В.Н. Юшкевич // Проблемы прочности. — 1984. № 9.— С. 13–17.

3. **Бельчук, Г.А.** Сварные соединения в корпусных конструкциях [Текст] / Г.А. Бельчук.— Л.: Судостроение, 1969.— 245 с.

4. **Манжула, К.П.** Об изменении предела выносливости металла в зоне термического влияния сварных соединений стали 09Г2С/ К.П. Манжула, В.Н. Юшкевич, В.Г. Васильев [и др.] // Автоматическая сварка.— 1982. № 2.— С. 48–50.

5. **Степнов, М.Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний [Текст] / М.Н. Степнов.— М.: Машиностроение, 1972.— 232 с.

УДК 621.9.02:075.8

Ю.М. Панкратов

УНИФИКАЦИЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Любую задачу профилирования можно представить в виде следующей схемы: известен профиль детали (инструмента) в указанном сечении — требуется найти профиль инструмента (детали) также в указанном сечении. Профиль детали (инструмента), известный в начале решения задачи, будем называть исходным. Для плоской задачи он обычно определяется из чертежа. Для пространственной задачи профиль поверхности также задается плоской линией, но обязательно должно быть указано положение плоскости, в которой расположена эта линия.

Из аналитических методов для решения задач профилирования широко используются три универсальных: метод на основе классической теории огибающих; кинематический метод и метод профильных нормалей. Эти методы могут использовать исходный профиль только в явной, неявной или параметрической форме. Непосредственно задавать исходный профиль координатами точек (такую форму будем называть точечной) в них нельзя.

Таким образом, каждое конкретное решение задачи профилирования представляет пересечение трех множеств: форм описания исходного профиля, методов профилирования и обкатных задач (схем обкаточного движения) (рис. 1, *а*). Более того, задачи профилирования разделяются на плоские и пространственные. Подсчитать же само количество задач профилирования вообще не представляется возможным, тем более что со временем оно только увеличивается. Все это затрудняет унификацию и, тем более, автоматизацию процесса профилирования инструментов.

Проанализируем формы описания исходного профиля с точки зрения удобства их использования в практических расчетах и вычисления нормалей к ним, которые требуются в некоторых методах профилирования. Попытаемся свести все формы к одной.

Начнем с неявной формы задания $F(x, y) = 0$. Даже для построения самого профиля ее все равно придется тем или иным способом приводить к явной форме $y = f(x)$. Тем не менее, существующий математический аппарат позволяет вычислять нормали $\boldsymbol{n}$ при такой форме описания в виде $n_x = \frac{\partial F}{\partial x}; n_y = \frac{\partial F}{\partial y}$. Таким образом, эта форма описания удовлетворяет требованию. Но основной ее недостаток состоит в том, что использовать эту форму можно только для очень простых линий и поверхностей, поэтому она не нашла сколько-нибудь заметного применения.

Следующая форма — явное описание кривой как $y = f(x)$ — более распространена. Она также позволяет вычислять нормали к кривой, а точнее, орты нормалей $\boldsymbol{e}$: $e_x = \sin\gamma$, $e_y = -\cos\gamma$, где $\mathrm{tg}\gamma = y'$. Основной недостаток этой формы, как,

впрочем, и неявной, состоит в том, что при неудачной параметризации варьирование аргумента x даже с постоянным шагом может привести к неравномерному расположению точек профиля вдоль всей кривой.

Параметрическая форма более предпочтительна по сравнению с двумя предыдущими уже хотя бы потому, что при удачном выборе системы параметризации она может быть лишена этого недостатка. Описать исходный профиль в параметрической форме не сложнее, а во многих случаях даже проще, чем с помощью предыдущих форм. Нормали к ней вычисляются также достаточно просто: $n_x = \frac{\partial y}{\partial u}, n_y = -\frac{\partial x}{\partial u}$.

Параметрическая форма получила наибольшее распространение. Но и у этой формы есть существенный недостаток. Чаще всего исходный профиль зубчатых изделий произвольного профиля задают в виде комбинации прямых линий, дуговых участков или еще каких-либо кривых. Типичные примеры таких профилей — стружечные канавки сверл, зенкеров, концевых фрез, зубчатые колеса и различные звездочки для неэвольвентных зацеплений и цепных передач, храповики и т. п. Но варьируемый параметр для дуговых участков — угловой и измеряется в угловых единицах (радианы или градусы), а параметр u для прямых линий — линейный и измеряется в линейных единицах (мм). Поскольку для этих двух типов участков их описание и уравнения нормалей различаются, это влечет за собой и различный вид уравнений связи в задачах профилирования. Поэтому возникла необходимость создания разных алгоритмов решения задачи профилирования для каждого вида участка. Кроме того, для каждого вида участка необходимо рассчитывать и запоминать начальные и конечные значения варьируемого параметра и шаги его изменения, имеющие к тому же различные размерности. Все это чрезвычайно усложняет решение задач профилирования для изделий, профиль которых представляет комбинацию из участков различного вида, а таких в реальных задачах — большинство.

И, наконец, в практике часто встречаются случаи, когда исходный профиль задан координатами точек, вычисленных в результате каких-либо расчетов, коррекции или принятых по тем или иным соображениям. Такой способ задания

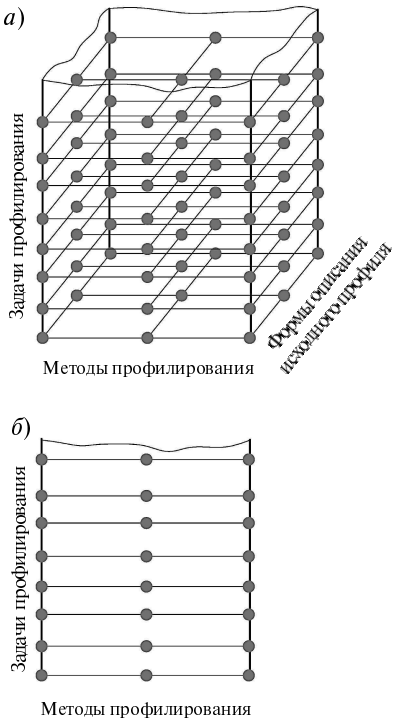


Рис. 1. Возможные сочетания в теории профилирования

профиля будем называть точечным. Перечисленные выше методы профилирования не позволяют использовать непосредственно точечную форму задания исходного профиля при решении задач профилирования, что является их недостатком. Но это позволяют аппроксимационные методы профилирования [3].

Таким образом, многообразие форм описания исходного профиля, методов профилирования и обкатных задач (см. рис. 1, *а*) приводит к необходимости аналитического решения для каждого конкретного сочетания из этих множеств, что составляет довольно трудоемкую задачу. Попробуем уменьшить объем множеств. Для начала постараемся избавиться от множества форм описания исходного профиля (см. рис. 1, *б*), сведя их всех к одному унифицированному виду.

Как будет показано ниже, для решения обкатных задач требуется знание координат точек профиля, а для кинематического метода и метода профильных нормалей — еще и нормалей к ним. Есть смысл создать такой блок ввода и описания исходного профиля, который позволял бы его применять в любой из описанных выше форм и на выходе которого были бы известны

координаты точек профиля и нормали к ним в единообразной форме. Это и позволит сделать решение обкатных задач инвариантными к различным формам описания исходного профиля [3].

Выполнить поставленную задачу можно, если удастся различные формы описания исходного профиля преобразовать к виду, позволяющему находить угол γ наклона касательной в требуемой точке профиля. Зная этот угол, можно будет легко найти и орт нормали $\boldsymbol{e}$ к профилю по одним и тем же формулам: $e_x = \sin\gamma$, $e_y = -\cos\gamma$. Другая задача, которая при этом решается, — анализ и систематизация всех форм описания исходного профиля с точки зрения удобства для практического использования, в том числе и для программирования. Сразу же исключим из рассмотрения неявную форму, поскольку, как уже отмечалось, ее все равно приходится приводить тем или иным способом к явной форме. Таким образом, для рассмотрения оставим параметрическую, явную и точечную формы. Рассмотренный выше подход позволяет создать единый алгоритм и подпрограмму для ввода и описания исходного профиля при всех перечисленных формах его задания, а также вычисления на выходе координат и ортов нормалей в единообразном представлении (рис. 2).

Предпочтительна такая форма, которая ограничивалась бы вводом исходных данных в уже отлаженную программу в диалоговом режиме. Этому требованию отвечает, например, профиль, состоящий из комбинации прямых линий и дуг окружностей. Хотя такой профиль и может быть легко описан в параметрической форме, но есть смысл, учитывая уже отмеченное, выделить их из общей параметрической формы в отдельные параметрические формы — линейную и дуговую (см. рис. 2). К этому подталкивает и практика. Действительно, исходные профили большинства неэвольвентных зубчатых и винтовых изделий задаются комбинацией именно прямолинейных и дуговых участков, выделение которых в отдельный вид параметрической формы позволит вводить их в диалоговом режиме, что намного упрощает пользование уже отлаженной программой.

Если профиль задан сложной нелинейной зависимостью в параметрической форме, то ее необходимо вводить в программу на уровне входного языка, на котором написана программа. Подобные ситуации справедливо считаются крайне нежелательными. Кроме того, для определения нормалей необходимо выполнить аналитическое вычисление частных производных и также ввести их в программу. Вышесказанное также относится и к явной форме описания профиля (см. рис. 2, блок *2*). Это, безусловно, существенный недостаток указанных форм.

Точечная форма, наоборот, может легко вводиться в диалоговом режиме, и в этом состоит ее безусловное преимущество (см. рис. 2, блок *2*).

Линейная форма. Обозначим систему координат (рис. 3, *а*), связанную с плоскостью, в которой задан исходный профиль, как S_1. Профиль (или его участок) в виде прямой линии проще всего ввести в программу в диалоговом режиме, указав прежде всего количество точек N, которые мы хотели бы равномерно распределить на этой прямой (см. рис. 2, блок *4*). Далее введем координаты начальной «н» ($x_н$, $y_н$) и конечной «к» ($x_к$, $y_к$) точек прямой. Обозначим приращения по осям x и y (см. рис. 3, *а*) как $\Delta x_1 = x_к - x_н$, $\Delta y_1 = y_к - y_н$.

Для вычисления координат i-й точки при заданном их количестве N сначала вычислим для каждой точки безразмерный параметр u (см. рис. 2, блок *7*): $u = \dfrac{i-1}{N-1}$. Таким образом, при изменении i от 1 до N параметр u принимает значения от 0 до 1, а сами координаты вычислим как

$$x_1 = x_н + \Delta x_1 u;$$

$$y_1 = y_н + \Delta y_1 u.$$

При этом текущая точка i переместится от начальной точки «н» до конечной точки «к». Преимущества использования именно такой формы записи в задачах профилирования рассмотрим позже. Эта формула представляет не что иное, как другую форму записи сплайна первой степени, которая описывает прямую линию. Перегруппировав переменные, ее можно записать так, как это принято в теории сплайнов:

$$x_1 = (1-u)x_н + ux_к;$$

$$y_1 = (1-u)y_н + uy_к.$$

Но мы в дальнейшем будем пользоваться предыдущей формулой как более удобной именно для задач профилирования.

Угол γ наклона касательной в каждой текущей точке i прямой линии (см. рис. 2, блок *5*) будет, естественно, постоянным и равным $\gamma = \arcsin\dfrac{\Delta y_1}{L}\operatorname{sign}\Delta x_1$, где $L = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}$ — длина прямой линии.

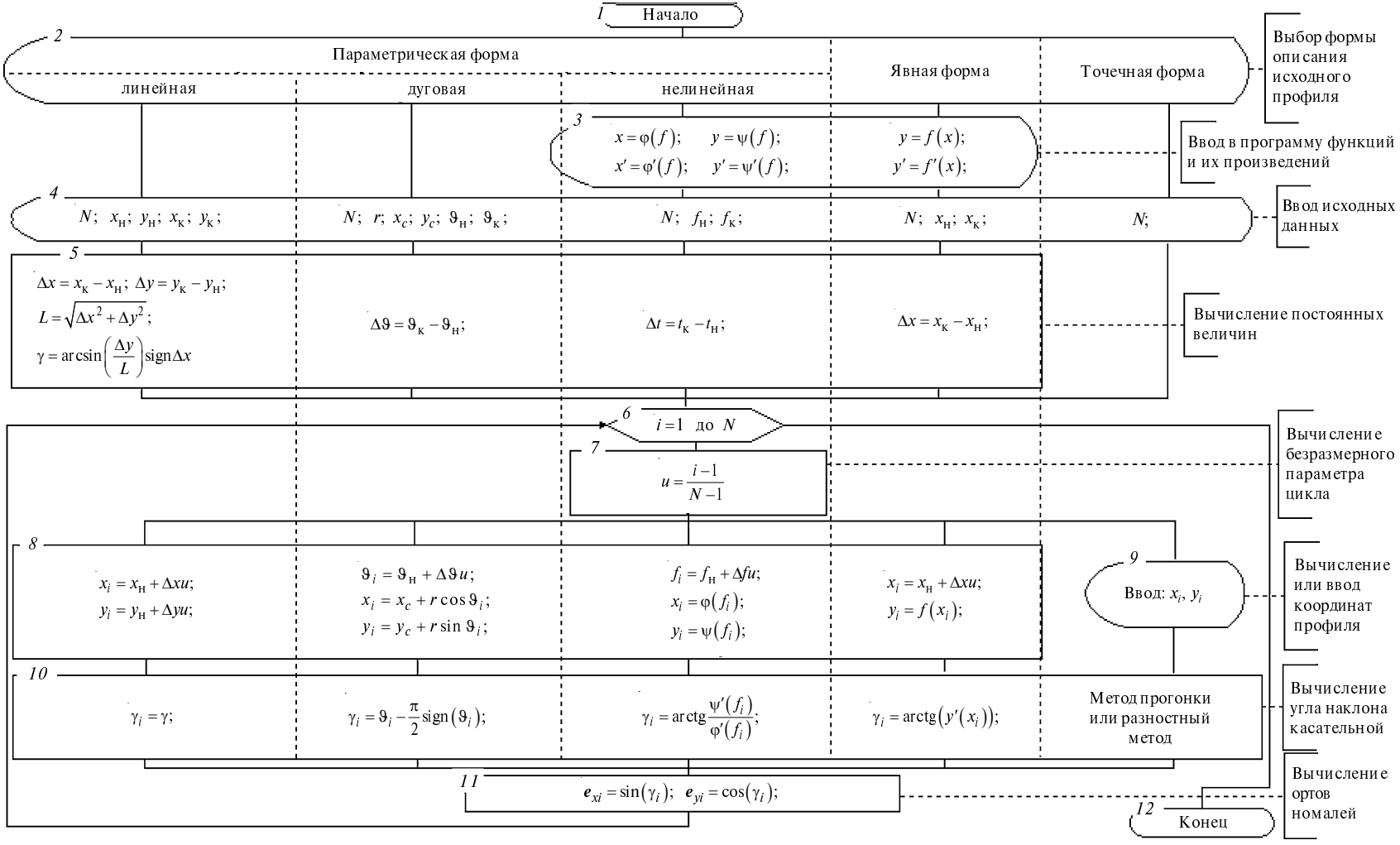


Рис. 2. Алгоритм ввода и описания исходного профиля

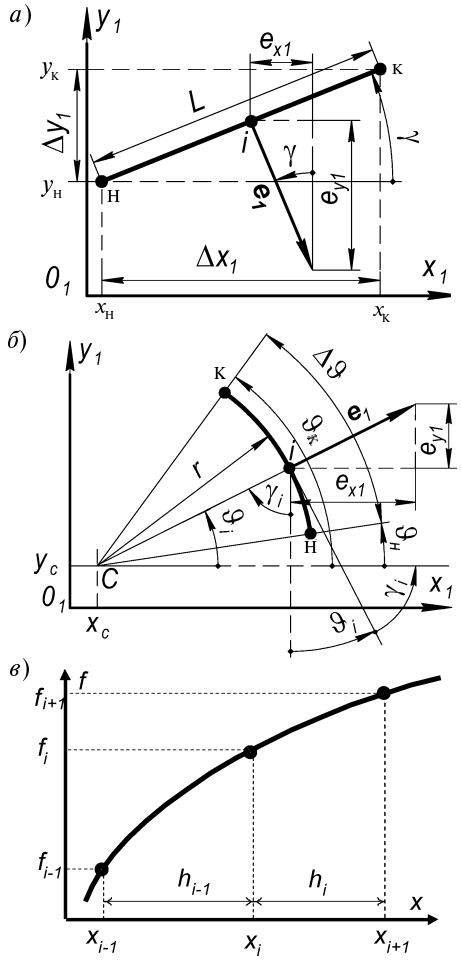


Рис. 3 Линейная (*а*), дуговая (*б*) и точечная (*в*) формы

Такой способ вычисления γ выбран потому, что альтернативный ему вариант $\gamma = \operatorname{arctg}\dfrac{\Delta y_1}{\Delta x_1}$ для вертикальных линий приведет к аварийному останову программы, так как деление на ноль невозможно. Функция $\operatorname{sign}\Delta x_1$ позволяет независимо от всех возможных сочетаний положения начальной и конечной точек прямой удерживать угол γ в пределах $-\dfrac{\pi}{2} \le \gamma \le \dfrac{\pi}{2}$ с отсчетом положительных значений γ от оси x_1 против часовой стрелки. Так, например, если точки «н» и «к» (см. рис. 3, *а*) поменять местами, то угол γ по-прежнему останется положительным.

Зная угол γ, найдем проекции орта нормали (см. рис. 2, блок *11*):

$$e_{x1} = \operatorname{sing},\ e_{y1} = -\cos\gamma.$$

Таким образом, принятая система параметризации прямой с помощью фактически сплайна первой степени позволяет описать любую прямую линию с помощью безразмерного параметра u, лежащего всегда в пределах $0 \le u \le 1$, что чрезвычайно удобно при программировании циклов для перебора всех N точек. При этом цикл выполняется по целочисленной переменной i номера точки. Еще одно безусловное преимущество — точки будут распределены по участку равномерно. Заодно избавились и от необходимости указания размерности шага переменной.

Использование безразмерного параметра u в качестве независимой переменной предоставляет и еще одну очень полезную и удобную возможность в практических расчетах: легко описать профиль с напуском, который иногда необходимо учитывать при проектировании инструментов, обрабатывающих изделия, заготовки для которых обычно включают в себя технологический припуск, оставляемый на финишные операции. Для включения припуска в профиль достаточно назначить параметру u значение за пределами $0 \le u \le 1$, при этом прямая выйдет за пределы крайних точек «н» и «к» на $(u-1)$ своей длины L, т. е. на величину $(u-1)L$. Так, например, при $u = 1{,}2$ прямая будет продлена за точку «к» на $0{,}2L$, или на 20 %. При $u < 0$ прямая начнется до начальной точки «н». Так, при $u = -0{,}1$ прямая начнется на $0{,}1L$ длины до точки «н». Используя математическую терминологию, это свойство сплайна можно кратко сформулировать так: при $0 \le u \le 1$ имеет место интерполяция линии между крайними точками, при $u < 0$ и $u > 1$ — экстраполяция.

Все вышесказанное полностью относится и к другим формам описания профиля, рассматриваемым далее, в которых используется безразмерный параметр u.

Дуговая форма. Поскольку и для дуговой формы, как для линейной и всех остальных, необходимо прежде всего ввести количество точек N на каждом участке, то далее мы упоминать об этом не будем. Для описания профиля или его участка в виде дуги окружности необходимо еще ввести радиус r, координаты x_c, y_c центра C, начальный $\vartheta_н$ и конечный $\vartheta_к$ углы дуги (см. рис. 3, *б* и рис. 2, блок *4*).

Представим координаты текущей точки i дуги в форме, отвечающей всем требованиям, вышеперечисленным для прямой линии. Хотя

дуга окружности и не является сплайном первой степени, постараемся и ее представить в «сплайновой» форме, что позволит унифицировать алгоритм и для этой формы. Запишем текущее значение угла ϑ_i также в форме, аналогичной линейной, обозначив диапазон изменения угла ϑ_i как $D\vartheta_1 = \vartheta_к - \vartheta_н$ (см. рис. 2, блок *5* и *8*): $\vartheta_i = \vartheta_н + \Delta\vartheta_1 u$, где u также изменяется в пределах $0 \le u \le 1$.

Координаты текущей точки i в системе S_1 определятся так (см. рис. 3, *б* и рис. 2, блок *8*):

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= x_C + r\cos\vartheta_i \\ y_1 &= y_C + r\sin\vartheta_i \end{aligned}\right\}.$$

Угол γ_i наклона касательной в текущей точке i также всегда будет находиться в пределах $-\frac{\pi}{2} \le \gamma_i \le \frac{\pi}{2}$, если его вычислять (см. рис. 2, блок *10*) как $\gamma_i = \vartheta_i - \frac{\pi}{2}\operatorname{sign}\vartheta_i$. Таким образом, принятая и для дуговых участков система параметризации позволяет угловой параметр ϑ_i также вычислять в зависимости от безразмерного параметра u, всегда изменяющегося в пределах $0 \le u \le 1$, что в свою очередь унифицирует алгоритм решения обкатных задач и для дуговых участков [3]. Поскольку, в отличие от прямолинейного участка, угол γ_i для дуги в каждой точке i будет различный, то и проекции орта нормали будут различными, и вычислять их необходимо уже в каждой точке i по тем же формулам (см. рис. 2, блок *11*): $e_{x1i} = \sin\gamma_i$; $e_{y1i} = -\cos\gamma_i$. Теперь и на дуговом участке точки всегда будут распределены равномерно.

Нелинейная форма. Так будем называть разновидность параметрической формы, когда профиль задан в виде

$$x_1 = \varphi(t);$$
$$y_1 = \psi(t),$$

где функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ описывают более сложные кривые. Для ввода их в программу, к сожалению, требуется вносить изменения в саму программу на уровне ее входного языка (см. рис. 2, блок *3*). И если такие функции были введены, попытаемся и их представить в форме, допускающей вычисление нормалей и решение задач профилирования по единому алгоритму.

Начальное $t_н$ и конечное $t_к$ значения независимого параметра t также можно вводить в диалоговом режиме (см. рис. 2, блок *4*). Обозначив диапазон изменения параметра t в системе S_1 как $\Delta t_1 = t_к - t_н$ (см. рис. 2, блок *5*), текущее значение параметра t_i также можно представить в «сплайновой» форме в зависимости от безразмерного параметра u по аналогии с предыдущими формами как $t_i = t_н + \Delta t_1 u$.

Тогда координаты текущей точки i этого профиля можно вычислить по формулам (см. рис. 2, блок *8*) как

$$x_i = \varphi(t_i);$$
$$y_i = \psi(t_i),$$

а угол наклона касательной в этой точке — по формуле (см. рис. 2, блок *10*) $\gamma_i = \operatorname{arctg}\frac{\psi'(t_i)}{\varphi'(t_i)}$.

Поскольку современное состояние языков программирования (кроме, например, Mathcad'а и некоторых др.) не позволяет вычислять производные в аналитической форме, то это, к сожалению, необходимо выполнять «вручную» и вводить в саму программу, что, как уже отмечалось, крайне нежелательно. Если же потребность в описании профиля нелинейной формой все же возникнет, то можно при выборе этой формы описания предусмотреть открытие еще одного диалогового окна, в котором заранее ввести эти функции и их производные в программу и затем выбирать нужную. Трудно представить реальные обкатные задачи, в которых эти функции сыпались бы как из рога изобилия. Если они и будут, то число их будет довольно ограничено. В этом же окне следует записать и соответствующие производные. Таким образом, и нелинейная форма также может быть преобразована к виду, допускающему дальнейший расчет по единому алгоритму. Проекции орта нормали для этих форм вычисляются по тем же формулам (см. рис. 2, блок *11*).

Явная форма. Явная форма описания исходного профиля $y = f(x)$, будучи, по сути, частным случаем параметрической нелинейной формы, обладает всеми ее недостатками. Для этой формы начальные $x_н$ и конечные $x_к$ значения также можно вводить в диалоговом режиме (см. рис. 2, блок *4*). Обозначим диапазон изменения x (см. рис. 2, блок *5*) как $\Delta x_1 = x_к - x_н$. Абсциссы текущей точки i профиля также можно представить

в «сплайновой» форме как функцию безразмерного параметра u (см. рис. 2, 5 блок *8*):

$$x_1 = x_н + \Delta x_1 u;$$

$$y_1 = f(x_1),$$

а угол наклона касательных в этих точках — по формуле $g_i = \text{arctg}(f'(x_1))$ (см. рис. 2, блок *10*).

Таким образом, эта форма также требует введения в саму программу функции $f(x)$ и ее производной $f'(x_1)$, выведенной предварительно аналитически. Поэтому все сказанное выше о нелинейной форме полностью относится и к вводу в программу явной формы. Проекции орта нормали для этих форм вычисляются по тем же формулам (см. рис. 2, блок *11*).

Точечная форма. При точечном задании профиля (см. рис. 2, *в*) определение нормалей становится, на первый взгляд, проблематичным. Использовать для решения обкатных задач интерполяционные полиномы типа полиномов Лагранжа и т. п. нельзя, так как все они в большей или меньшей степени подвержены осцилляции. Такой профиль можно аппроксимировать, например, глобальным сплайном [1, 2]. Это намного усложнит задачу, хотя для вычисления нормалей строить сам сплайн необязательно, достаточно лишь вычислить углы наклона касательных γ_i, которые и позволят вычислить нормали (см. рис. 2, блок *11*). Для вычисления углов γ_i достаточно вычислить первые производные m_i во всех узлах, воспользовавшись методом прогонки (см. рис. 2, блок *10*).

Можно воспользоваться и другим, менее точным, но более простым способом, вычислив m_i трехточечной схемой конечно-разностной аппроксимации производных [2]. Для краткости такой способ в дальнейшем будем называть разностным. В общем случае при неравноотстоящих узлах первые производные m_i для всех внутренних узлов (рис. 3 *в*) рассчитываются по формуле (см. рис. 2. блок 10)

$$m_i = \mu_i \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + \lambda_i \frac{f_i - f_{i-1}}{h_{i-1}};$$

$$(i = 2, 3, \ldots, N-1),$$

где $\mu_i = \dfrac{h_{i-1}}{h_i + h_{i-1}}$; $\lambda_i = 1 - \mu_i$, а для крайних узлов 1 и N — по формулам

$$m_1 = (1 + \mu_2)\frac{f_2 - f_1}{h_1} - \mu_2 \frac{f_3 - f_2}{h_2};$$

$$m_N = (1 + \lambda_{N-1})\frac{f_N - f_{N-1}}{h_{N-1}} - \lambda_{N-1} \frac{f_{N-1} - f_{N-2}}{h_{N-2}};$$

Угол γ_i наклона касательной к аппроксимируемой кривой вычисляют как $\gamma_i = \text{arctg} m_i$. Таким образом, и точечная форма также может быть преобразована к виду, допускающему дальнейший расчет по единому алгоритму. После нахождения угла γ_i вычисляются по тем же формулам (см. рис. 2, блок *11*) проекции орта нормали для этой формы.

Такой подход позволяет решать задачи для профилей, состоящих из нескольких участков, каждый из которых может быть задан в любой форме, поэтому вначале в программе необходимо предусмотреть диалоговое окно с вопросом о количестве N_y участков, которое будут вводить.

Вначале выбирается форма описания участка (см. рис. 2, блок *2*), в зависимости от которой программа в дальнейшем будет предлагать вопросы, характерные именно для этой формы. Как уже было сказано, для параметрической нелинейной и явной форм предварительно необходимо ввести функции и выведенные аналитически производные в саму подпрограмму (см. рис. 2, блок *3*). Всю остальную информацию для них в дальнейшем также вводят в диалоговом режиме.

Далее все вычисления выполняются в цикле по i для всех N точек (см. рис. 2, блок *6*). Прежде всего, для всех форм профиля вычисляется безразмерный параметр u (см. рис. 2, блок *7*), который в свою очередь позволяет вычислить координаты всех N точек (см. рис. 2, блок *8*). Для точечной формы координаты вводят в диалоговом режиме (см. рис. 2, блок *9*) также в цикле по i. Углы наклона касательных g_i вычисляются в блоке *10* (см. рис. 2), при этом для точечной формы может быть использован метод прогонки или разностная схема. И, наконец, зная эти углы, по одной и той же формуле вычисляют орты нормалей (см. рис. 2, блок *11*).

Таким образом, алгоритм позволяет для всех форм описания исходного профиля вычислять координаты точек, угол γ_i наклона касательной в цикле по переменной i, являющейся номером точки на участке, что очень удобно для программирования, и орт нормали $\boldsymbol{e}_i$. Переменная i изменяет параметр u, который всегда будет находиться в пределах $0 \le u \le 1$ при любом значении N.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Завьялов, Ю.С.** Методы сплайн-функций [Текст] / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко.— М.: Наука, 1980.— 352 с.

2. **Завьялов, Ю.С.** Сплайны в инженерной геометрии [Текст] / Ю.С. Завьялов, В.А. Леус, В.А. Скороспелов.— М.: Машиностроение, 1985.— 224 с.

3. **Панкратов, Ю.М.** Профилирование обкатных инструментов [Текст] / Ю.М. Панкратов.— СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2010.— 158 с.

УДК.621.735.79

М.М. Радкевич, Д.Ю. Фомин

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК

Конкурентоспособность выпускаемой машиностроительной продукции в условиях рыночной экономики во много определяется оптимальным соотношением конечной стоимости готового изделия и его эксплуатационными показателями. Разработка новых, равно как и оптимизация существующих техпроцессов штамповки, открывает значительные возможности для снижения производственных издержек, а следовательно, повышения рентабельности производства.

При изготовлении изделий методами обработки металлов давлением (ОМД) широкое применение находят технологические процессы горячей и холодной штамповки. За рубежом, в частности в Германии, на заводах фирм «Хиршфогель АГ» и «Виланд Верке», активно внедряются техпроцессы теплой (полугорячей) штамповки [1], сочетающие преимущества холодной и горячей штамповок. В результате получают изделия, обладающие комплексом высоких механических свойств, меньшими припусками на обработку, что позволяет снизить расходы на механическую обработку, уменьшить потери металла на угар. В совокупности все это приводит к снижению производственных затрат на энергоносители.

Сочетая в едином цикле технологического процесса полугорячую штамповку и термическую обработку, добиваются эффекта повышения механических свойств по сравнению с получаемыми по стандартной заводской технологии изготовления различных деталей из конструкционных сталей машиностроительного назначения. Однако внедрение полугорячей штамповки в промышленное производство началось лишь с конца 1970-х годов [2]. Сдерживающий фактор развития технологии полугорячей деформационно-термической штамповки — недостаточная изученность процесса и отсутствие сведений о влиянии механико-термических параметров на структуру и свойства поковок.

В этой связи перед нами стояла задача более полного изучения влияния режимов технологического процесса полугорячей штамповки поковок из различных сталей на конечную структуру и механических свойства получаемых изделий.

На основе анализа теоретических сведений и изучения закономерностей формирования структурного состояния стали при горячей и холодной штамповке необходимо было предложить оптимальные энерго- и материалосберегающие режимы полугорячей штамповки типовых, круглых в плане, а также удлиненной формы поковок из стали 40Х и 20Х13. А затем в результате проведения штамповки по оптимальному и заводскому режиму, получить данные и сопоставить механические свойства и структуру полученных образцов.

Анализ теоретических сведений о закономерностях формирования структурного состояния стали и систематизация имеющихся литературных сведений по изучению технологии теплой штамповки [1,3,4] и режимах деформационно-термической обработки при горячей штамповке в открытых штампах [2, 5, 6] позволили выбрать параметры термомеханического

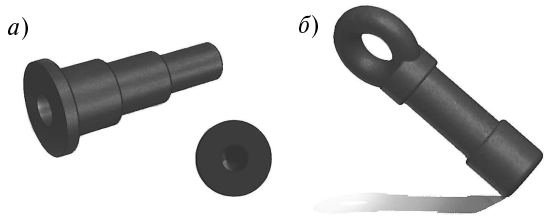


Рис. 1. Отштампованные поковки
(*а* — выдавливанием; *б* — облойной штамповкой)

воздействия на металл в условиях полугорячей деформационно-термической обработки.

Такими параметрами являются температура нагрева $T_н$, температура начала деформации (штамповки) $T_д$, время последеформационной паузы $\tau_п$, степень деформации ε и температура отпуска $T_о$.

Для исследования влияния параметров полугорячей деформационно-термической штамповки на формирование структуры и механических свойств в производственных условиях были выбраны две типовые поковки (рис. 1), полученные на кривошипном горячештамповочном прессе с усилием 2500 т. с. Поковки штамповали по заводскому стандартному режиму и по режиму полугорячей деформационно-термической обработки. Кроме того, обработка осуществлялась по двум разным схемам — выдавливанием в закрытых штампах и облойной штамповкой в открытых штампах. Выбор двух схем объясняется необходимостью дальнейшего сопоставления полученных результатов влияния параметров полугорячей деформационно-термической обработки $T_н$, $T_д$, $\tau_п$, ε и $T_о$ на получаемый комплекс механических свойств и структуру поковок в условиях штамповки их в открытых и закрытых штампах.

Поковка «вал инжектора» (рис. 1, *а*) изготавливалась на КГШП в закрытом штампе из стали 40Х по технологии полугорячей штамповки на фирме Хиршфогель (OJSC «Hirschwogel AG», Deutschland) по следующему режиму: $T_н$ = 1200 °С, $T_д$ = 950 °С, $\tau_п$ = 30 с, охлаждение в масло, $T_о$ = 520 °С.

Поковка «серьга»(рис. 1, *б*) изготавливалась на КГШП в открытом штампе из стали 20Х13 по технологии полугорячей штамповки на предприятии ООО «Кировский завод» по режиму: $T_н$ = = 1200 °С, $T_д$ = 950 °С, $\tau_п$ = 30 с, охлаждение в масло, $T_о$ = 450 °С.

Стандартный заводской режим штамповки обеих поковок заключался в нагреве до 1200 °С, штамповке при 1200 °С, охлаждении на воздухе и последующей термической обработке (закалка и высокий отпуск).

После штамповки поковок из них были изготовлены образцы для проведения механических испытаний и металлографических исследований. Результаты механических испытаний поковок из исследуемых сталей, отштампованных по заводскому режиму и режимам полугорячей деформационно-термической штамповки, представлены на рис. 2.

Анализ результатов механических испытаний поковок из стали 40Х и 20Х13 (рис. 2, *а*, *б*), изготовленных по режимам полугорячей деформационно-термической штамповки, показал, что прочностные характеристики — предел прочности ($\sigma_в$), условный предел текучести (σ_{02}) — выше, чем у поковок, изготовленных по стандартной заводской технологии так для стали 40Х $\sigma_в$ выше на 10 %, σ_{02} выше на 12,5 %. Следует отметить, что для поковок из стали 20Х13 наблюда-

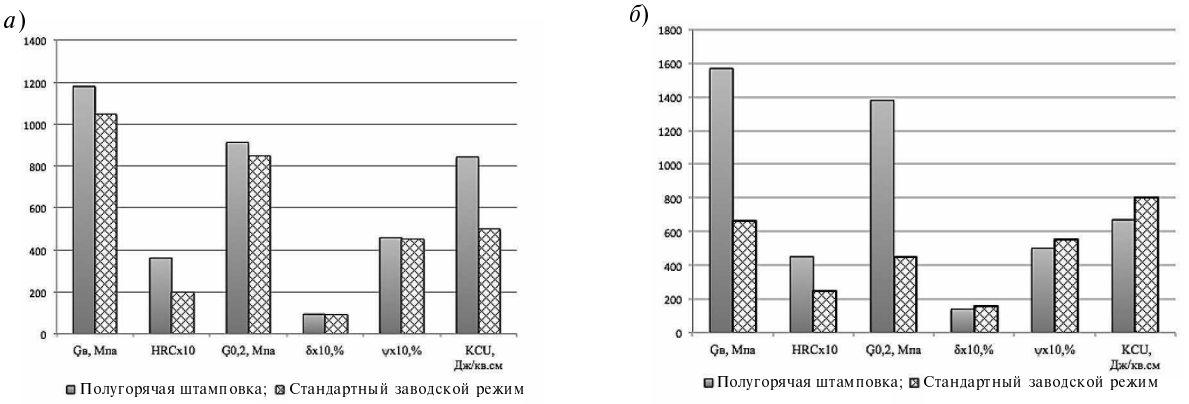


Рис. 2. Механические свойства поковок (*а* — сталь 40Х; *б* — сталь 20Х13)

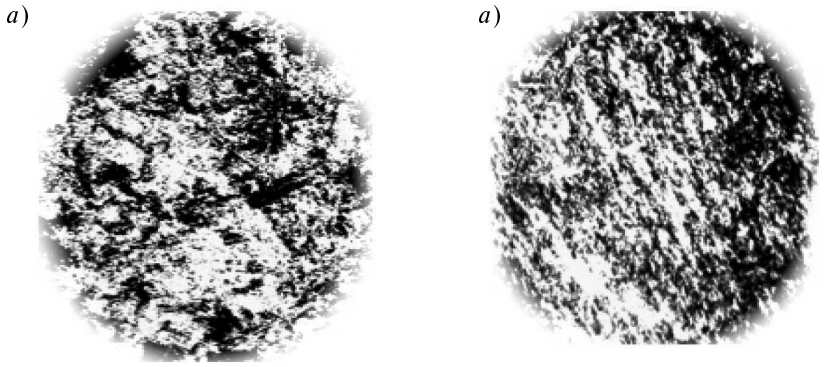


Рис. 3. Микроструктура поковок из стали 40Х
(*а* — заводская технология; *б* — полугорячая штамповка. ×340)

ется более значительное повышение прочностных характеристик по сравнению с обработкой по заводской технологии. Что же касается характеристик пластичности, то для обеих сталей они на уровне технических требований или несколько выше по сравнению с полученным по заводской технологии.

Микроструктура поковок из исследуемых сталей, изготовленных по режимам полугорячей деформационно-термической штамповки и по заводской технологии, показана на рис. 3 и 4. Микроструктура поковок из стали 40Х после изготовления их по заводской технологии (рис. 3, *а*) представляет смесь феррита и перлита с укрупненными областями свободного феррита, в то время как при полугорячей штамповке (рис. 3, *б*) разнозернистость структуры металла снижается и наблюдается более равномерное распределение феррита, перлита и образовавшегося в незначительном количестве мартенсита.

Исследования микроструктуры стали 20Х13 показали, что при полугорячей штамповке поковок из стали 20Х13 (рис. 4, *а*) структура стали состоит из измельченного мартенсита, в то время как при штамповке по заводскому режиму (рис. 4, *б*) наблюдается более крупнозернистая структура.

Таким образом, металлографические исследования феррито-перлитных и мартенситных сталей дают основания утверждать, что в результате применения полугорячей деформационно-термической штамповки поковок из сталей 40Х и 20Х13 формируется структура, для которой характерны большая однородность и дисперсность. Как следствие, комплекс механических свойств сталей после такой обработки значительно выше по сравнению заводскими режимами горячей штамповки.

В результате проведенных исследований установлено, что применение полугорячей деформационно-термической обработки в условиях штамповки в закрытых и открытых штампах обеспечивает получение поковок из легированных сталей с комплексом более высоких механических свойств по сравнению с изготовлением их по стандартной заводской технологии.

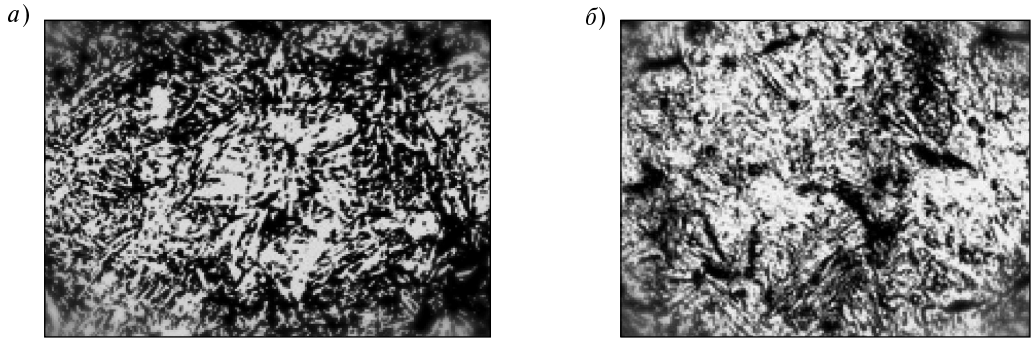


Рис. 4. Микроструктура (×340) поковок из стали 20Х13:
а — полугорячая штамповка; *б* — заводская технология

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dahme, M.** Forged Components [Текст] / M. Dahme.— Germany: Egger, Landsberg am Lech.— 2011.

2. **Радкевич, М.М.** Технология упрочняющей деформационно-термической обработки [Текст] / М.М. Радкевич.— СПб., 2003.

3. **Kugler, H.** Umformtechnik.Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe [Текст] / H. Kugler.— Germany: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2009.

4. **Szebsdat, O.** Presentation of the forging industry [Текст] / O. Szebsdat, H. Apholt.— Germany: Infostelle, 2008.

5. **Радкевич, М.М.** Особенности формирования очага деформации в условиях деформационно-термической обработки [Текст] / М.М. Радкевич // Металлообработка.— 2005. № 6(30).— С. 24–27.

6. **Радкевич, М.М.** Формирование структуры сталей в условиях программной механико-термической обработки [Текст] / М.М. Радкевич, А.И. Новиков, Д.Ю. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2010. № 4.— С. 192–196.

УДК 621.983.044

В.С. Мамутов

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ*

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ) — эффективная технология изготовления сложных точных крупногабаритных деталей из тонколистовых металлов и труб в условиях мелкосерийного производства. Одна из главных проблем ЭГИШ — низкий коэффициент полезного действия, который при штамповке в закрытых камерах обычно не превышает 10–20 %. Минимизировать потери энергии может компьютерное моделирование процесса ЭГИШ, учитывающее комплекс электрических и физико-механических явлений, характеризующих процесс. Построение компьютерных моделей требует достоверных экспериментальных данных по параметрам процесса, в первую очередь — по характеристикам импульсного давления. Для этого требуется надежная конструкция датчика давления, методика его тарировки и опыт измерения в условиях ЭГИШ.

Наиболее важные характеристики импульсного давления с точки зрения обработки металлов давлением — это форма давления, амплитуда, фронт (время достижения максимума) и общая длительность. Перечисленные параметры являются исходными при выборе типа измерительного преобразователя, при проектировании датчиков и согласующих устройств, тарировке и практическом применении [1].

В статье представлены методика и результаты измерения импульсного давления в процессах ЭГИШ. Исходными данными являются следующие параметры давления, характерные для процессов ЭГИШ: длительность импульса в пределах 20–1000 мкс, фронт в пределах 1–50 мкс, амплитуда до 500 МПа.

Конструкция датчика давления. Промышленность не выпускает датчики и аппаратуру для измерения параметров давления в указанных диапазонах, а тем более для тарировки подобных датчиков. При этом измерения осуществляются в условиях сильных электромагнитных наводок, защита измерительного тракта от которых достаточно сложна. Конструкция пьезодатчика с акустическим стержнем, применявшаяся для измерения параметров давления при электрическом разряде в жидкости, представлена на рис. 1.

Аналогом для разработки выбрана конструкция датчика с акустическим стержнем [2]. В качестве чувствительного элемента *1* применялись таблетки пьезокерамики из цирконата титаната свинца (ЦТС-19). В качестве материала акустического стержня *2* применялся металлический или порошковый кадмий, имеющий хорошее

* Исследования, связанные с измерениями, выполнялись по проекту МНТЦ № 1593

акустическое согласование с материалом пьезокерамики. Важным фактором с точки зрения влияния «дребезга» является качество крепления корпуса *3* в разрядной камере или контейнере. Такое качество обеспечивается уменьшенным шагом резьбы и применением контргайки *4*.

К недостаткам пьезокерамики относится ее низкая стабильность во времени и зависимость пьезомодуля от величины и длительности предшествующих нагружений [3, 4]. Чтобы это проявлялось в минимальной степени, перед пайкой пьезоэлемента *1* к акустическому стержню *2* пьезокерамику подвергали искусственному старению, выдерживая 50–100 часов под нагрузкой 150–200 МПа. После такой выдержки величина пьезомодуля уменьшается в 1,5–2 раза, но зато улучшается стабильность измерений. При пайке пьезокерамики к акустическому стержню используется специальный низкоплавкий припой со значительным содержанием серебра, чтобы за счет диффузионных процессов при эксплуатации не произошло охрупчивание металла в зоне пайки, преждевременное разрушение и выход из строя датчика.

К положительным качествам пьезокерамики относится сравнительно низкая механическая добротность, определяемая высоким внутренним трением, что способствует быстрому (по сравнению с природными материалами типа кварца) затуханию колебаний в чувствительном элементе. Это обстоятельство позволяет достаточно успешно применять пьезокерамику в датчиках с акустическим стержнем, когда таблетка чувствительного элемента крепится на конце стержня. Использование этой же особенности пьезокерамики предложено и реализовано при изготовлении акустического стержня спеканием из порошкового материала [5]. При этом с одного конца стержня подбором плотности материала можно приблизиться к условию согласования акустических импедансов стержня и чувствительного элемента. По мере удаления от пьезоэлемента плотность материала стержня снижается, уменьшая при этом скорость распространения проходящей волны сжатия и растягивая время прихода волн, отраженных от противоположного конца стержня, к пьезокерамике. Такая конструкция акустического стержня позволяет уменьшить габариты датчика, предназначенного для измерения импульса давления заданной длительности.

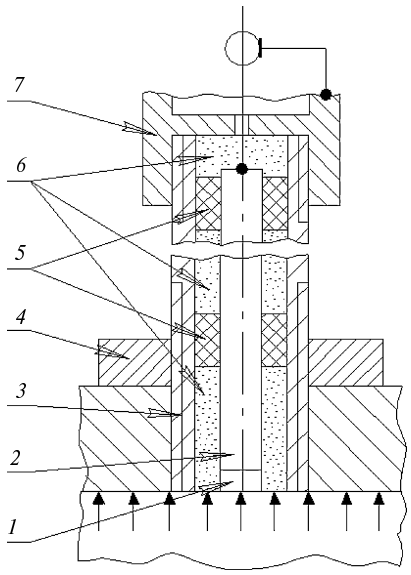


Рис. 1. Конструкция пьезоэлектрического датчика давления с акустическим стержнем:
1 — чувствительный элемент из пьезокерамики; *2* — акустический стержень; *3* — корпус датчика; *4* — контргайка; *5* — изоляционная прокладка; *6* — эпоксидная смола; *7* — втулка для крепления высокочастотного разъема

С точки зрения возможной повреждаемости датчика и ухудшения его работоспособности важно обеспечить электрический контакт на поверхности пьезокерамики, обращенной к среде, в которой измеряется давление. Наиболее целесообразный вариант такого контакта — пайка медной фольги толщиной 0,05–0,07 мм, которая обеспечивает также герметичность датчика. Последнее обстоятельство актуально в случае возможного контакта с водой, так как через развивающиеся в процессе работы микротрещины в эпоксидной смоле проникает вода, которая шунтирует высокоомное входное сопротивление согласующего устройства.

При амплитуде давления порядка 100 МПа датчик данной конструкции может выдержать, не разрушаясь, от единиц до несколько десятков разрядов. Отладка конструкции датчика обычно осуществляется при давлениях, составляющих 10–15 % от максимально допустимых, чтобы обеспечить достаточный ресурс работы, который может достигать несколько сотен разрядов.

Тарировка датчиков давления. Идентично изготавливаемые датчики из одинаковых материалов могут отличаться по чувствительности

на десятки процентов. Поэтому большое внимание было уделено разработке методики, оборудования и стендов для тарировки датчиков в условиях, которые максимально приближены к условиям измерения импульсных давлений. Широкий амплитудно-частотный диапазон работы датчиков потребовал разработки комплекса новых методов тарировки и их технического обеспечения.

Одним из наиболее легко реализуемых практически способов квазистатической тарировки пьезодатчиков давления является известный способ «скачка давления», когда к датчику резко прикладывается или сбрасывается давление. Для реализации данного способа предложено устройство [6]. Устройство включает контейнер с полиуретаном, в торец которого закрепляется тарируемый датчик, а подвижный плунжер выполнен в виде матрицы с разрушаемой мембраной. Под действием статического давления мембрана сначала пластически деформируется. Затем с момента достижения прогибом определенного уровня начинается процесс пластической неустойчивости, сопровождающийся резким увеличением скорости деформирования и заканчивающийся разрушением мембраны. Траверса гидравлического пресса, на котором осуществляется тарировка, из-за своей инерционности не успевает за этот короткий промежуток времени переместиться, и давление в контейнере резко падает, датчик скачком разгружается, что вызывает резкое изменение уровня сигнала на осциллографе и запуск его развертки. Величина перепада давления определяется по усилию гидравлического пресса до разрушения и после разрушения мембраны. Варьируя размер или толщину мембраны, можно получить тарировочную зависимость для требуемого диапазона давлений. Чтобы уменьшить погрешность тарировки за счет утечки заряда до момента достижения сигналом максимума, необходимо использовать в качестве материалов мембраны хрупкие нагартованные пружинные или инструментальные стали типа 65Г или У8А толщиной 0,05–0,5 мм. При этом, используя контейнер диаметром 50 мм, на прессе усилием 1 МН можно обеспечить тарировку с давлением до 500 МПа. Данное устройство позволяет не только тарировать датчик, но и определять постоянную времени измерительной цепи.

Существенный недостаток данной тарировки в том, что не проявляются свойства акустической системы, для которой тарировка — «квазистатическая». Поэтому для дублирования использовались способы и устройства, позволяющие проводить тарировку датчиков при параметрах давления, близки к параметрам измеряемого давления [7]. Сущность метода динамической тарировки заключается в следующем. Тарируемый датчик ввинчивается в диэлектрический корпус. На чувствительный элемент датчика оказывает давление фольга из хорошо проводящего материала, на которую действует импульсное магнитное поле индуктора, подключенного к магнитно-импульсной установке. В случае выбора достаточно тонкой фольги при разряде конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки на индуктор давление магнитного поля практически без искажения передается на чувствительный элемент тарируемого датчика давления, сигнал от которого регистрируется на осциллографе. Одновременно регистрируются напряженности магнитного поля, которые определяют тарировочное давление.

Также использовалось другое тарировочное устройство, в основе которого лежит создание усилия в бифилярной петле при протекании по ней импульсного тока [8]. Принцип работы данного устройства заключается в следующем. При прохождении сильного импульсного тока при разряде электроимпульсной установки через бифилярную петлю за счет встречного протекания токов возникают силы отталкивания, которые прижимают фольгу к тарируемому датчику. Оценка максимальной амплитуды создаваемого в этом случае давления дает величину порядка 5˚МПа.

Тарировка использованного в измерениях пьезоэлектрического датчика осуществлялась в диапазоне давлений 5–25 МПа. Коэффициенты чувствительности датчика давления при квазистатической тарировке составил $K_{d1} \cong$ $\cong$ 1,38 МПа/В. Коэффициент чувствительности датчика давления при динамической тарировке составили: при помощи индуктора $K_{d2} \cong$ $\cong$ 1,46 МПа/В; при тарировке при помощи бифилярной петли $K_{d3} \cong$ 1,41 МПа/В. Для обработки осциллограмм импульсного давления брался усредненный коэффициент чувствительности датчика $K_d \cong$ 1,4 МПа/В.

Измерение импульсного давления при ЭГИШ. Большое внимание уделялось проблеме уменьшению влияния электромагнитных наводок на полезный сигнал давления. С этой целью осуществ-

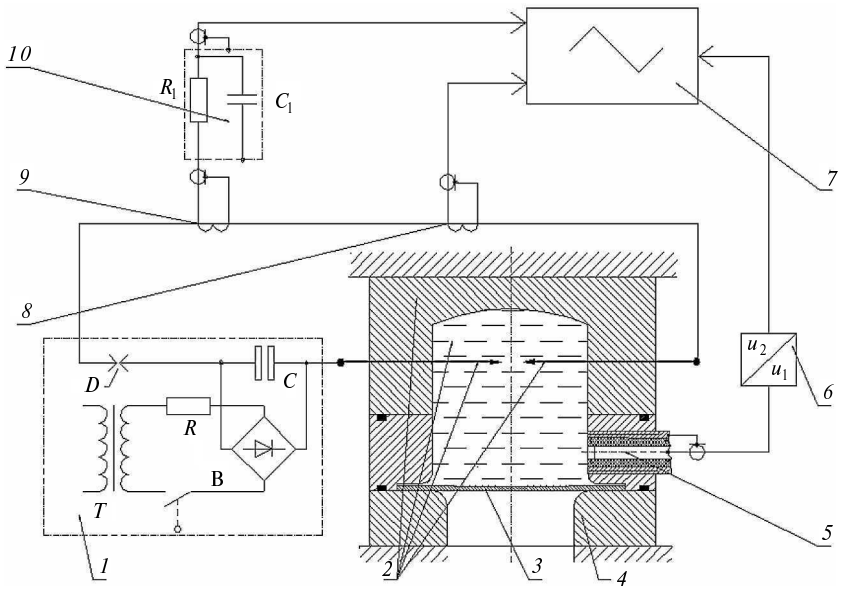


Рис. 2. Схема измерений при ЭГИШ:
1 — электроимпульсная установка; *2* — разрядная камера с рабочей жидкостью и электродами; *3* — тонколистовая заготовка; *4* — матрица; *5* — пъезоэлектрический датчик; *6* — высокоомный делитель импульсного напряжения; *7* — импульсный осциллограф; *8* — пояс Роговского для запуска развертки осциллографа; *9* — пояс Роговского для измерения импульсного тока; *10* — интегрирующая *RC*-цепочка

лялась развязка электропитания осциллографа и электроимпульсной установки. В момент измерений осциллограф питался от источника бесперебойного питания через высокочастотный фильтр. Дополнительно введением высокоомного шунта, установленного параллельно выходным зажимам электроимпульсной установки, удалось практически убрать всплески перенапряжения, характерные для начала процесса.

Величина сигнала электромагнитной наводки пропорциональна производной разрядного тока по времени и дает «всплеск» при начале разрядного тока. Поэтому в процессах ЭГИШ целесообразно совместно с давлением измерять разрядный ток. Измерение разрядного тока осуществлялось индуктивным методом при помощи пояса Роговского.

Учитывая большое напряжение сигнала от пьезодатчика, в качестве согласующего устройства использовали высокоомный широкополосной делитель импульсного напряжения.

Измерения осуществляли на электроимпульсной установке, имеющей следующие параметры: максимальное напряжение заряда конденсаторной батареи — 5,8 кВ; максимальная запасаемая энергия конденсаторной батареи — 9,7 кДж; емкость конденсаторной батареи — около 500 мкФ; собственная частота разрядного тока — 28 кгц; собственное сопротивление — менее 0,001 Ом.

Схема измерения импульсного давления при ЭГИШ показана на рис. 2. Измерения проводились при штамповке заготовки из латуни Л68 толщиной 0,24 мм с внешним диаметром 110 мм. Энергия заряда конденсаторной батареи составляла 2,8 кВ. Расстояние между электродами составляло 2,5 мм.

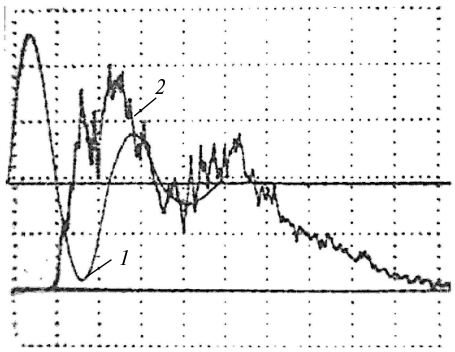


Рис. 3. Осциллограмма импульсного давления в разрядной камере (*1*, масштаб 1 В/дел.) и разрядного тока (*2*, масштаб 2 В/дел.), масштаб по времени — 50 мкс/дел

Пример осциллограммы импульсного давления в разрядной камере, полученной пьезоэлектрическим датчиком давления, представлен на рис. 3.

Характерная особенность осциллограммы давления — наличие биений на частоте, превышающей частоту тарирующего воздействия. Эти биения могут быть связаны с некоторым несовершенством акустической системы датчика или определяться физикой процесса электрогидроимпульсной листовой штамповки. Наводку от сильных электромагнитных полей можно увидеть в начале осциллограммы давления. Следует отметить низкий уровень сигнала наводки по сравнению с полезным сигналом.

Таким образом, получены характеристики импульсного давления в закрытой разрядной камере вблизи деформируемой заготовки при ЭГИШ, которые могут быть использованы при разработке компьютерной модели процесса. Конструкция пьзоэлектрического датчика импульсного давления, измерительная цепь, комплексная тарировка, методика измерений обеспечивают достоверность результатов измерений. Хорошая помехозащищенность датчика обеспечивает низкий уровень электромагнитных наводок. Результаты могут быть использованы также при исследовании других процессов импульсной штамповки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вагин, В.А.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов [Текст] / В.А. Вагин, Г.Н. Здор, В.С. Мамутов.— Минск: Наука и техника, 1990.– 208 с.

2. **Winkler, K.** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung [Текст] / K. Winkler.— Berlin: VEB VERLAG TECHNIK, 1973.— 456 с.

3. **Яффе, Б.** Пьезоэлектрическая керамика [Текст] / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе.— М.: Мир, 1974.– 288 с.

4. **Глозман, И.А.** Пьезокерамика [Текст] / И.А. Глозман.— М.: Энергия, 1972.– 288 с.

5. **А.С.1756784 СССР, МКИ GO1L 27/00** Датчик для импульсного давления. / В.А. Вагин, В.А. Кокорин В.С. Мамутов [и др.] / УлПИ.

6. **А.С.7697851 СССР, МКИ GO1L 27/00** Устройство для тарировки пьезоэлектрических датчиков давления. /К.Н. Богоявленский, В.А.Вагин, В.С. Мамутов, А.И. Орешенков / ЛПИ.

7. **А.С.577417 СССР, МКИ GO1L 27/00** Способ динамической тарировки датчиков давления и устройство для его реализации / К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин, В.С. Мамутов, А.И. Орешенков / ЛПИ.

8. **А.С.763709 СССР, МКИ GO1L 27/00** Устройство для динамической тарировки датчиков давления. / К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин, В.С. Мамутов, А.И. Орешенков / ЛПИ.

УДК 53.02

Т.В. Воробьева, А.И. Мелькер, С.А. Старовойтов

ТЕПЛОТА, ТЕМПЕРАТУРА, ЭНТРОПИЯ

Понятия и теории

«Все науки основываются на определенных понятиях. Понятие — это представление, получившее свое наименование. Примерами понятий являются пространство, время, энергия, поле, волна, частица, масса и т. п. Некоторые из понятий — это уточнения обычных представлений, которые познаются с помощью органов чувств, другие не являются таковыми. Но все они так или иначе связаны с практикой, хотя большая часть их недоступна прямому наблюдению. Не всегда понятия, которые точно определены, находятся в строгом соответствии с явлениями природы. Понятия могут отражать упрощенные приблизительные представления и, тем не менее, быть весьма полезными. Большое преимущество — это возможность выразить понятия в математической форме, иногда числом или рядом чисел.

С развитием науки одно понятие или группа понятий может уступить место другому, но это не оказывает существенного влияния на те знания, которые они описывают. Немногие из существующих ныне понятий истинны, им еще предстоит пройти испытание временем, и будет странно, если хоть одно из них сохранится без существенных изменений. Но вполне вероятно, что неизменными останутся наименования понятий и сфера их применения.

Понятия более фундаментальны, нежели теории, которые формулируются в терминах понятий. Теории в физике — это утверждения, обычно математические, о соотношении между определенными понятиями». Так характеризует понятия и теории [1] Джордж Паджет Томсон (George Pudget Thomson, 1892–1975), лауреат Нобелевской премии по физике 1937 года за экспериментальное открытие явления интерференции при отражении электронов от кристаллов. Самые простые и понятные определения, как правило, можно найти в справочниках и словарях. При этом следует обратить внимание на происхождение понятия, в особенности на то, что первоначально означало данное слово в языке, из которого оно перешло в науку. Так можно лучше понять смысл понятия.

К числу фундаментальных понятий относятся теплота, температура и энтропия. Первые два — суть уточнения обычных представлений, третье — более сложное понятие. Студенты нередко испытывают трудности, когда пытаются понять физический смысл этих понятий. В предлагаемой статье мы рассмотрим эволюцию этих понятий, смысл которых постоянно уточняется по мере развития физики. Следует подчеркнуть, что статья, хотя и содержит новый вывод уже известных формул, написана прежде всего с педагогической целью.

Температура и теплота

В словаре иностранных слов [2] дано следующее определение. Температура ⟨от лат. *temperatura* — состояние⟩ — степень нагретости тела (или его тепловое состояние), измеряемая при помощи особого прибора — термометра. В английском словаре Longman Dictionary of English Language and Culture дано такое же определение: temperature — the degree of heat and coldness of a place, object, etc. [3]. Такого же определения придерживается и автор [1]. В справочнике по физике [4] даны два определения. Температурой называется физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа. В энциклопедическом словаре [5] температура ⟨от лат. *temperatura* — надлежащее

смешение⟩ — это физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы.

В физическом энциклопедическом словаре [6] мы читаем: температура ⟨от лат. *temperatura* — надлежащее смешение, нормальное состояние⟩ — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Далее приводятся примеры того, какие свойства физических систем выражает температура, и в конце дается такая формулировка: в общем случае температура определяется как производная от энергии тела в целом по его энтропии. По-видимому, последнее взято из известного курса теоретической физики [7], где говорится следующее: величину, обратную производной энтропии тела по его энергии, называют его абсолютной температурой, или просто температурой.

Во многих книгах по статистической физике и статистической механике вообще нет определения температуры и теплоты. Редкие исключения составляют, например, [7–9]. В [7, 8] макроскопические величины делят на два класса: механические и тепловые (термодинамические). Последние появляются как результат чисто статистических закономерностей и не имеют смысла, если их применять к немакроскопическим системам. При этом температура представляет собой понятие, характеризующее не столько поведение отдельной молекулы или небольшой группы молекул, сколько состояние макроскопической системы в целом. В [9] температуру вводят как меру интенсивности теплового движения в телах, окружающих рассматриваемую систему.

Таким образом мы видим следующее:

1. Согласие во взглядах наблюдается лишь при обыденном представлении о температуре как степени нагретости тела.

2. Даже в отношении происхождения слова температура нет единого мнения.

3. Попытки придать физический смысл понятию температура на основе микроскопического подхода, когда заданными считаются не параметры тела, а характеристики отдельных частиц, из которых состоит тело, приводят к тому, что приходится вводить много новых понятий. В результате непонятное объясняется через еще более непонятное.

Прежде всего, попытаемся разобраться в происхождении слова температура. Температуру нельзя измерить непосредственно. Об изменении температуры судят по изменению физических свойств тел. Это — объем, давление, электрическое сопротивление, интенсивность излучения и т. п. Первые приборы для измерения температуры — термометры ⟨от греч. θερμη – жара, теплота и μετρεω — мерить, измерять⟩ — были созданы в конце XVI — начале XVII веков, а сам термин появился в 1636 году [5]. Удобными оказались термометры, в которых рабочим телом служили жидкости (ртуть, растворы спирта). Двум постоянным точкам (температура замерзания и температура кипения воды) разные исследователи [10] — Фаренгейт (Fahrenheit, 1686–1736), Реомюр (Réaumur, 1683–1757), Цельсий (Celsius, 1701–1744) — приписали разные числа. Как следствие, появились различные шкалы ⟨от лат. *scala* — лестница⟩, а единица измерения температуры — градус ⟨от лат. *gradus* — шаг, ступень⟩ — стала зависеть от шкалы.

Благодаря термометрам, в первой половине XVIII века начались количественные тепловые измерения [10]. Популярной была задача, которую предложил петербургский академик Г.В. Крафт (1744) в статье «Различные опыты с теплом и холодом», — определить температуру смеси двух порций жидкости, взятых при разных температурах. Отсюда, по-видимому, возникла трактовка температуры как явления, при котором происходит правильное смешение и возникает нормальное состояние. Однако ученые того времени еще не различали такие понятия, как температура и тепло, поэтому использовали различные термины: степень теплоты, количество теплоты, градус теплоты. Нередко эти термины обозначали одно и то же. Эксперименты по нагреванию и плавлению тел привели к пониманию того, что необходимо разграничить эти понятия, а также ввести дополнительные понятия.

В 1754–1755 годах шотландский химик Джозеф Блэк (1728–1799) обнаружил, что во время плавления льда, несмотря на приток тепла, термометр показывает одну и ту же температуру до тех пор, пока весь лед не растает [10, 11]. Блэк первым разграничил такие понятия, как температура и количество тепла. Он же ввел новые термины: теплоемкость (количество тепла, необходимое для нагревания тела на один градус) и скрытая теплота плавления. Однако единица количества теплоты — количество тепла, необходимое для повышения температуры

1 грамма воды на 1 градус Цельсия, — калория ⟨от лат. *calor* — жар, зной⟩ — была введена в науку лишь спустя почти сто лет (в 1852 году). В настоящее время совокупность методов измерения тепловых эффектов, которые сопровождают различные физические, химические и биологические процессы, называется калориметрией ⟨от лат. *calor* — жар, зной и греч. μετρεω — мерить, измерять⟩. Под термометрией понимают раздел физики, посвященный методам и средствам измерения температуры.

Наряду с экспериментальными исследованиями, делались попытки понять природу тепла. Лорд-канцлер при короле Якове I Стюарте Френсис Бэкон (Francis Bacon, 1561–1626) задумал создать обширное сочинение под названием «Великое восстановление», но успел написать только одну часть под названием «Новый органон» (1620). В этом сочинении Бэкон сформулировал правило, которое носит его имя [11]. По правилу Бэкона, «писать, говорить, размышлять и действовать без фактов, которые управляли бы мыслью, значит плавать без кормчего около опасных берегов, значит бросаться в неизмеримый океан без компаса и руля». Бэкон разделяет ученых своего времени на два класса: эмпириков и догматиков. Эмпирики <εμπερια — опыт, опытное знание, ремесло>, подобно муравьям, тащат в свою муравьиную кучу всевозможные факты. Догматики ⟨δογμα — учение, положение, мнение, постановление⟩, подобно пауку, ткут ткань из самих себя. Но в науке надо работать, как пчела: извлекать материал из внешнего мира и рационально его перерабатывать. Опираясь на свое правило, Бэкон пришел к выводу, что «тепло есть движение распространения, затрудненное и происходящее в малых частях».

Рене Декарт (René Descartes, латинизированное имя Renati Cartesius, 1596–1650) в своем главном труде «Начала философии» («Principia philosophiae», 1644) пишет, что «тело пламени состоит из мельчайших частиц, быстро и бурно движущихся отдельно одна от другой. Это движение называется то теплом, то светом. Все многообразие тепла, цвета и света происходит из-за различных видов движения. Частицы, которые вращаются наиболее быстро, дают нам ощущение красного света, те, что помедленнее, — желтого, а самое медленное вращение дает зеленый или голубой, причем порядок цветов соответствует расположению цветов радуги. Маленькие частицы имеются не в одном только огне, но они не прекращают своего движения и во всех остальных телах. Здесь их действие не столь сильно, а вследствие своей малой величины сами они не могут быть замечены ни одним из наших чувств».

Можно сказать, что Бэкон был предвестником теплопроводности, а Декарт — пирометрии и кинетической теории тепла. Пирометрия ⟨от греч. πυρ, πυρος – огонь, пламя и μετρεω — мерить, измерять⟩ — совокупность оптических (бесконтактных) методов измерения температуры.

Наряду с успехами физики в изучении тепла, большие успехи в начале XVIII века сделала химия, которой удалось объяснить горение и окисление тел. Кислород ⟨от греч. οξυ, γενος – кислый, острый, уксус и происхождение, род, рождение⟩ открыл шведский химик К. Шееле лишь в 1771 году, поэтому вначале объяснение строилось на основе представления о флогистоне. Считалось, что флогистон ⟨от греч. φλογεος – горящий, пылающий⟩ — особое летучее, невидимое и невесомое вещество, которое выделяется из тел при горении. По аналогии с флогистоном предположили, что существует особая жидкость, упругая и невесомая, которая переносит тепло от более нагретых частей тела к менее нагретым, — теплород.

На основе этой концепции Жан Батист Жозеф Фурье (Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) создал теорию распространения тепла в твердом теле. Фурье исходил из уравнения диффузии

$$\frac{1}{D}\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Здесь T температура; t — время; $D=k/(c\rho)$ — коэффициент термической диффузии; k — теплопроводность; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность. Фурье разработал метод разделения временной и пространственных переменных, в основе которого лежит представление функций тригонометрическими рядами. Эту работу он представил Парижской академии наук первый раз в 1807 году и улучшенный вариант — в 1811 году, когда академия объявила конкурс на лучшее описание диффузии тепла. Несмотря на то, что Фурье победил на конкурсе, его подход подвергся резкой критике со стороны Лагранжа ввиду отсутствия «строгости и общности», и статья не была опубликована. Фурье посчитал критику несправедливой и, расширив математическую

часть, превратил статью в книгу «Théorie analytique de la chaleur», которую опубликовал в 1822 году. В силу общности метода эта книга стала источником всех современных методов математической физики, относящихся к интегрированию уравнений в частных производных при заданных граничных условиях. Фурье планировал написать и другую книгу — «Théorie physique de la chaleur», посвященную физическим аспектам тепла, но это намерение осталось нереализованным [12].

Паровые машины и цикл Карно

Английская буржуазная революция 1640–1660 годов, а затем и аграрная революция второй половины XVIII века создали условия для промышленной революции [13]. В Англии было изобретено много машин, в основном прядильных и ткацких. Но развитию машинного производства мешало отсутствие универсального двигателя, который можно применять в любом месте, а не только там, где можно было использовать силу воды. Такой двигатель изобрел шотландец Джеймс Уатт (James Watt, 1736–1819). После нескольких лет упорного труда Уатт создал паровую машину двойного действия с вращающимся валом и сгустителем [11]. Эта машина могла приводить в движение много рабочих механизмов. Двойное действие означает, что, в отличие от предыдущих паровых машин, машина Уатта работает при движении поршня в цилиндре как в прямом, так и в обратном направлении; сгуститель (холодильник) экономил три четверти топлива по сравнению с машиной Ньюкомена. Машина Уатта не требовала отдыха и порой заменяла работу тысячи лошадей. С тех пор мощность машин стали измерять в лошадиных силах, а затем и в ваттах (1 л. с. равна 736 Вт).

Паровая машина стала основным двигателем промышленности. «Без изобретений Уатта британская нация не могла бы удовлетворить огромным издержкам на последние войны против Франции», — сказал тогдашний министр торговли Великобритании [11]. Однако теория паровой машины долгое время отсутствовала. Первый патент Уатт получил еще в 1769 году, но лишь в 1824-м вышла книга Сади Никола Леонарда Карно (S.N.L. Carnot, 1796–1832) «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». В ней Карно рассматривает не только паровые машины, а говорит о тепловом двигателе вообще [10]. «Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо изучить его независимо от какого-либо механизма, какого-либо определенного агента; надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело». Карно считал, что «возникновение движущей силы в паровых машинах обязано не действительной трате теплорода, а его переходу от горячего тела к холодному». Чтобы описать этот процесс, Карно ввел в учение о тепле понятие циклов.

Цикл Карно обычно представляют в виде диаграммы, которую, как и соответствующие расчеты, предложил Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (Benois Paul Émile Clapeyron, 1799–1864). В этих расчетах использовалось такое понятие как идеальный газ. Слово газ ввел в науку Ван Гельмонт (1577–1644), открывший углекислый газ ⟨предположительно от греч. χαος⟩. Понятие хаос в античности означало первичное, бесформенное состояние, бесконечное пространство, которое существовало до сотворения мира [14]. Идеальный газ — это модель газа, в которой не учитывается взаимодействие частиц. Для идеального газа справедливы следующие законы:

Бойля — Мариотта (R. Boyle, 1662; E. Mariotte, 1676) — $pV\big|_{T=\text{const}} = \text{const}$;

Гей-Люссака (J.L. Gay-Lussac, 1802) — $\frac{V}{T}\Big|_{p=\text{const}} = \text{const}$;

Шарля (J.A.C. Charles, 1787) — $\frac{p}{T}\Big|_{V=\text{const}} = \text{const}$.

Если считать эти законы независимыми, то состояние идеального газа будет зависеть от трех физических величин: давления p, объема V и температуры T. Клапейрон нашел уравнение состояния идеального газа, которое объединяет эти законы (1834). Сейчас его называют уравнением Клапейрона — Менделеева. Последний придал коэффициенту пропорциональности в уравнении Клапейрона смысл универсальной газовой постоянной R (Д.И. Менделеев, 1874) и уравнение приняло вид

$$pV = RT.$$

Таким образом, состояние идеального газа, определяется двумя величинами из трех, например p и V, т. е. точкой плоскости $p-V$. Если состояние меняется, то определяющая его точка (p,V) описывает кривую на плоскости $p-V$. Эта кривая называется диаграммой рассматриваемого процесса. Если идеальный газ возвращается в исходное состояние, то процесс является круговым процессом, или циклом, и диаграмма будет замкнутой кривой. Здесь идеальный газ служит моделью рабочего тела.

Цикл Карно осуществляется следующим образом (см. рисунок). Рабочее тело (пар в цилиндре под поршнем) получает от нагревателя при температуре T_1 количество теплоты Q_1; при этом пар, расширяясь, совершает работу (изотерма ab). Затем пар, расширяясь, охлаждается до температуры T_2 (адиабата bc) и вступает в тепловой контакт с холодильником. При этой температуре пар, сжимаясь, отдает холодильнику количество теплоты Q_2 (изотерма cd). После чего, сжимаясь, рабочее тело возвращается в исходное состояние (адиабата da). Таким образом, цикл Карно — это обратимый круговой процесс, в котором совершается превращение теплоты в работу. При постоянной разности температур $T_1 - T_2$ между нагревателем и холодильником рабочее тело совершает за один цикл Карно работу

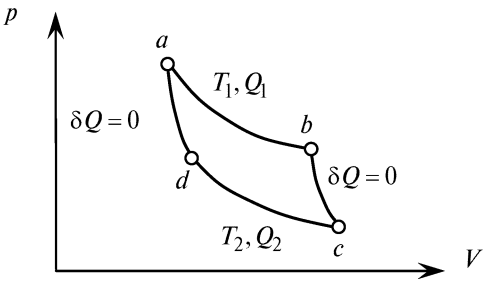
$$A = Q_1 - Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} Q_1.$$

Эта работа равна площади четырехугольника $abcd$.

Криволинейный интеграл и энтропия

Цикл Карно — это идеальный рабочий цикл теплового двигателя. Здесь два процесса — переход теплоты в работу и переход теплоты с более высокой температурой в теплоту с более низкой температурой — происходят последовательно. В действительности оба процесса идут одновременно. Например, в паровой машине Уатта поршень разделяет цилиндр на две части. В то время как пар над поршнем совершает работу изотермически, пар под поршнем, находясь в контакте со сгустителем, ведет себя адиабатически [11].

Чтобы сравнивать различные процессы, Рудольф Клаузиус (Rudolff Clausius, 1822–1888) сформулировал принцип эквивалентности превращений [10]. В соответствии с этим принципом «возникновение из работы количества тепла



Цикл Карно

Q с температурой T характеризуется эквивалентом Q/T». При этом Клаузиус предложил рассматривать произвольный циклический процесс как сумму очень большого числа элементарных циклов Карно [6].

Найдем количество тепла Q, необходимого для совершения работы. Для этого разобьем процесс на бесконечно малые элементарные процессы, соответствующие бесконечно малым изменениям величин p, V, T [15]. Если меняется только одна из этих величин, то количество тепла приближенно пропорционально приращению соответствующей переменной. Если меняются сразу три переменные, то по принципу наложения малых действий [16] полное приращение ΔQ равно сумме этих частных приращений:

$$\Delta Q \cong A\Delta p + B\Delta V + C\Delta T.$$

При изотермическом процессе ab приращение $\Delta T = 0$, а при адиабатическом процессе bc $C = 0$. Следовательно,

$$Q_1 = \sum \Delta Q = \int\limits_{abc} Adp + BdV.$$

Аналогично

$$Q_2 = \sum \Delta Q = \int\limits_{adc} Adp + BdV.$$

Для идеального газа в силу уравнения состояния $pV/T = Q/T = R$ эквиваленты двух превращений abc и adc равны, то есть

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2},$$

или

$$\int\limits_{abc} \frac{1}{T_1}(Adp + BdV) = \int\limits_{adc} \frac{1}{T_2}(Adp + BdV).$$

Последнее равенство означает, что криволинейный интеграл не зависит от пути интегрирования, так что это равенство справедливо для

любых температур T. При изменении направления кривой интегрирования интеграл меняет лишь знак [15], поэтому, заменив путь интегрирования *adc* во втором интеграле на *cda* и объединив оба интеграла, мы получим равенство Клаузиуса [6]

$$\oint \frac{1}{T}\left(Adp + BdV\right) = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

Независимость интеграла от пути интегрирования означает, что подынтегральное выражение является полным дифференциалом некоторой функции, то есть

$$\frac{\delta Q}{T} = dS.$$

Эту функцию Клаузиус ввел в 1865 году и назвал энтропией [10]. Название состоит из двух греческих слов — предлога εν (в) и существительного τροπη (поворот, перемена). Таким образом, этот термин означает скорее процесс (буквально — в повороте), чем функцию состояния. Выражение δQ не есть полный дифференциал, и чтобы подчеркнуть это отличие, используют символ вариации δ. Дифференциал d ⟨от лат. *differentia* — разность, различие⟩ — это главная линейная часть приращения функции. Понятие вариации ⟨от лат. *variatio* — изменение⟩ ввел в 1762 году Лагранж (Joseph Louis Lagrange) для обозначения малого отклонения величины от ее основного значения. Выражение $\delta Q / T$ называется приведенным количеством теплоты, причем обратная температура $1/T$ является интегрирующим множителем.

Теплота, молекулы и вероятность

Известно [14], что область науки, в которой масса накопленных знаний больше, чем в любой другой области, считается наукой первого ранга. Эта область с максимальной элитностью формирует взгляды и терминологию малых областей науки. В XVIII–XIX веках такой областью была механика, в которой интенсивно развивались аналитические методы решения задач, основанные на применении дифференциального и интегрального исчислений. По сравнению с механикой наука о тепле делала только первые шаги, поэтому использовала представления и терминологию механики.

Термодинамика как наука о наиболее общих свойствах макроскопических систем, находящихся в состоянии теплового равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями строилась по аналогии с механикой на основе принципов (начал), обобщающих многочисленные наблюдения. Эти принципы выполняются независимо от конкретной природы тел, составляющих систему, поэтому макроскопические теории тепла можно создать даже на основе представления о теплороде. Тем не менее ученые пытались понять, что представляет собой тепло.

Взгляды Бэкона и Декарта уточнялись и развивались [10]. Нельзя приписывать теплоту сгущению какой-то тонкой специально предназначенной материи. Теплота состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи (М.В. Ломоносов, 1711–1765). Тепло есть движение, изменившее свой вид; это движение частиц тела (Карно, 1796–1832). Теплота является либо vis viva (живой силой) весомых частиц, либо некоторым состоянием притяжения и отталкивания, способным порождать vis viva (живую силу). Теплоту можно создавать с помощью механической работы (Джеймс Прескотт Джоуль,1818–1889). Теплота представляет собой не вещество, а динамическую форму механического эффекта (Уильям Томсон, лорд Кельвин, 1824–1851).

Клаузиус тоже «пытался разобраться во внутреннем состоянии движения нагретого тела и составил себе об этом некоторое представление». Он рассматривал давление газа как результат удара молекулы о стенку. «Движение составных частиц молекулы и стенки приводит к взаимодействию этих внутренних движений. В зависимости от фаз, в которых находятся движения последних в момент удара, они могут различным образом повлиять на движение всей молекулы, возникающее в результате удара. Но для большого числа молекул в среднем дело обстоит так, как если бы молекулы отражались после удара о стенку согласно тем же законам, что и упругие шары от неподвижной стенки. При определении давления совершенно безразлично, если вместо среднего равенства допустить существование равенства при каждом ударе». Используя законы Ньютона, Клаузиус вычислил среднеквадратичную скорость молекул, среднюю длину свободного пробега молекулы, среднее число столкновений и связал эти величины с давлением газа [10].

Клаузиус ввел еще две гипотезы. «Молекулы газа настолько малы, что их объемом можно пренебречь по сравнению с объемом, занимаемым

всем газом. Они взаимодействуют, лишь находясь в непосредственной близости друг от друга. Они движутся во всех возможных направлениях, так что любое направление столь же вероятно, как и все прочие». Эту новую теорию газов Клаузиус назвал кинетической. Гипотезы Клаузиуса получили в дальнейшем название гипотезы идеального газа и гипотезы молекулярного хаоса.

Представления Клаузиуса и его предшественников развил Максвелл, который в работе «Пояснения к динамической теории газов» (1859) отметил, что из молекулярной гипотезы «может быть выведено много свойств материи, в особенности, если взять ее в газообразной форме». Максвелл вывел функцию распределения молекул по скоростям. В настоящее время ее записывают в виде [17]

$$f(\mathbf{v}) = N\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right).$$

Здесь N — число молекул; показатель экспоненты представляет собой безразмерное отношение кинетической энергии молекулы $mv^2/2$ к тепловой энергии kT; k — постоянная, равная отношению газовой постоянной R к числу Авогадро, которую Планк в честь Больцмана назвал его именем. Эту функцию можно получить разными способами [18].

Дадим современную трактовку первоначального доказательства Максвелла. Пусть у нас имеется газ, состоящий из N одинаковых молекул. Обозначим через $f(\mathbf{v})\,d\mathbf{v}$ число молекул, скорости которых лежат в интервале от $\mathbf{v}$ до $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$. Будем считать, что газ однороден и изотропен, а внешние силы отсутствуют. Однородность газа означает, что скорость любой молекулы не зависит от ее координат. В силу изотропности пространства, занимаемого газом, функция $f(\mathbf{v})$ не может зависеть от направления вектора $\mathbf{v}$ и, таким образом, является функцией лишь его абсолютной величины. Следовательно, $f(\mathbf{v}) = f(v^2)$, или в декартовых координатах

$$f(v^2) = f(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)\ .$$

Обозначим через $g(v_x^2)\,dv_x^2$ число молекул, скорости которых лежат в интервале $(v_x^2,\ v_x^2 + dv_x^2)$. В силу изотропности пространства

$$g\left(v_x^2\right) = g\left(v_y^2\right) = g\left(v_z^2\right).$$

Функции f и g пропорциональны вероятности того, что случайные величины примут соответственно значения v^2 и v_x^2, v_y^2, v_z^2. Для независимых случайных величин

$$f\left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right) = g\left(v_x^2\right) g\left(v_y^2\right) g\left(v_z^2\right).$$

Напишем полный дифференциал этой функции

$$df = \frac{\partial f}{\partial v_x^2}\,dv_x^2 + \frac{\partial f}{\partial v_y^2}\,dv_y^2 + \frac{\partial f}{\partial v_z^2}\,dv_z^2 =$$

$$= g\left(v_y^2\right) g\left(v_z^2\right) \frac{dg}{dv_x^2}\,dv_x^2 + g\left(v_x^2\right) g\left(v_z^2\right) \frac{dg}{dv_y^2}\,dv_y^2 +$$

$$+ g\left(v_x^2\right) g\left(v_y^2\right) \frac{dg}{dv_z^2}\,dv_z^2.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{\partial f}{\partial v_i^2} = g\left(v_j^2\right) g\left(v_k^2\right) \frac{d\,g\left(v_i^2\right)}{d\,v_i^2}, \qquad i,\ j,\ k = x,\ y,\ z.$$

Умножив обе части равенства на $g\left(v_i^2\right)$ и разделив на $f\left(v^2\right)$, получим

$$\frac{1}{f}\frac{\partial f}{\partial v_i^2} = \frac{1}{g\left(v_i^2\right)} \frac{d\,g\left(v_i^2\right)}{d\left(v_i^2\right)}, \qquad i = x,\ y,\ z.$$

Левая часть этого равенства зависит от v_x, v_y, v_z, а правая часть может зависеть либо только от v_x, либо только от v_y, либо только от v_z. Поскольку эти условия одновременно невыполнимы, это означает, что обе части равны одной и той же постоянной, которую мы обозначим β. Отсюда следуют три уравнения:

$$\frac{1}{g\left(v_i^2\right)} \frac{dg\left(v_i^2\right)}{dv_i^2} = \beta, \qquad i = x,\ y,\ z.$$

Интегрируя, получим

$$g\left(v_i^2\right) = A_i \exp\left(\beta v_i^2\right),$$

где A_i – постоянная. Таким образом,

$$f(v^2) = A \exp(\beta v^2)\ .$$

Постоянную интегрирования найдем из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v^2)d\mathbf{v} = N,$$

где N — число молекул; $d\mathbf{v} = v^2 \sin\theta\, d\theta\, d\varphi\, dv$. Следовательно,

$$\int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} v^2 f(v^2)\, dv =$$

$$= 4\pi A \int_0^{\infty} v^2 \exp\left(\beta v^2\right) dv = N.$$

Интеграл имеет физический смысл, если $\beta < 0$:

$$I = \int_0^{\infty} v^2 \exp\left(-\beta v^2\right) dv.$$

Найдем этот интеграл. Обозначим $v^2 = t$. Тогда $v = \sqrt{t}$, $dv = 1/2\sqrt{t}$ и интеграл примет вид

$$I = \frac{1}{2}\int_0^{\infty} t^{1/2} \exp(-\beta t)\, dt = \frac{\Gamma(3/2)}{2\beta^{3/2}}.$$

Поскольку $\Gamma(3/2) = (1/2)\,\Gamma(1/2)$, $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$, то $A = (\beta/\pi)^{3/2} N$. Следовательно,

$$f\left(v^2\right) = \left(\beta/\pi\right)^{3/2} N \exp\left(\beta v^2\right).$$

Чтобы найти постоянную β, нам необходима дополнительная информация. Это может быть уравнение, описывающее какое-либо свойство газа, и физическая модель явления, которая объясняет свойство на молекулярном уровне.

Возьмем, например, уравнение состояния идеального газа $pV = NkT$, где p — давление, V — объем, занимаемый газом, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Давление газа есть сила, приходящаяся на единицу площади сосуда, в котором находится газ. В свою очередь, сила — это изменение импульса молекул газа за единицу времени в результате их столкновения со стенкой сосуда. Предположим, что молекулы газа со скоростями в интервале от $\mathbf{v}$ до $\mathbf{v} = d\mathbf{v}$ сталкиваются со стенкой, перпендикулярной оси z. Масса стенки много больше массы молекулы, поэтому в данном случае система центра инерции совпадает с лабораторной системой. Для молекулы столкновение со стенкой сводится к изменению ее импульса на противоположный, т. е. молекула отскакивает от стенки без потери энергии. Изменение импульса за одно столкновение равно $2mv_z$, где m — масса молекулы. Число молекул, падающих на стенку в единицу времени, равно $(v_z/V) f(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$. Следовательно,

$$p = \frac{2m}{V}\int_{-\infty}^{\infty} v_z^2 f(\mathbf{v}) d\mathbf{v}.$$

Если система изотропна, то есть $v_x^2 = v_y^2 = v_z^2 = v^2/3$, и, кроме того, число молекул, движущихся по направлению положительной оси координат, равно числу молекул, движущихся в противоположном направлении, то

$$p = \frac{m}{3V}\int_{-\infty}^{\infty} v^2 f(\mathbf{v}) d\mathbf{v} =$$

$$= \frac{m}{3V} 4\pi A \int_0^{\infty} v^4 \exp(-\beta v^2) dv.$$

Интеграл $I = \int_0^{\infty} v^4 \exp\left(-\beta v^2\right) dv$ заменой переменной $v^2 = t$ сводится к гамма–функции:

$$I = \frac{1}{2}\int_0^{\infty} t^{3/2} \exp\left(-\beta t\right) dt = \frac{\Gamma(5/2)}{2\beta^{5/2}} = \frac{3\sqrt{\pi}}{2^3\beta^{5/2}}.$$

В результате уравнение состояния идеального газа примет вид

$$pV = N\frac{m}{2\beta}.$$

Следовательно, постоянная β определяется выражением $\beta = \frac{m}{2kT}$.

Теперь мы можем записать функцию распределения молекул по скоростям в виде

$$f(\mathbf{v}) = N\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right).$$

Здесь показатель экспоненты представляет собой безразмерное отношение кинетической энергии молекулы $mv^2/2$ к тепловой энергии kT. Полученная функция называется функцией распределения Максвелла (James Clerk Maxwell, 1859).

В соответствии с принятой моделью идеального газа мы можем записать эту функцию в виде произведения трех одинаковых функций распределения

$$g\left(v_i^2\right)=\sqrt[3]{N}\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(-\frac{mv_i^2}{2kT}\right),\ (i=x,\ y,\ z),$$

каждая из которых представляет собой нормальное распределение, или распределение Гаусса (Carl Friedrich Gauss, 1777–1855), [19, 20]. Сравнив функцию $f(v_i)$ с канонической формой распределения Гаусса, найдем дисперсию и среднее отклонение:

$$\sigma_i^2=kT/m;\ \ \eta=\sigma\sqrt{2/\pi}=\sqrt{2kT/\pi m}.$$

Эти величины дают нам среднеквадратичную скорость и среднюю скорость движения молекул вдоль осей координат:

$$\overline{v_i^2}=\frac{kT}{m};\ \overline{v_i}=\sqrt{\frac{2kT}{\pi m}}.$$

Обозначим $mv_i^2/2kT=u_i$. Тогда функция примет вид

$$g(u_i)=A_i\exp(-u_i),\qquad i=x,\ y,\ z.$$

Это — гамма-распределение с параметром $\alpha_i=1$ [20, 21] В результате свертки трех таких распределений мы снова получим гамма-распределение с параметром $\alpha=3$. При этом дисперсия увеличится в три раза, так что

$$\sigma^2=\overline{v^2}=\frac{3kT}{m}.$$

Таким образом, помимо формального определения температуры как интегрирующего делителя, мы можем сказать, что *температура — это величина, пропорциональная дисперсии функции распределения молекул идеального газа по скоростям.*

Молекулы, статистика и энтропия

Мы уже отмечали, что термодинамический подход не связан с какими-либо представлениями о тепловом движении. В свое время Джозайя Уилард Гиббс (Josiah Willard Gibbs, 1839–1903) превратил термодинамику из механической теории тепла в общую теоретическую схему, которую можно применить ко всем физическим и химическим процессам. Универсальность термодинамики привела к тому, что в науке сложились два направления: феноменологическое и атомистическое. Феноменологисты полагали, что задача науки состоит в описании явлений природы на основе экспериментально установленных принципов. В частности, «энергетики» считали энергию основным понятием науки, а такие понятия, как материя, сила, — производными и даже излишними. Что касается представления об атомах и молекулах, то Эрнст Мах (Ernst Mach, 1838–1916) и другие «энергетики» считали эти представления чистой фантазией.

Людвиг Больцман был сторонником атомистического подхода [10, 17]. Он отметил, что распределение Максвелла определяет вероятность того, что скорость частицы находится в интервале от $\mathbf{v}$ до $\mathbf{v}+\mathrm{d}\mathbf{v}$ при произвольном распределении по координатам. Больцман поставил перед собой обратную задачу — найти функцию, которая даст распределение частиц в пространстве при любом распределении по скоростям. Для идеального газа, находящегося во внешнем поле, Больцман получил формулу, которая дает плотность числа частиц в точке $\mathbf{r}$:

$$n(\mathbf{r})=n_0\exp\left(-\frac{U(\mathbf{r})}{kT}\right).$$

Здесь n_0 — плотность частиц в отсутствие внешнего поля; $U(\mathbf{r})$ — потенциальная энергия частицы во внешнем поле. Эта формула определяет распределение частиц идеального газа по координатам и называется распределением Больцмана (1868). Если объединить распределение Максвелла с распределением Больцмана, то мы получим совместное распределение, которое называется распределением Максвелла — Больцмана для классического идеального газа.

В 1877 году Больцман вводит гипотезу о том, что молекула газа может терять и приобретать только дискретные порции энергии, кратные некоторой наименьшей величине ε [10]. «Перед столкновением каждая из обеих сталкивающихся молекул имеет живую силу 0, или ε, или 2ε и т. д. Вследствие какой-то причины будет происходить то, что и после соударения никогда ни одна из сталкивающихся молекул не примет живой силы, не содержащейся в этом ряде». Считая, что это — фикция, которая облегчает математическую трактовку проблемы, Больцман ставит задачу: найти закон распределения, который позволяет определить, сколько молекул из обще-

го числа N обладает энергией 0, ε, 2ε, …. При этом предполагается, что молекулы, находящиеся в одном и том же энергетическом состоянии, неразличимы. Однако, когда молекула одного энергетического состояния меняется местами с молекулой другого энергетического состояния, возникает новая комплексия. Число комплексий n_i, которым можно реализовать данное состояние i, и определяет вероятность этого состояния. В силу сделанных предположений число способов распределения N частиц по энергетическим состояниям равно

$$W = \frac{N!}{n_0!n_1!n_2!\ldots}.$$

Предположим, что при тепловом равновесии разные микроскопически различимые распределения частиц по состояниям, обладающие одной и той же полной энергией, имеют одинаковую вероятность. Макроскопическому состоянию может соответствовать несколько микроскопически различных распределений, но наиболее вероятное макроскопическое состояние — такое, которому соответствует самое большое число W реализующих его микроскопически различных распределений.

Отметим, что в механике равновесие системы считается устойчивым, если потенциальная энергия системы минимальна. Таким образом, и в механике и в науке о тепле условием устойчивости служит экстремум некой характеристики системы.

Примем за такую характеристику не величину W, а логарифм этой величины $\ln W$, который равен

$$\ln W = \ln N! - \sum_i n_i!.$$

Для больших чисел n справедлива формула Стирлинга

$$\ln n! = n \ln n - n.$$

Применив ее, получим

$$\ln W = N \ln N - N - \sum_i \left(n_i \ln n_i - n_i\right).$$

Найти экстремум какой-либо функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ можно методом множителей Лагранжа (Joseph Louis Lagrange, 1797). Для этого [19] надо построить новую функцию L (функцию Лагранжа), добавив к старой функции уравнения связи $g_k(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0$ $(k = 1, 2, \ldots, m)$, умноженные на неопределенные множители α_k (множители Лагранжа), и найти ее экстремум без каких-либо дополнительных условий, считая переменные x_i, α_k независимыми. Таким образом, функция Лагранжа

$$L(x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m) =$$

$$= f(x_1, x_2, \ldots, x_n) + \sum_{k=1}^{m} \alpha_k g_k(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

представляет собой переменную величину, зависящую от нескольких функций, т. е. функционал, условие экстремума для которого $\delta L = 0$.

В нашем случае $f = \ln W$, ее вариация $\delta f = -\sum_i (\delta n_i) \ln n_i$. Кроме того, на систему наложены дополнительные условия (уравнения связи)

$$\sum_i n_i = N; \ \sum_i n_i \varepsilon_i = E,$$

где E — общая энергия. Вариации связей равны нулю:

$$\delta g_1 = \sum_i \delta n_i = 0, \ \delta g_2 = \sum_i (\delta n_i)\varepsilon_i = 0.$$

Таким образом, условие экстремума функции Лагранжа принимает вид

$$\delta L = \sum_i \delta n_i \left(\ln n_i - \alpha - \beta \varepsilon_i\right) = 0,$$

где α, β — множители Лагранжа. Вариации δn_i произвольны, поэтому члены в скобках должны равняться нулю:

$$\ln n_i - \alpha - \beta \varepsilon_i = 0.$$

Следовательно,

$$n_i = \exp\alpha \cdot \exp(\beta \varepsilon_i).$$

Из условия нормировки

$$\sum_i n_i = \exp\alpha \sum_i \exp\beta \varepsilon_i = N$$

выразим один из множителей Лагранжа через другой:

$$\exp\alpha = N / \sum_i \exp(\beta \varepsilon_i) = N / Z,$$

где $Z = \sum_i \exp(\beta \varepsilon_i)$ — сумма больцмановских множителей $\exp(\beta \varepsilon_i)$ по всем состояниям.

Предположим, что ε_i — кинетическая энергия молекулы газа. В этом случае n_i представляет собой функцию распределения Максвелла, для которой $\beta = 1/kT < 0$. Следовательно,

$$n_i = \frac{N}{Z}\exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{kT}\right),$$

где нормировочная постоянная Z называется статистической суммой, или суммой состояний (от нем. *Zustandsumme*). Такое распределение молекул идеального газа по различным состояниям называется распределением Больцмана (Ludwig Eduard Boltzmann, 1877).

В дальнейшем Больцман отступает от первоначальной квантовой гипотезы, которую он считал фикцией. Он заменяет сумму интегралом, величину n — функцией распределения f и вводит функцию H,

$$H = \int f \ln f \, d\mathbf{v},$$

где $\mathbf{v}$ — скорость молекулы. Это выражение представляет собой среднее значение $\ln f$.

Ранее (1872), рассматривая столкновения молекул неоднородного газа, Больцман вывел интегро-дифференциальное уравнение [17]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla f = \int (f' f_1' - f f_1)\, \sigma d\, \mathbf{v}_1.$$

В подынтегральном выражении f, f_1 обозначают функции $f(\mathbf{v})$, $f(\mathbf{v}_1)$, где $\mathbf{v}$, $\mathbf{v}_1$ соответственно скорости двух молекул до столкновения, а те же обозначения со штрихами — после столкновения; σ — сечение рассеяния. Используя это уравнение, Больцман доказал H-теорему [17], согласно которой

$$\frac{dH}{dt} \le 0.$$

Это означает, что функция H либо уменьшается со временем, либо остается постоянной. В дальнейшем Планк показал, что $S = -kH$. Таким образом, с помощью кинетического уравнения и статистики Больцман дал первое микроскопическое обоснование закона возрастания энтропии. Эта формула второго начала термодинамики высечена в качестве эпитафии на памятнике над могилой Больцмана.

Заключение и выводы

Подведем итоги. Вероятностный подход Максвелла приводит к выводу, что *температура — это величина, пропорциональная дисперсии функции распределения молекул идеального газа по скоростям.*

Статистика Больцмана устанавливает связь энтропии системы с функцией распределения. *Энтропия — это среднее значение логарифма функции распределения.*

Что касается связи теплоты с видами движения частиц системы, то этот вопрос во времена Больцмана остался на уровне гипотез.

Отметим, что судьба многих исследователей, пытавшихся понять природу теплоты и использовать тепло на практике, была далеко не безоблачной. Соломон де Кос, живший в то же время, что и Френсис Бэкон, предложил в 1615 году использовать силу пара для управления кораблями и экипажами и написал на эту тему книгу «Причина сил движущих». Он утверждал, что его открытие обогатит страну, которая согласится его принять. Его объявили сумасшедшим, поскольку он хотел «что-то делать из пара от кипятка», и заперли в сумасшедшем доме [11].

Противники Джеймса Уатта втянули его в судебную тяжбу, утверждая, что он изобрел только идеи. И хотя Уатт выиграл семилетний процесс, он с горечью писал: «В целом свете более всего я боюсь хищников в науках и искусствах. Они жестоко меня преследовали! Если бы у меня не было превосходной памяти, то их бесстыдство заставило бы меня думать, что я не сделал никаких улучшений в паровой машине. Подлецы, которым я был полезен, утверждали даже, что мои улучшения не только не заслуживают никакого внимания, но еще и вредны для народного богатства» [11].

Юлиус Роберт Майер (Julius Robert Mayer, 1814–1878) не только установил закон сохранения энергии для немеханических явлений (первое начало термодинамики), но и одним из первых определил механический эквивалент теплоты. Однако его статья (1841), в которой говорилось следующее — «Движение, теплота и, как мы намерены показать в дальнейшем, электричество представляют собой явления, которые могут быть сведены к одной силе, которые измеряются друг другом и переходят друг в друга по определенным законам», — пролежала 36 лет в письменном столе редактора журнала «Annalen der Physik» и так и не была опубликована. Более того, Майера травили в газетах, обвиняли в мании величия, подвергли принудительному лечению в психиатрической больнице. В 1850 году он пытался покончить жизнь самоубийством, выбросившись из окна, и на всю жизнь остался хромым [10].

Трагической оказалась и судьба Больцмана [17]. Больцман написал книгу под названием «Лекции по теории газов» (1896–1898). В предисловии говорилось: «До экспериментов Герца даже формулы максвелловской теории магнетизма ввиду их сложности зачастую считались бесполезными. Я надеюсь, что теория газов не встретит такого отношения! Было бы величайшей трагедией для науки, если теория газов на время будет предана забвению из-за случайно сложившегося враждебного отношения к ней. Я сознаю себя слабым одиночкой, который не может противостоять рутине времени. Однако я еще нахожу в себе силы придать теории газов такой вид, чтобы при ее возрождении в будущем не пришлось слишком много открывать заново». Нарастающий пессимизм довел Больцмана до самоубийства в 1906 году.

В двадцатом веке ситуация изменилась [10]. В 1912 году Лоренц (Hendrik Anton Lorenz, 1853–1928) отмечал: «Теперь уже нельзя сомневаться в существовании молекул. Реальность молекул стала фактом, почти что наблюдаемым непосредственно. Молекулы существуют для нас совершенно так же, как многие другие предметы, непосредственно нами не видимые. Австрийскому физику Больцману принадлежит честь первого успешного подхода к этой задаче и установление связи между понятием вероятности и термодинамическими функциями, в частности энтропией».

Следует подчеркнуть, что в настоящее время изменились и сами понятия теплоты, температуры и энтропии, подвергшись уточнению. Эту проблему мы рассмотрим в следующей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Томсон Д.** Дух науки [Текст] / Д. Томсон.— М.: Знание, 1970.— 176 с.

2. Словарь иностранных слов [Текст].— М.: ГИИНС, 1954.— 856 с.

3. Longman Dictionary of English Language and Culture [Текст].— Addison Wesley Longmans Limited.— Essex, England. 1992.— 1528 pp.

4. **Яворский, Б.М.** Справочник по физике [Текст] / Б.М. Яворский и А.А. Детлаф.— М.: Наука, 1965.— 848 с.

5. Новый иллюстрированный энциклопедический словарь [Текст].— М.: Большая Российская энциклопедия, 2000.— 912 с.

6. Физический энциклопедический словарь [Текст].— М.: Большая Российская энциклопедия, 1995.— 928 с.

7. **Ландау, Л.Д.** Статистическая физика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.— М.: Наука, 1964.— 568 с.

8. **Балеску, Р.** Равновесная и неравновесная статистическая механика. Том 1 [Текст] / Р. Балеску.— М.: Мир, 1978.— 406 с.

9. **Климонтович, Ю.Л.** Статистическая физика [Текст] / Ю.Л. Климонтович.— М.: Наука, 1982.— 608 с.

10. **Кудрявцев, П.С.** Курс истории физики [Текст] / П.С. Кудрявцев.— М.: Просвещение, 1974.— 312 с.

11. **Араго, Ф.** Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Том 2, 3 [Текст] / Ф. Араго.— Изд-во Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.— 464 с.

12. Dictionary of Scientific Biography [Текст] / Charles Coulston Gillispie, Editor in Chief.— New York: Charles Scribner's Sons, 1981.

13. Новая история. [Текст]: Часть 1 / Под ред. А.Л. Нарочницкого.— М.: Просвещение, 1972.— 720 с.

14. **Мелькер, А.И.** Ноофизика (Наука и ученые) [Текст] / А.И. Мелькер / Санкт-Петербургская академия наук по проблемам прочности.— 2006.— 152 с.

15. **Смирнов В.И.** Курс высшей математики. Т. 2 [Текст] / В.И. Смирнов.— М.: ГИИТТЛ, 1957.— 628 с.

16. **Смирнов, В.И.** Курс высшей математики. Т. 1 [Текст] / В.И. Смирнов.— М.: ГИИТТЛ, 1956.— 478 с.

17. **Исихара, А.** Статистическая физика [Текст] / А. Исихара.— М.: Мир, 1973.— 472 с.

18. Задачи по термодинамике и статистической физике [Текст] / Под ред. П.Т. Ландсберга.— М.: Мир, 1974.— 640 с.

19. Математический энциклопедический словарь [Текст].— М. Советская энциклопедия, 1988.— 848 с.

20. **Румшиский, Л.З.** Элементы теории вероятностей [Текст] / Л.З. Румшиский.— М.: Наука, 1970.— 256 с.

21. **Гнеденко, Б.В.** Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев.— М.: Наука, 1965.— 524 с.

УДК 530.12:517.988.38(075.8)

Н.Н. Горобей, А.С.Лукьяненко

К ВЕРОЯТНОСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Предмет обсуждения в статье — проблема вероятностной интерпретации релятивистской квантовой механики (РКМ) [1]. Эта проблема возникла уже в случае простейшего волнового уравнения для одной частицы — уравнения Клейна — Гордона (КГ)

$$\hat{F}\psi \equiv \left(\theta_\mu \partial_\mu^2 + \frac{m^2}{\hbar^2} \right) \psi = 0 \qquad (1)$$

(здесь скорость света полагаем равной единице; $\theta_\mu = (+1, -1, -1, -1)$ — сигнатура метрики Минковского, по повторяющимся индексам предполагается суммирование). Однако для ее решения пришлось отказаться от одночастичной задачи. В квантовой теории поля, которая заменила РКМ, динамическим объектом является не одна частица, а квантовое поле. Поводом вернуться к проблеме РКМ в данной статье послужила новая формулировка квантовой механики, основанная на квантовом принципе наименьшего действия (КПНД) [2]. В работе [3] обращено внимание на то, что КПНД позволяет решить проблему вероятностной интерпретации одночастичной РКМ за счет отказа от понятия волновой функции $\psi(x)$, рассматриваемой как решение уравнения (1). Вместо волновой функции вводится волновой функционал $\Psi[x(c)]$ на мировых линиях частицы $x_\mu(c), c \in [0, C]$ с фиксированными граничными точками $x_{0\mu} = x_\mu(0)$, $x_{1\mu} = x_\mu(C)$. Волновой функционал имеет естественную вероятностную интерпретацию на пространстве мировых линий. Однако в работе [3] не установлена связь новой конструкции с реальными измерениями, в частности остается неопределенным параметр C. Чтобы фиксировать C, нам придется изменить постановку задачи рассеяния введением волновых пакетов вместо асимптотических состояний в виде плоских волн, а также более внимательно отнестись к экспериментальным процедурам формирования начального состояния и детектирования частиц. Отметим, что и в нерелятивистской квантовой механике вероятностная интерпретация одночастичной задачи рассеяния требует введения волновых пакетов для асимптотических состояний [4]. В новом подходе к РКМ начальное и конечное состояния частицы задаются волновыми пакетами в пространстве Минковского. При этом описание эксперимента усложняется введением дополнительных параметров, характеризующих пространственно-временную форму пакетов (параметры когерентности). Рассматриваемая здесь одночастичная задача — первый шаг в постановке более сложной многочастичной задачи рассеяния, которая в рамках КПНД предполагает использование многовременной формулировки динамики [5, 6].

КПНД в релятивистской механике

Начнем рассмотрение с канонической формы классического действия свободной релятивистской частицы

$$I = \int_0^C \left(p_\mu \dot{x}_\mu - \theta_\mu p_\mu^2 + m^2 \right) dc, \qquad (2)$$

где, следуя Фоку [7], верхний предел интегрирования C будем рассматривать в качестве независимого динамического параметра. Этот параметр определяется из условия стационарности действия (2) после подстановки в него решения классических уравнений движения и оказывается пропорционален собственному времени движения частицы между заданными граничными точками:

$$C = \pm \frac{\sqrt{\theta_\mu \left(x_{1\mu} - x_{0\mu} \right)^2}}{2m}. \qquad (3)$$

В предлагаемом здесь подходе к РКМ параметр C также будет определен после решения всех динамических уравнений из условия стационарности квантового действия.

Отличие нового подхода от стандартного, прежде всего, в операторной реализации основных канонических переменных. Теперь вводим их операторную реализацию на пространстве волновых функционалов следующим образом:

$$\hat{x}_\mu(c)\Psi \equiv x_\mu(c)\Psi; \quad \hat{p}_\mu(c)\Psi \equiv \frac{\bar{\hbar}}{i}\frac{\delta\Psi}{\delta x_\mu(c)}, \quad (4)$$

где вариационная производная волнового функционала определяется равенством

$$\delta\Psi \equiv \int_0^C \frac{\delta\Psi}{\delta x_\mu(c)}\delta x_\mu(c)\,dc, \quad (5)$$

а постоянная $\bar{\hbar}$ отличается от «обычной» постоянной Планка $\hbar$. В частности, ее физическая размерность — Дж·с^2/кг (в соответствии с размерностью параметра c). Связь между этими двумя постоянными будет установлена ниже. Введем в пространстве волновых функционалов эрмитово скалярное произведение

$$(\Psi_1,\Psi_2) \equiv \int\prod_c d^4x(c)\bar{\Psi}_1[x(c)]\Psi_2[x(c)]. \quad (6)$$

Если выполнено условие нормировки $\|\Psi\| \equiv \sqrt{(\Psi,\Psi)} = 1$, волновой функционал $\Psi[x(c)]$ имеет естественную вероятностную интерпретацию: $|\Psi[x(c)]|^2$ есть плотность вероятности движения частицы по какой-либо мировой линии из малой окрестности $x(c)$. Операторы, определенные равенствами (4), формально эрмитовы относительно скалярного произведения (6).

Теперь сформулируем КПНД как основной динамический принцип, определяющий волновой функционал частицы, а также соответствующее квантовое действие. Введем оператор действия, заменив в (2) канонические переменные операторами (4):

$$\hat{I} \equiv \int_0^C \left[\frac{\bar{\hbar}}{i}\dot{x}_\mu(c)\frac{\delta}{\delta x_\mu(c)} + \bar{\hbar}^2\theta_\mu\frac{\delta^2}{\delta x_\mu^2(c)} + m^2\right]dc. \quad (7)$$

Этот оператор можно считать формально эрмитовым, если в первом слагаемом под знаком интеграла произведение некоммутирующих множителей симметризовано. КПНД формулируем в форме задачи на собственные значения для оператора действия:

$$\hat{I}\Psi = \Lambda\Psi. \quad (8)$$

Собственные значения Λ оператора действия, будучи вещественными, являются функцией граничных точек x_0, x_1, инвариантного параметра C, а также бесконечного набора параметров, определяющих квантовое состояние движения частицы. Соответствующий собственный функционал $\Psi[x(c)]$ также зависит от всех указанных параметров.

Для явного решения задачи (8) введем экспоненциальное представление волнового функционала

$$\Psi[x(c)] = \exp\left\{\frac{i}{\bar{\hbar}}S[x(c)] + R[x(c)]\right\} \quad (9)$$

и примем так называемое локальное приближение [2], в котором вещественные функционалы $S[x(c)], R[x(c)]$ имеют вид

$$S[x(c)] = \int_0^C s(c,x(c))\,dc, \quad (10)$$

$$R[x(c)] = \int_0^C r(c,x(c))\,dc. \quad (11)$$

Отметим, что искомое решение в локальном приближении является сингулярным, поскольку повторная вариационная производная в операторе действия (7) оказывается пропорциональной $\delta(0)$. Однако надлежащей регуляризацией КПНД в локальном приближении может быть сведен к волновому уравнению Шредингера [2]. Это достигается разбиением интервала $[0,C]$ на малые части равной длины $\varepsilon = C/n$ и аппроксимацией мировой линии частицы $x^\mu(c)$ ломаной с вершинами $x_k^\mu \equiv x^\mu(k\varepsilon)$. Тогда экспоненциальный функционал (9) может быть аппроксимирован произведением

$$\Psi \cong \prod_{k=1}^{n-1}\psi(k\varepsilon, x_k), \quad (12)$$

где обозначено

$$\psi(c,x) = \exp\chi(c,x),$$

$$\chi(c,x) \equiv \frac{i}{\hbar}s(c,x) + \varepsilon r(c,x) \quad (13)$$

и введено соотношение

$$\bar{\hbar} = \varepsilon\hbar. \quad (14)$$

В последующем предполагается предельный переход $\varepsilon \to 0$, в котором произведение εr следует рассматривать как единый символ. Формально этот предел не имеет смысла, поскольку $\tilde{\hbar} \to 0$, что является следствием сингулярности принятого нами локального приближения. Однако новая операторная реализация основных канонических переменных (4), как и оператор действия (7), имеют смысл в дискретной аппроксимации. В этой аппроксимации волновой функционал (12) является функцией многих переменных — координат вершин ломаной x_k, так что вариационная производная может быть аппроксимирована частной производной [8]

$$\frac{\delta\Psi}{\delta x^{\mu}(k\varepsilon)} \cong \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial\Psi}{\partial x_k^{\mu}}. \qquad (15)$$

Этим, в частности, достигается регуляризация выражения (7) для оператора действия. Результатом этих построений является равенство [2] (в пределе $\varepsilon \to 0$)

$$\frac{\hat{I}\Psi}{\Psi} = \frac{\hbar}{i}\chi\Big|_0^C + \int_0^C \frac{S\,\mathrm{ch}\psi\big(c,x(c)\big)}{\psi\big(c,x(c)\big)}dc, \qquad (16)$$

где

$$S\,\mathrm{ch}\psi\big(c,x(c)\big) \equiv i\hbar\frac{\partial\psi\big(c,x(c)\big)}{\partial c} - \hat{F}\psi\big(c,x(c)\big). \qquad (17)$$

Необходимым условием того, что правая часть (16) есть собственное значение оператора действия (7), является равенство нулю выражения (17) для любой мировой линии $x(c)$ частицы с фиксированными граничными точками. Это выполняется для любого решения $\psi(c,x)$ уравнения Шредингера

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial c} = \hat{F}\psi. \qquad (18)$$

При этом, если произведение некоммутирующих множителей в первом слагаемом под знаком интеграла в (7) симметризовано, собственное значение вещественно и равно

$$\Lambda = s\Big|_0^C, \qquad (19)$$

где s — (вещественная) фаза решения $\psi(c,x)$ уравнения (18), которое мы будем теперь называть волновой функцией. Таким образом, КПНД в данном случае сводится к волновому уравнению Шредингера (18) с инвариантным параметром $c \in [0,C]$ в качестве параметра времени, а квантовое действие (собственное значение оператора действия) определяется граничными значениями фазы волновой функции. Упомянутые выше параметры квантового движения частицы — это начальные данные задачи Коши для уравнения (18).

Понятие квантового действия впервые было введено Дираком [9], который отождествлял его с (комплексной) фазой волновой функции (13) $(\hbar/i)\chi$. Мы берем в качестве действия лишь вещественную часть этой фазы. Наша формулировка КПНД в форме задачи на собственные значения (8) в пространстве волновых функционалов отличается также от принципа наименьшего действия Швингера [10], который определяет квантовое действие как эрмитов оператор в пространстве волновых функций. Однако условия стационарности квантового действия относительно внутренних параметров динамической системы в данном случае будут идентичны.

Уравнение (18) может быть получено и без обращения к КПНД как результат формального применения стандартных правил квантования к классической теории, основанной на действии [2]. Такое квантование будет формальным, поскольку параметр c не является наблюдаемым. Это уравнение также возникает на промежуточном этапе определения пропагатора Фейнмана релятивистской частицы [11, 12], причем на заключительном этапе предполагается интегрирование по длине промежутка времени C. Однако в рамках КПНД интегрирование волновой функции по параметру C не имеет смысла, поскольку результат интегрирования теряет связь с волновым функционалом и возможность вероятностной интерпретации. Вместо этого мы фиксируем параметр C с помощью дополнительного условия стационарности квантового действия. Таким образом, КПНД в данном случае позволяет связать решения уравнения (18) с реальными измерениями.

Вероятностная интерпретация волнового функционала $\Psi[x(c)]$, очевидно, порождает вероятностную интерпретацию волновой функции: $|\psi(c,x)|^2$ есть плотность вероятности того, что в заданный момент «внутреннего времени» c частица будет зарегистрирована в окрестности точки x пространства Минковского. Это вероятностная мера не имеет прямого физического смысла, пока

не установлена ее связь с измерениями. Мы «привяжем» инвариантный параметр времени c к измерениям следующим образом: будем трактовать $c = 0$ как момент возникновения свободной частицы, а $c = C$ как момент ее исчезновения. До момента $c = 0$ частица находилась в связанном состоянии в источнике (например, электрон в катоде), а после момента $c = C$ она опять попадает в связанное состояние в детекторе (цилиндр Фарадея). Таким образом, параметр C можно отождествить со временем жизни свободной частицы.

Вероятностная интерпретация РКМ

Вероятностная интерпретация волновой функции в квантовой механике обоснована дифференциальным законом сохранения вероятности, который является следствием уравнения Шредингера. В нашей теории величина $|\psi(c,x)|^2$ также подчиняется дифференциальному закону сохранения, который следует из (18). Эта вероятность «течет» в пространстве Минковского, а не в обычном пространстве. Чтобы связать ее с реальными процессами в пространстве — времени, фиксируем время жизни частицы C с помощью условия стационарности квантового действия. Тогда амплитуда перехода между начальным и конечным состояниями частицы будет выражена через наблюдаемые величины. Само квантовое действие мы определим ниже как (вещественную) фазу этой амплитуды перехода.

В предыдущем разделе квантовое действие для произвольного решения $\psi(c,x)$ уравнения Шредингера (18) мы определили как разность фаз (19) при заданных начальных данных задачи Коши. Здесь мы подправим это формальное определение, взяв вместо решения задачи Коши комплексную амплитуду перехода частицы из данного начального состояния $\psi_{in}(x_0)$ в источнике в заданное конечное состояние $\psi_{out}(x_1)$ в детекторе. Мы рассматриваем детектирование частицы как редукцию ее волновой функции $\psi(C,x)$ в состояние, отвечающее детектору:

$$A \equiv \langle \psi_{out} | \psi_{in} \rangle_C = \langle \psi_{out} | e^{-\frac{i}{\hbar}\hat{F}C} | \psi_{in} \rangle . \qquad (20)$$

Имеющаяся в (20) симметрия между начальным и конечным состояниями потребуется в дальнейшем при рассмотрении процессов аннигиляции.

Теперь зададим начальное и конечное состояния частицы. Частица высвобождается из источника в результате процесса (например, электронная эмиссия в катоде), который локализован в конечной области пространства — времени. Сопоставим ее начальному состоянию гауссов волновой пакет в пространстве Минковского

$$\psi_{in}(x_0) = $$

$$= A_0 \exp\left[-\frac{(x_{0\mu} - X_{0\mu})^2}{2\sigma_{0\mu}^2} - \frac{i}{\hbar}\theta_\mu p_{0\mu} x_{0\mu} \right]. \qquad (21)$$

Согласно (21) частица возникает в области пространства — времени, имеющей форму эллипсоида вращения (в фиксированной системе отсчета) с центром в точке $X_{0\mu}$. Пространственно-временные размеры $\sigma_{0\mu}$ эллипсоида являются параметрами когерентности начального состояния (21). Такое состояние может возникнуть, например, на выходе коллимационного отверстия в экране, окружающем источник частиц. В импульсном представлении это состояние также является гауссовым пакетом с центром в точке $p_{0\mu}$ и с минимальными из допускаемых принципом неопределенности размерами $\hbar/\sigma_{0\mu}$. Можно назвать это состояние волной Де-Бройля с импульсом $p_{0\mu}$ и параметрами когерентности $\sigma_{0\mu}$. В соответствии с требованием симметрии конечное состояние следует параметризовать таким же образом. В этом случае для амплитуды перехода (20) получаем представление

$$\langle \bar{\psi}_{out} | \bar{\psi}_{in} \rangle_C = $$

$$= A_0 A_1 \int d^4 p \exp\left[-\frac{i}{\hbar}\theta_\mu p_\mu^2 C + \frac{i}{\hbar} m^2 C + \right] \times$$

$$\times \exp\left\{ -\frac{(\sigma_{0\mu}^2 + \sigma_{1\mu}^2)}{2\hbar^2} \left(p_\mu^2 - 2 p_\mu \frac{\sigma_{0\mu}^2 p_{0\mu} + \sigma_{1\mu}^2 p_{1\mu}}{\sigma_{0\mu}^2 + \sigma_{1\mu}^2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{i}{\hbar}\theta_\mu p_\mu \Delta X_\mu \right\}, \qquad (22)$$

где $\Delta X_\mu \equiv x_{1\mu} - x_{0\mu}$. Первая экспонента под знаком интеграла в (22) — это оператор эволюции для уравнения (18), записанный в импульсном представлении. Однако в нашей статье равноправие начального и конечного состояний мы

нарушим, полагая $\sigma_{1\mu} << \sigma_{0\mu}$. Процесс детектирования частицы (если мы говорим о частице) не должен занимать большой области в пространстве — времени. В этом случае амплитуда перехода совпадает с решением уравнения (18), и ее окончательный вид таков:

$$\left\langle \tilde{\Psi}_{out} \middle| \tilde{\Psi}_{in} \right\rangle_C = A\left(\prod_{\mu} \sqrt{1 + 2i\hbar \frac{\theta_\mu C}{\sigma_{0\mu}^2}} \right) \times$$

$$\times \exp\left[\frac{\sigma_{0\mu}^2}{2\hbar^2} \frac{\left(p_{0\mu} + i\hbar \frac{\theta_\mu \Delta X_\mu}{\sigma_{0\mu}^2} \right)^2}{1 + 2i\hbar \frac{\theta_\mu C}{\sigma_{0\mu}^2}} + \frac{i}{\hbar} m^2 C \right]. \quad (23)$$

Множители, не зависящие от параметров ΔX_μ и C, мы включили в общую нормировочную константу A. В показателе экспоненты по-прежнему предполагается суммирование по пространственно-временному индексу μ.

Таким образом, в этой схеме эксперимента корпускулярно-волновой дуализм отражен в полной мере: приготовляем в источнике волну Де-Бройля, а детектором регистрируем частицу. Вероятность этого процесса равна квадрату модуля амплитуды (23) при условии, что определено время жизни частицы C. Роль квантового действия для нашего эксперимента играет (вещественная) фаза этой амплитуды

$$\Lambda = -\left[\frac{\hbar}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\hbar\theta_\mu C}{\sigma_{0\mu}^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(\theta_\mu p_{0\mu}^2 - \hbar^2 \frac{\theta_\mu \Delta X_\mu}{\sigma_{0\mu}^4} \right) C - \theta_\mu p_{0\mu} \Delta X_\mu}{1 + 4\hbar^2 \frac{C^2}{\sigma_{0\mu}^4}} \right] + m^2 C. \quad (24)$$

Классический предел квантового действия $(\hbar = 0)$ совпадает с исходным классическим действием (2) частицы, движущейся с постоянным 4-импульсом p_0 между заданными граничными точками:

$$\Lambda_0 = \theta_\mu p_{0\mu} \Delta X_\mu - \left(\theta_\mu p_{0\mu}^2 - m^2 \right) C. \quad (25)$$

Условие стационарности классического действия (25) относительно C дает классическое уравнение связи для начального импульса частицы

$$H_0 \equiv \theta_\mu p_{0\mu}^2 - m^2 = 0, \quad (26)$$

выполнение которого вначале не требовалось. В классической релятивистской механике уравнение (26) позволяет определить C, если воспользоваться соотношением

$$p_{0\mu} = \frac{\Delta X_\mu}{2C}. \quad (27)$$

В квантовой теории соотношение (27) в точном виде отсутствует, но оно может быть получено как результат нашего эксперимента. Действительно, вещественная часть амплитуды (23) пропорциональна экспоненте

$$\exp\left[-\frac{\left(\Delta X_\mu - 2C p_{0\mu} \right)^2}{2\left(\sigma_{0\mu}^2 + 4\hbar^2 C^2 / \sigma_{0\mu}^2 \right)} \right], \quad (28)$$

откуда следует, что максимальной вероятность регистрации частицы будет для тех детекторов, для которых вектор ΔX_μ удовлетворяет соотношению (27). Тогда в классическом пределе для времени жизни частицы C получаем требуемое выражение (3).

Однако, полное квантовое действие (24) все же позволяет однозначно определить C с помощью условия стационарности

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial C} = 0 \quad (29)$$

без обращения к каким-либо дополнительным уравнениям движения. Пользуясь его квазиклассическим разложением (24), или

$$\Lambda = \Lambda_0 + \hbar^2 \Lambda_2 + \ldots, \quad (30)$$

где

$$\Lambda_2 = -\left[4\left(\theta_\mu p_{0\mu} \Delta X_\mu - \theta_\mu p_{0\mu}^2 C \right) \frac{C^2}{\sigma_{0\mu}^4} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\theta_\mu}{\sigma_{0\mu}^2} - \frac{\theta_\mu \Delta X_\mu^2}{\sigma_{0\mu}^4} \right) C \right], \quad (31)$$

находим в нулевом порядке по $\hbar$ стационарное значение C:

$$C = \frac{8\sum\limits_{\mu}\frac{\theta_\mu p_{0\mu}\Delta X_\mu}{\sigma_{0\mu}^4} \pm \sqrt{D}}{24\sum\limits_{\mu}\frac{\theta_\mu p_{0\mu}^2}{\sigma_{0\mu}^4}}, \qquad (32)$$

где

$$D \equiv 64\left(\sum_{\mu}\frac{\theta_\mu p_{0\mu}\Delta X_\mu}{\sigma_{0\mu}^4}\right)^2 -$$

$$-48\left(\sum_{\mu}\frac{\theta_\mu p_{0\mu}^2}{\sigma_{0\mu}^4}\right)^2\left(\sum_{\mu}\theta_\mu\left(\frac{\Delta X_\mu^2}{\sigma_{0\mu}^4}-\frac{1}{\sigma_{0\mu}^2}\right)\right). \qquad (33)$$

Здесь мы впервые явно используем знак суммирования по индексу μ. Для выбора знака в (32) можно использовать классический предел (3). Если детекторы достаточно удалены от источника частиц, так что

$$\sum_{\mu}\theta_\mu\frac{\Delta X_\mu^2}{\sigma_{0\mu}^4} >> \left|\sum_{\mu}\theta_\mu\frac{1}{\sigma_{0\mu}^2}\right|, \qquad (34)$$

и выполняется классическое соотношение (27) (а это является следствием эксперимента), то при выборе знака + в (32) получим правильный классический предел (3). Квантовые поправки для параметра C получим, учитывая следующие члены разложения квантового действия (24). Найденное таким образом значение C следует подставить в исходную амплитуду перехода (23), которая становится функцией только динамических параметров частицы в данном эксперименте: $\mathrm{A} = \mathrm{A}(p_0, \Delta X)$.

Посмотрим, что получится в нерелятивистском пределе для амплитуды перехода $\mathrm{A} = \mathrm{A}(p_0, \Delta X)$. Полагая в (32) $p_{00} \approx m$, $p_{0k} \approx 0$ и $\Delta X_0 >> |\Delta X_k|$, получим

$$C \approx \frac{\Delta X_0}{2m},$$

т. е. время жизни частицы в этом пределе пропорционально обычному промежутку времени между граничными точками ее мировой линии. В этом же приближении в показателе экспоненты (28) пренебрегаем слагаемым с $\mu = 0$ и получаем волновой пакет, распространяющийся с течением обычного времени в обычном трехмерном пространстве. Фаза волнового пакета согласно (25) в этом пределе равна $m\Delta X_0$, поэтому его динамика подчиняется уравнению Шредингера с гамильтонианом

$$\hat{H} = -\left(m + \frac{\hbar^2}{2m}\Delta\right),$$

как и должно быть.

Возвращаясь к нашей основной задаче, завершим описание эксперимента. Как это принято, например, в низковольтной электронографии, поместим источник частиц внутрь экрана E больших размеров, так что соотношение (34) заведомо выполнено. Таким образом, источник, характеризуемый также временным параметром процесса испускания частицы σ_{00}, целиком заключен в пространственно-временном цилиндре бесконечной протяженности в направлении оси времени x_0. Экран плотно «заставим» детекторами, так что частица, возникшая в источнике, рано или поздно будет зарегистрирована одним из них. Наша уверенность в этом основана на упомянутом выше законе сохранения вероятности. Эволюция волнового пакета, возникшего при $c = 0$ в источнике, описывается экспонентой (28): его центр движется по прямой

$$X_k(c) = X_{0k} + \frac{p_{0k}}{m}c$$

в трехмерном пространстве, а сам пакет расплывается. Таким образом, пакет «покидает» упомянутый цилиндр с течением времени c. Это можно выразить иначе: вероятность того, что мировая линия частицы, имеющая начало в районе источника, будет оставаться в пределах цилиндра, стремится к нулю при $c \to \infty$. Остается только соответствующим образом нормировать амплитуду $\mathrm{A}(p_0, X_1)$:

$$\int_E d\Omega \int_0^\infty dX_{10}\,|\mathrm{A}|^2 = 1, \qquad (35)$$

где первый интеграл берется по угловым переменным на поверхности экрана E, а второй интеграл — по всему времени ожидания срабатывания какого-либо детектора. Обратим вни-

мание, что время — равноправный (вместе с пространственными координатами) параметр полученного распределения вероятности. Сходимость интеграла по временной переменной X_{10} обеспечена множителем перед экспонентой в (23), который убывает пропорционально $\sim X_{10}^{-2}$ при $X_{10} \to \infty$, поэтому условие нормировки (35) имеет смысл. После этого квадрат модуля амплитуды $\left|\mathrm{A}\left(p_0, X_1\right)\right|^2$ мы принимаем в качестве плотности вероятности срабатывания какого-либо детектора на поверхности экрана (когда-либо).

Мы рассмотрели в данной работе простейшую задачу движения свободной релятивистской частицы. Движение во внешнем электромагнитном поле описывается действием

$$I = \int_0^C \left(p_\mu \dot{x}_\mu - \theta_\mu \left(p_\mu - eA_\mu \right)^2 + m^2 \right) dc \,. \qquad (36)$$

Формулировка КПНД и постановка соответствующей задачи рассеяния для действия (36) не вызывают принципиальных затруднений и могут быть реализованы с помощью теории возмущений по заряду e. Принципиальный интерес для формулировки КПНД представляет задача взаимодействия релятивистской частицы с квантованным электромагнитным полем. Она будет рассмотрена в рамках обобщенной канонической формулировки многовременной динамики [5] в следующей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бъеркен, Дж.Д.** Релятивистская квантовая теория. Т. 1 [Текст] / Дж.Д. Бъеркен, С.Д. Дрелл.— М.: Наука, 1978. — 295 с.

2. **Gorobey, N.N.** On a New Form of Quantum mrchanics (II) [Текст] / N.N. Gorobey, A.S. Lukyanenko, I.A. Lukyanenko.— arXiv:0912.3095v1[quant-ph].— 3 p.

3. **Gorobey, N.N.** Quantum Action Principle in Relativistic Mechanics [Текст] / N.N. Gorobey, A.S. Lukyanenko /arXiv:0812.1336 [quant-ph].— 3 p.

4. **Фаддеев, Л.Д.** Лекции по квантовой механике для студентов-математиков [Текст] / Л.Д. Фаддеев, О.А. Якубовский.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.— 199 с.

5. **Gorobey, N.N.** Generalized Canonical Form of a Multi-Time Dynamical Theory and Quantization [Текст] / N.N. Gorobey, A.S. Lukyanenko, I.A. Lukyanenko /arXiv:0910.2157v1 [quant-ph].— 5 p.

6. **Gorobey, N.N.** Two-Time Quantum Mechanics [Текст] / N.N. Gorobey, A.S. Lukyanenko, I.A. Lukyanenko /arXiv:1003.2830v1[quant-ph].— 5 p.

7. **Фок, В.А.** Работы по квантовой теории поля [Текст] / В.А. Фок.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1957.— 157 с.

8. **Фейнман, Р.** Квантовая механика и интегралы по траекториям[Текст] / Р. Фейнман, А. Хибс.— М.: Мир, 1968, 382 с.

9. **Дирак, П.** Принципы квантовой механики [Текст] / П. Дирак.— М.: Наука, 1979.— 479 с.

10. **Швингер, Ю.** Теория квантованных полей [Текст] / Ю. Швингер.— М.: Изд-во иностранной литературы, 1956.— 252 с.

11. **Де Витт, Б.С.** Квантовая гравитация: новый синтез [Текст] / Б.С. де Витт // Сб.: Общая теория относительности / Под ред. С. Хокинга и В. Израэля.— М.: Мир, 1983.— С. 296–362.

12. **Govaerts J.** A note on the Fradkin–Vilkovisky theorem [Текст] / J.Govaerts // CERN-TH.5010/88.— 1988. — 21 p.

13. **Дирак, П.А.М.** К созданию квантовой теории поля [Текст] / П.А.М. Дирак. — М.: Наука, 1990. — 366 с.

УДК 539.3

В.А. Пальмов

К ДВУХСОТЛЕТИЮ ФОРМУЛЫ КОШИ

В этой заметке речь будет идти о формуле, дающей представление вектора внутренних напряжений $\boldsymbol{\tau}$ на элементарной площадке в деформирующейся сплошной среде:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}. \qquad (1)$$

Здесь $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к площадке, а $\mathbf{T}$ — тензор напряжений.

Формула была выведена Огюстеном Луи Коши немногим меньше двухсот лет тому назад, а именно в 1827 году (об этом сказано в [1]). В то время Коши преподавал в Политехнической школе и в Коллеж де Франс [2].

Эта формула является фундаментальной для механики деформирующейся сплошной среды. Она служит основанием для введения в механику такого важного понятия, как тензор напряжений. Коши вывел ее, рассматривая равновесие элементарного тетраэдра, выделенного из сплошной среды. Рассуждения Коши о равновесии тетраэдра настолько убедительны и безупречны, что вот уже почти двести лет они воспроизводятся в книгах по механике деформирующейся среды и по ее частной области — теории упругости. Читатель найдет их в изданных книгах, например [3]. Встретит он их и в книгах, вышедших совсем недавно [4–7]. Само собой разумеется, он встретит их в книгах девятнадцатого века.

Такая удивительная живучесть рассуждений Коши вызывает неподдельное восхищение гениальностью их автора. Вместе с тем в стройном хоре восхищения в последнее время появляются и нотки сомнения. Так в книге [8] читаем: «Простой, но не самый убедительный вывод формулы (1) основан на балансе сил для малого тетраэдра, три грани которого параллельны координатным плоскостям $x_i = \text{const}$, а наклонная четвертая грань имеет нормаль **n**».

К. Труселл в [9] также высказывает сомнение в убедительности рассуждений Коши о тетраэдре и приводит альтернативное. По моему мнению, тоже его нельзя признать убедительным. Я должен отметить, что сомнение вызывает не сама формула Коши, а метод ее вывода. Более того, этот вывод нельзя признать доказательством. Итак, сомнения появились! Попытаюсь сформулировать, в чем они состоят.

Во-первых, неужели рассуждение Коши о равновесии тетраэдра — это единственный путь в этой трудной области механики?

Во-вторых, ведь это частный случай равновесия, жестко привязанный к вполне определенной фигуре тела, а именно — к тетраэдру.

В предлагаемой заметке приводится альтернативный и, как представляется, более простой, чем у Коши, способ получения формулы. Второе обстоятельство, на которое следует обратить внимание: этот способ никак не привязан к вполне конкретной форме тела, не привязан к тетраэдру.

Чтобы разобраться во всех поставленных вопросах, привожу ниже основные классические положения теории напряжений, которые принимал и использовал Коши и которые принимаются и используются сейчас. Кроме того, мы с вами, дорогой читатель, не будем ограничиваться только статикой, как это делал Коши, а будем рассматривать динамику.

1. Рассматриваем произвольный кусок сплошной среды в актуальном состоянии в произвольный момент времени t. Полагаем, что интегральные уравнения динамики этого куска имеют вид

$$\int_s \boldsymbol{\tau}\, ds + \int_v \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) dv = 0; \tag{2}$$

$$\int_s \mathbf{r} \times \boldsymbol{\tau}\, ds + \int_v \mathbf{r} \times \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) dv = 0. \tag{3}$$

Здесь v — объем, занимаемый выбранным куском среды в момент времени t, а s — ограничивающая его поверхность; $\mathbf{F}$ — массовая сила; $\dot{\mathbf{v}}$ — ускорение точек среды; ρ — массовая плотность; $\mathbf{r}$ — эйлерова координата материальной точки.

Уравнения (2) и (3) — это классические интегральные уравнения динамики сплошной среды. В них не учитываются моментные напряжения, массовые моменты и, наконец, независимые от перемещений повороты материальных частиц. Говоря короче, это не уравнения динамики сплошной среды Коссера. Статический вариант именно этих уравнений рассматривал Коши.

В классической механике сплошной среды предполагается, что вектор $\boldsymbol{\tau}$, входящий в поверхностные интегралы уравнений (2) и (3), — это вектор внутренних напряжений на площадке поверхности s с нормалью $\mathbf{n}$. Он зависит от направления этой нормали $\mathbf{n}$ и поэтому имеет представление в виде векторной функции векторного аргумента $\mathbf{n}$:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}\left(\mathbf{r}, t, \mathbf{n}\right). \tag{4}$$

Аргументы $\mathbf{r}$ и t указывают на то, что представление имеет место в каждой точке $\mathbf{r}$ поверхности s в произвольный момент времени t. Коши предполагал, что функция (4) непрерывна по этим аргументам. Везде ниже первые два аргу-

мента — $\mathbf{r}$ и t — не будем указывать, хотя, подразумевая их, для сокращения записи будем писать

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}). \qquad (5)$$

Это утверждение носит название постулат Коши.

Коши рассмотрел динамику куска сплошной среды в форме тонкого малого диска и получил уравнение

$$\boldsymbol{\tau}(-\mathbf{n}) = -\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}). \qquad (6)$$

Это соотношение называют в литературе поразному. Одни авторы называют его фундаментальной леммой Коши [9], другие — первой теоремой Коши [3]. Замечу, что при выводе уравнения (6) не использовалось предположение о непрерывности функций по аргументам $\mathbf{r}$ и t.

Коши рассмотрел также кусок сплошной среды в форме тетраэдра, три грани которого расположены параллельно координатным плоскостям и имеют нормали $\mathbf{e}_i$, причем $\mathbf{e}_i$ — базисные векторы системы координат, которые взаимно перпендикулярны. Четвертая грань тетраэдра имеет нормаль $\mathbf{n}$. Уравнение динамики привело его к следующему результату:

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = n_1\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_1) + n_2\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_2) + n_3\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_3), \qquad (7)$$

где n_i — проекции нормали $\mathbf{n}$ на оси координат $\mathbf{e}_i$, то есть

$$n_i = \mathbf{n}\cdot\mathbf{e}_i, \qquad (8)$$

а $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_i)$ — векторы напряжений на площадках с нормалями $\mathbf{e}_i$.

Сам Коши интегрировал формулу (7) и выдвинул утверждение о том, что напряжения на любых трех ортогональных площадках, проходящих через некоторую точку $\mathbf{r}$, вполне определяют напряжения на любых других площадках, проходящих через избранную точку.

Формулу (7) можно записать по-другому, а именно так:

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \mathbf{n}\cdot\mathbf{T}, \qquad (9)$$

вводя в рассмотрение тензор напряжений

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^{3}\mathbf{e}_i\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_i) = \mathbf{e}_1\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_1) + \mathbf{e}_2\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_2) + \mathbf{e}_3\boldsymbol{\tau}(\mathbf{e}_3). \qquad (10)$$

Тензорную запись (9) Коши не использовал, поскольку в его время понятие тензора еще не было введено в обиход математиков и механиков. Оно появилось позже — лишь в середине XIX века. Вместе с тем формула носит имя Коши. Эту формулу в литературе называют поразному. Для большинства это просто формула Коши [4, 7, 8], для других (например, в [9]) — фундаментальная теорема Коши, а для третьих (например в [3]) — вторая теорема Коши. Именно об этой знаменитой формуле и будет идти речь в предлагаемой заметке.

Отмечу факты, которые активно использовались Коши при выводе формулы для вектора напряжений (9):

а) постулат Коши (4) или (5);

б) непрерывность (более того, равномерная) функций (4) или (5) по аргументам $\mathbf{r}$ и t;

в) уравнение статики;

г) тетраэдр как фигура, которая позволяет построить формулу Коши.

Выскажу критические замечания по поводу всех сформулированных фактов. Наиболее уязвимым, но в то же время и наиболее плодотворным, является последний пункт из перечисленных выше. Вывод формулы по Коши сложен. Я — лектор по механике деформируемых тел. Вот уже больше 40 лет я рассказываю студентам об этой формуле и подробно воспроизвожу вывод Коши. Во-первых, для этого вывода необходим чертеж тетраэдра со всеми его гранями. Во-вторых, необходимо внимательное вычисление площадей граней такого тетраэдра в зависимости от расположения их нормалей по отношению к нормали $\mathbf{n}$ главной площадки. Но что такое мои проблемы лектора в сравнении с тем, что делается в литературе? Вот уже почти двести лет авторы воспроизводят рассуждение Коши в оригинале! Естественно, возникает желание найти по возможности более простой альтернативный путь получения формулы Коши.

При рассмотрении формулы Коши создается впечатление, что она справедлива только в частном случае — для тетраэдра. Об этом свидетельствует тот факт, что в выражение (10) для тензора напряжений входят присущие только тетраэдру значения векторов напряжений по координатным плоскостям. Ведь, если рассмотреть равновесие или динамику какого-нибудь другого многогранника, нам тоже удастся выразить напряжения на одной грани через напряжения

на других гранях, как это сделал Коши. Но формула (9) для вектора напряжений окажется другой — в ней будет больше слагаемых. Поэтому возникает желание иметь такой вывод формулы Коши, который бы не был связан с конкретной формой куска сплошной среды, рассматриваемого в (2) и (3).

Обратимся теперь к пункту «в» — рассмотрению равновесия. Сей пункт не нуждается ни в каком усовершенствовании, ибо это незыблемый закон природы. Точно так же никаких усовершенствований не следует применять и в пункте «б». Дело в том, что понятие непрерывности и даже равномерной непрерывности — это хорошо установившееся понятие математики. Но самым неубедительный в рассуждении Коши — пункт «а», т. е. представление о постулате Коши (5). Коши декларирует то, что вектор напряжений $\boldsymbol{\tau}$ является функцией от вектора единичной нормали, но ни разу не обмолвился о том, какой вид может иметь эта функция в самом общем случае. Как же можно говорить о том, что формула Коши имеет общий характер, если не иметь представления о том, какой вид может иметь эта функция вообще. Несомненно, что пункт «а» нуждается в усовершенствовании.

Итак, в серьезном усовершенствовании нуждаются первый и последний пункты из представленного выше перечня.

Обратим свое внимание, дорогой читатель, на постулат Коши. Зададим себе вопрос: «Какова структура функции $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n})$ в самом общем виде?» Это самый простой вопрос из серии более сложных вопросов: «Какова структура тензорной функции нескольких тензорных аргументов?» Последний вопрос в самом общем виде рассматривался, например, в статьях [10, 11]. Однако, поскольку наш вопрос о структуре функции $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n})$ самый простой, то нам не придется обращаться к трудным рассуждениям и рассмотрениям статей [10, 11].

Поставим перед собой вопрос: «Из каких комбинаций вектора аргумента $\mathbf{n}$ можно составить другие векторы, которые было бы можно принять за функции $\mathbf{n}$?» Ответ на него чрезвычайно прост: «Во-первых, это вектор ${}^{1}\boldsymbol{\Pi}$, вообще не зависящий от $\mathbf{n}$. Далее, это вектор, линейно зависящий от $\mathbf{n}$, т. е. $\mathbf{n}\,{}^{2}\boldsymbol{\Pi}$, и, далее, векторы $\mathbf{nn}\,{}^{3}\boldsymbol{\Pi}$, $\mathbf{nnn}\,{}^{4}\boldsymbol{\Pi}$, и, далее, $\mathbf{nnn}\ldots\cdots{}^{k+1}\boldsymbol{\Pi},\ldots$ Индекс вверху слева обозначает, как обычно, ранг тензора.

Напоминаю, что ${}^{1}\boldsymbol{\Pi}$ — это тензор первого ранга, т. е. вектор, ${}^{2}\boldsymbol{\Pi}$ — тензор второго ранга, ${}^{k+1}\boldsymbol{\Pi}$ — тензор $k+1$ ранга. Сумма таких векторов представляет общий вид степенной функции

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = {}^{1}\boldsymbol{\Pi} + \mathbf{n}\cdot{}^{2}\boldsymbol{\Pi} + \mathbf{nn}\cdot\cdot{}^{3}\boldsymbol{\Pi} + \mathbf{nnn}\cdots{}^{4}\boldsymbol{\Pi} + \ldots,$$

или

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \sum_{k=0}^{N} \underbrace{\mathbf{nn}\overset{k}{\cdots}\mathbf{n}}_{k}\,{}^{k+1}\boldsymbol{\Pi}. \qquad (11)$$

Теперь, когда мы имеем формулу для векторной функции векторного аргумента, т. е. формулу, аналитически выражающую постулат Коши , мы получаем возможность дополнить рассуждение Коши и тем самым превратить его в полноценное доказательство. Доказательство построим методом «от противного». Допустим, что формула Коши для вектора напряжений (9) ошибочна и на самом деле имеет место более общая формула (11), в которой не равно нулю хоть одно слагаемое, отличающее (11) от (9). Так будет при выполнении хотя бы одного из следующих неравенств:

$${}^{1}\boldsymbol{\Pi} \neq 0;\ \ldots\ {}^{k+1}\boldsymbol{\Pi} \neq 0 \quad (k \geq 2). \qquad (12)$$

Обратимся теперь к тетраэдру Коши. С одной стороны, векторная функция $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n})$ должна иметь представление (11), а с другой, как это показал Коши, она должна иметь вид (9)

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \mathbf{n}\cdot\mathbf{T}.$$

Разумеется, они должны быть равны. Приравнивая (11) и (9), получим равенство

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \sum_{k=0}^{N} \underbrace{\mathbf{nn}\overset{k}{\cdots}\mathbf{n}}_{k}\,{}^{k+1}\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{n}\cdot\mathbf{T}.$$

Его следует рассматривать как тождество, и тогда найдем

$${}^{1}\boldsymbol{\Pi} = 0;\quad {}^{2}\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{T};\ \ldots\ {}^{k+1}\boldsymbol{\Pi} = 0, \quad k \geq 2. \qquad (13)$$

Мы пришли к противоречию. Равенства (13) противоречат принятому нами предположению (12). Следовательно, наше предположение (12) должно быть отвергнуто. Подставив значения тензоров (13) в (11), получим, наконец, формулу Коши

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \mathbf{n}\cdot\mathbf{T}. \qquad (14)$$

Может возникнуть впечатление, что выражение (14) ничем не отличается от (9). Выражение (9) получил Коши только для тетраэдра, а выражение (14) — это общее представление вектора напряжений.

Итак, мы смогли добавить к рассуждению Коши о равновесии тетраэдра рассуждение о векторной функции векторного аргумента и получить в конце концов доказательство формулы Коши, однако мы не смогли избавиться от обращения к тетраэдру Коши.

Перед нами, дорогой читатель, открывается другая возможность. Мы можем продолжить исследование, принимая за основу представление векторной функции векторного аргумента (11), и избежать вообще обращения к тетраэдру Коши.

Обратим внимание на то, что уравнение динамики (2) должно выполняться для тела любой формы. Следуя Коши, рассмотрим динамику куска сплошной среды в форме тонкого малого диска. Естественно, мы получим уравнение (6). Если подставить в него разложение (11) и выделить четные и нечетные слагаемые, придем к уравнению

$$\sum_{k=0,2,4,\ldots} \mathbf{nnn}\cdots{}^{k+1}\Pi - \sum_{k=1,3,5,\ldots} \mathbf{nnn}\cdots{}^{k+1}\Pi =$$

$$= -\sum_{k=0,2,4,\ldots} \mathbf{nnn}\cdots{}^{k+1}\Pi - \sum_{k=1,3,5,\ldots} \mathbf{nnn}\cdots{}^{k+1}\Pi.$$

Сумма нечетных слагаемых в левой части равна сумме нечетных слагаемых в правой и имеет тот же знак, поэтому они взаимно уничтожаются. Сумма четных слагаемых в левой части равна сумме четных слагаемых в правой части, но имеет противоположный знак. Следовательно, сумма всех четных слагаемых равна нулю, т. е.

$$\sum_{k=0,2,4,\ldots} \mathbf{nnn}\cdots{}^{k+1}\Pi = 0,$$

и разложение (11) принимает более простой вид

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \sum_{k=1,3,5,\ldots}^{N} \underbrace{\mathbf{nnn}\cdots}_{k}{}^{k+1}\Pi. \qquad (15)$$

Сохранились только нечетные слагаемые!

Таким образом, разложение (15) полностью заменяет разложение (11). Используем его для исследования динамики тела произвольной формы. Уравнение динамики (2) принимает следующий вид:

$$\int_s \left(\sum_{k=1,3,5,\ldots}^{N} \underbrace{\mathbf{nnn}\cdots}_{k}{}^{k+1}\Pi \right) ds + \int_v \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) dv = 0. \quad (15)$$

Далее рассмотрим последовательность сумм (15) при различных значениях числа членов N. При $N = 1$ получаем из (15)

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \mathbf{n}\cdot{}^{2}\Pi.$$

Это выражение уже имеет вид формулы Коши.

Продолжим наше исследование. Рассмотрим случай, когда $N = 3$. В этом случае разложение (15) выглядит так:

$$\boldsymbol{\tau}(\mathbf{n}) = \mathbf{n}\cdot{}^{2}\Pi + \mathbf{nnn}\cdots{}^{4}\Pi, \qquad (17)$$

а уравнение

$$\int_s \left(\mathbf{n}\cdot{}^{2}\Pi + \mathbf{nnn}\cdots{}^{4}\Pi \right) ds + \int_v \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) dv = 0,$$

или

$$\int_s \mathbf{n}\cdot{}^{2}\Pi\, ds + \int_s \mathbf{nnn}\cdots{}^{4}\Pi\, ds + \int_v \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) dv = 0.$$

Первое слагаемое преобразуем по формуле Гаусса — Остроградского, и тогда это равенство примет вид

$$\int_s \mathbf{nnn}\cdots{}^{4}\Pi\, ds + \int_v \left(\nabla\cdot{}^{2}\Pi + \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) \right) dv = 0. \quad (18)$$

Положим теперь, что тензор ${}^{4}\Pi$, а также скобка в объемном интеграле в (18) равномерно непрерывны в пределах рассматриваемого тела и, значит, почти постоянны. Тогда они могут быть вынесены из-под знаков интегралов, что приведет к уравнению

$$\left(\int_s \mathbf{nnn}\, ds \right)\cdots{}^{4}\Pi + \left(\nabla\cdot{}^{2}\Pi + \rho\left(\mathbf{F} - \dot{\mathbf{v}}\right) \right) \int_v dv = 0. \quad (19)$$

Выявим асимптотические свойства интегралов, входящих в (19), при малом диаметре тела 2δ. Очевидно, что

$$\int_s \mathbf{nnn}\, ds = {}^{3}\mathbf{A}\delta^2, \qquad \int_v dv = V\delta^3,$$

где ${}^{3}\mathbf{A}$ и V — постоянные величины, не зависящие от δ.

Подставим эти асимптотические представления в (19) и разделим обе части на δ^2. Получим

$$ {}^3\mathbf{A}\cdots{}^4\Pi+\left(\nabla\cdot{}^2\Pi+\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)\right)V\delta=0. \qquad (20) $$

Устремляя δ к нулю, придем к заключению:

$$ {}^3\mathbf{A}\cdots{}^4\Pi=0. \qquad (21) $$

Это векторное уравнение служит для определения тензора ${}^4\Pi$. В проекциях это три однородных уравнения. А число неизвестных? Оно равно числу координат тензора четвертого ранга ${}^4\Pi$ т. е. $3^4=81$ неизвестных. Итак, мы имеем всего три однородных уравнения для определения 81 неизвестной. Как известно, эта задача не имеет единственного решения. Во всяком случае, мы не можем объявить, что тензор ${}^4\Pi$ равен нулю. Итак, если ${}^4\Pi\neq 0$, то создается впечатление, что мы нашли скорректированное выражение формулы Коши, а именно, выражение (17).

Попытаемся, однако, вычислить ${}^4\Pi$. Для этого введем в рассмотрение M разных пробных тел, для которых запишем уравнение динамики. Это значит, что для каждого из них мы напишем уравнение (21). Получим систему уравнений

$$ {}^3\mathbf{A}_k\cdots{}^4\Pi=0 \quad (k=1,2,...,M). \qquad (22) $$

Это $3M$ уравнений в проекциях, а неизвестных — всего 81. Если сделать $3M>81$, то окажется, что число однородных уравнений больше числа неизвестных. Это позволит, в принципе, заключить

$$ {}^4\Pi=0, \qquad (23) $$

Тогда пропадет соответствующее слагаемое в скорректированном выражении формулы Коши (17), и она примет вид

$$ \boldsymbol{\tau}\left(\mathbf{n}\right)=\mathbf{n}\cdot{}^2\Pi, $$

или

$$ \boldsymbol{\tau}\left(\mathbf{n}\right)=\mathbf{n}\cdot\mathbf{T}, \qquad (24) $$

где $\mathbf{T}$ — тензор напряжений, а если внести (23) в (22) и далее в (20), то получим важный попутный результат — уравнение динамики сплошной среды

$$ \nabla\cdot\mathbf{T}+\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)=0. \qquad (25) $$

Продолжим начатое исследование и рассмотрим случай, когда $N=5$. Тогда сумма (15) примет вид

$$ \boldsymbol{\tau}\left(\mathbf{n}\right)=\mathbf{n}\cdot{}^2\Pi+\mathbf{nnn}\cdots{}^4\Pi+\mathbf{nnnnn}\cdots\cdots{}^6\Pi, \qquad (26) $$

а уравнение (16) окажется таким:

$$ \int_s\mathbf{n}\cdot{}^2\Pi\,ds+\int_s\left(\mathbf{nnn}\cdots{}^4\Pi+\mathbf{nnnnn}\cdots\cdots{}^6\Pi\right)ds+ $$

$$ +\int_v\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)dv=0. $$

Как и ранее, при $N=3$, первое слагаемое преобразуем по формуле Гаусса — Остроградского, и тогда это уравнение примет вид

$$ \int_s\left(\mathbf{nnn}\cdots{}^4\Pi+\mathbf{nnnnn}\cdots\cdots{}^6\Pi\right)ds+ $$

$$ +\int_v\left(\nabla\cdot{}^2\Pi+\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)\right)dv=0. $$

Как и ранее, положим, что тензоры ${}^4\Pi$ и ${}^6\Pi$ и выражение в скобке в объемном интеграле здесь равномерно непрерывны в пределах рассматриваемого тела, а значит, почти постоянны. Тогда их можно вынести из-под знаков интегралов. Это приведет к уравнению

$$ \left(\int_s\mathbf{nnn}\,ds\right)\cdots{}^4\Pi+\left(\int_s\mathbf{nnnnn}\,ds\right)\cdots\cdots{}^6\Pi+ $$

$$ +\left(\nabla\cdot{}^2\Pi+\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)\right)\int_v dv=0. \qquad (27) $$

Асимптотические свойства интегралов, входящих в это уравнение, при малом диаметре тела таковы:

$$ \int_s\mathbf{nnn}\,ds={}^3\mathbf{A}\delta^2;\quad \int_s\mathbf{nnnnn}\,ds={}^5\mathbf{B}\delta^2;\quad \int_v dv=V\delta^3, $$

где ${}^3\mathbf{A}$, ${}^3\mathbf{B}$ и V — постоянные величины, не зависящие от δ.

Подставим эти асимптотические представления в (27) и разделим обе части на δ^2. Получим

$$ {}^3\mathbf{A}\cdots{}^4\Pi+{}^5\mathbf{B}\cdots\cdots{}^6\Pi+ $$

$$ +\left(\nabla\cdot{}^2\Pi+\rho\left(\mathbf{F}-\dot{\mathbf{v}}\right)\right)V\delta=0. \qquad (28) $$

Устремляя δ к нулю, придем к уравнению

$$ {}^3\mathbf{A}\cdots{}^4\Pi+{}^5\mathbf{B}\cdots\cdots{}^6\Pi=0. $$

Полученное векторное уравнение служит для определения тензоров ${}^4\Pi$ и ${}^6\Pi$. В проекциях это три однородных уравнения. А сколько неизвестных входит в него? Очевидно, что их число равно числу координат тензоров ${}^4\Pi$ и ${}^6\Pi$. Тензор ${}^4\Pi$ имеет $3^4=81$ неизвестных, а тензор ${}^6\Pi$ — $3^6=729$. Полное число этих неизвестных величин равно 810.

Итак, мы имеем всего 3 уравнения для определения 810 неизвестных. Но мы уже знаем что делать, чтобы все-таки вычислить такое безумное количество неизвестных. Для этого нужно ввести в рассмотрение M разных пробных тел и для каждого тела записать уравнение динамики. Получим систему уравнений

$$ {}^{3}\mathbf{A}_k \cdots {}^{4}\Pi + {}^{5}\mathbf{B}_k \cdots\cdots {}^{6}\Pi = 0, $$

$$ \left(k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ M\right). \qquad (29) $$

Уравнений — $3M$, а неизвестных — 810. Если сделать $3M > 810$, то окажется, что число однородных линейных уравнений больше числа неизвестных. Это позволит высказать суждение о том, что все неизвестные равны нулю, то есть

$$ {}^{4}\Pi = 0; \quad {}^{6}\Pi = 0, \qquad (30) $$

и тогда пропадают соответствующие слагаемые в скорректированном выражении формулы Коши (26), причем последняя примет вид (24). А если внести (30) в (28), то получим дополнительно уравнение динамики сплошной среды (25).

Точно так же рассмотрим случаи N = 7, 9 и т. д. Во всех случаях получим формулу Коши (24) и уравнение динамики сплошной среды.

Этим завершается доказательство формулы Коши, ибо в разложении остается всего одно слагаемое, а именно слагаемое Коши.

Обращаю внимание читателя на то, что в представленном весьма сложном доказательстве мы избавились от необходимости обращаться к тетраэдру Коши.

Проанализируем выполненное доказательство. Обратим внимание на то, что в процессе этого доказательства мы существенно использовали два уравнения — уравнение, конкретизирующее функцию, выражающую постулат Коши (5) в форме (15), и уравнение динамики (2) в форме (25).

Совершенно очевидно, что если пренебречь хоть одним из этих уравнений, то представленное доказательство развалится. Но ведь именно так поступил Коши! Ведь он использовал только уравнение динамики, а разложения (11) он вообще не знал и не употреблял. Как же тогда он получил правильный результат? Гениальность Коши в том, что он отказался от рассмотрения равновесия куска сплошной среды произвольной формы и избрал для своего рассуждения именно тетраэдр. А тетраэдр — специфическая фигура; это многогранник, имеющий всего четыре грани. Значит, функция, выражающая постулат Коши (5), представлена лишь только своими значениями для четырех граней. Только эти четыре значения входят в уравнение динамики, составленное Коши (7). В этом я вижу разгадку загадки Коши — он использовал рассуждение о тетраэдре для того, чтобы избежать рассуждений о форме представления постулата . Так поступают и все авторы книг по механике сплошной среды вот уже почти двести лет. Вот в чем причина живучести рассуждения Коши о тетраэдре.

Обращаю внимание читателя на то, что вопрос об альтернативном построении формулы Коши рассматривался ранее в работе [12] автора этой заметки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лурье, А.И.** Теория упругости [Текст] / А.И. Лурье.— М.: Наука, 1970.— 939 с.

2. Большая Советская Энциклопедия. Т. 13 [Текст].— М.: Советская энциклопедия, 1973.— С. 895–896.

3. **Димитриенко, Ю.И.** Нелинейная механика сплошной среды [Текст] / Ю.И. Димитриенко.— М.: Физматлит, 2009.— 623 с.

4. **Ziegler, F.** Mechanics of solids and Fluids [Текст] / F. Ziegler.— New-York, Vienna.: Springer-Verlag, 1995.— 845 p.

5. **Седов, Л.И.** Механика сплошной среды. Т. 1 [Текст] / Л.И. Седов.— М.: Наука, 1970.— 492 с.

6. **Новацкий, В.** Теория упругости [Текст] / В. Новацкий.— М.: Мир, 1975.— 872 с.

7. **Лурье, А.И.** Пространственные задачи теории упругости [Текст] / А.И. Лурье.— М.: ГИТТЛ, 1955.

8. **Елисеев, В.В.** Механика деформируемого твердого тела [Текст] / В.В. Елисеев.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 231 с.

9. **Трусделл, К.** Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред [Текст] / К. Трусделл.— М.: Мир, 1975.— 592 с.

10. **Spenser, A.I.** The theory of matrix polynomials and its application to the mechanics of isotropic continua [Текст] / A.I. Spenser, R.S Rivlin // Archive for rational mechanics and analysis.— 1959. Vol. 2, № 4.— P. 309–336.

11. **Лохин, В.В.** Нелинейные тензорные функции от нескольких тензорных аргументов [Текст] / В.В. Лохин, Л.И. Седов // В кн.: Седов, Л.И. Механика сплошной среды.— Т. 1.— М.: Наука, 1970.— С. 436–464.

12. **Пальмов, В.А.** Фундаментальные законы природы в механике деформируемых тел [Текст]: Учебное пособие / В.А. Пальмов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.— 141 с.

УДК 53.02

Т.В. Воробьева, А.И. Мелькер, С.А. Старовойтов

ИНФОРМАЦИЯ, ЭНТРОПИЯ, ТЕМПЕРАТУРА

Эволюция понятий

В предыдущей работе [1] мы рассмотрели такие понятия, как теплота, температура и энтропия, смысл которых постоянно уточнялся по мере развития физики в течение XVII–XIX столетий. Наряду с наукой о теплоте независимо развивались и другие науки, которые стали использовать некоторые из этих понятий для объяснения явлений, относящихся к их области. Наименования понятий при этом остались прежними, однако смысл этих понятий изменился. Некоторые из них, например энтропия, стали не только более понятными, но и более общими. Кроме того, появились новые понятия, которые проникли в физику из других наук. В статье мы рассмотрим эволюцию старых понятий и появление новых понятий в XX столетии.

Информация, информатика и энтропия

В словаре иностранных слов [2] дано следующее определение. *Информация* ⟨см. *информировать*⟩ — осведомление, сообщение о положении дел или о чьей-либо деятельности, сведения о чем-либо. Информировать ⟨от лат. *informare* — изображать, составлять понятие о чем-либо⟩ — осведомлять. В английском словаре Longman Dictionary of English Language and Culture дано такое определение: *information* — knowledge in the form of facts, news, etc. [3]. В энциклопедическом словаре [4] говорится следующее. Информация ⟨от лат. *informatio* — разъяснение, изложение⟩ первоначально — сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом (с помощью условных сигналов, технических средств и т. д.); с середины XX века — общенаучное понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом, обмен сигналами в животном и растительном мире, передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму. Там же дано определение информатики.

Информатика (франц. *informatique*, нем. *Informatik*) — наука, изучающая законы и методы накопления, передачи и обработки информации с помощью ЭВМ; в переносном смысле — область человеческой деятельности, связанная с применением ЭВМ. Аналог термина информатика в англоязычных странах — *computer science* (вычислительная наука) [4]. Более широкое толкование терминов информации и информатики дано в математическом энциклопедическом словаре [5]. Исторические сведения о развитии информатики приводятся в [6], где подчеркивается: несмотря на то, что информатика — молодая наука, она началась тогда, когда впервые попытались механизировать умственную деятельность.

В основе теории информации лежит способ измерения количества информации, который в 1948 году предложил Клод Шеннон (Claude Elwood Shannon, 1916–2001). Этот способ, позволяющий выразить количество информации числом, можно объяснить на следующем примере [7, 8]. Рассмотрим множество, состоящее из n_0 элементов. Для равновероятных событий вероятность выбора любого элемента равна $1/n_0$. Эта величина характеризует степень (или меру) неопределенности в рассматриваемой ситуации. Если $n_0 = 1$, т. е. множество состоит только из одного элемента, то $p = 1$ и $H = 0$, где p – вероятность, H — степень неопределенности. С другой стороны, $p \to 0$ и $H \to \infty$ при $n_0 \to \infty$. Наиболее простая формула, связывающая p и H, имеет вид $H = -\log p$. Предположим, что число элементов множества уменьшилось до $n_1 < n_0$. При этом вероятность выбора одного элемента увеличится, а степень неопределенности уменьшится. Разность между первоначальной и конечной степенью неопределенности называется количеством информации

$$I = H_0 - H_1 = -\log \frac{p_0}{p_1} = \log \frac{n_0}{n_1}.$$

Если вероятности исходов различны, то за степень неопределенности принимают среднее значение неопределенности отдельных исходов, где n_k — число исходов в ситуации k. Эта формула положила начало теории информации.

Какие логарифмы используют в этих формулах? Чаще всего берут натуральные, десятичные и двоичные. В последнем случае информацию выражают в битах (от англ. *binary digit* — двоичный разряд), а логарифм числа x записывают в виде $\mathrm{ld}x$ (от лат. *logarithmus dualis*) [6], что означает логарифм по основанию 2. Теория информации развивалась независимо от термодинамики и статистической физики. В ней появились свои понятия и термины, такие, как мера неопределенности и количество информации. Однако вероятностный подход Шеннона фактически совпал с вероятностным подходом Больцмана, да и сами конечные формулы оказались удивительно похожими. По-видимому, по этой причине мера неопределенности получила название *информационной энтропии.* В свою очередь в физике энтропию стали рассматривать как меру неопределенности при статистическом описании процессов в различных средах. При этом, чтобы подчеркнуть различие между информацией, относящейся к общим проблемам, и информацией, характеризующей физическую систему, в последнем случае используют термин *«связанная информация»*.

Рассмотрим замкнутую физическую систему, чья энтропия равна w — числу микросостояний, которыми можно получить данное β_1 макросостояние, k — постоянная Планка. Предположим, что могут реализоваться w_0 различных микросостояний. Если у нас нет специальной информации об этих микросостояниях, то их следует считать равновероятными. Иногда мы располагаем дополнительными сведениями, например результатами измерений родственной задачи, и число возможных микросостояний уменьшается до w_1. В первом (общем) случае энтропия равна $S_0 = k \ln w_0$, во втором (специальном) — $S_1 = k \ln w_1$. Таким образом, количество информации равно $I = S_0 - S_1 = k \ln \dfrac{w_0}{w_1}$.

Информация и научные законы

Пусть мы ставим опыт по измерению двух переменных x и y [7, 8]. При этом величина x меняется в пределах от 0 до a, а y — в пределах от 0 до b (рис. 1). После ряда измерений мы находим, что x и y всегда остаются внутри заштрихованной полосы, которая характеризует некоторый эмпирический закон (пунктирная линия) и пределы

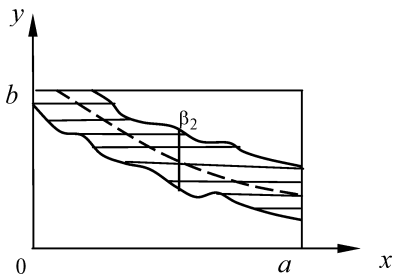


Рис. 1. Эмпирический закон

погрешности ($\beta_2 - \beta_2$). Если $n_0 = a\,b$ — полная область изменений x и y, n_1 — площадь заштрихованной полосы, то количество информации равно

$$I = k \ln \frac{n_0}{n_1}.$$

Здесь предполагается, что все области равновероятны.

Таким образом, чтобы подсчитать информацию, нам надо знать общее поле наблюдения и поле случайных ошибок.

Следовательно, научный закон, во-первых, всегда имеет ограниченную область применения, а во-вторых, справедлив в пределах возможных ошибок. На эти два условия неоднократно обращали внимание философы. Если эти условия не конкретизированы, то определение научного закона лишено смысла. Многие физики до сих пор думают, что погрешность можно сделать сколь угодно малой и в теории ее можно не учитывать. Физика — это не математика. Существует много источников экспериментальной погрешности, на которые не удается внести поправки. Примерами служат броуновское движение, принцип неопределенности, принцип изоляции (невозможно заэкранироваться от многих неизвестных воздействий).

В общем случае можно сказать следующее. Пусть мы проводим некоторый эксперимент, в результате которого получаем какое-то количество информации ΔI. В соответствии с принципом Карно (S. Carnot, 1824) это сопровождается приростом энтропии $\Delta S \geq \Delta I$ в экспериментальной установке. Пусть погрешность измерений стремится к нулю, тогда количество информации и, следовательно, энтропия стремятся к бесконечности. Поскольку энтропия характеризует теряемую энергию, это означает, что для получения нулевой погрешности мы должны затратить бесконечное количество энергии, что практически невозможно.

Эмпирический закон можно выразить с помощью графика, таблицы или формулы. Предположим, что мы располагаем несколькими эмпирическими законами — α, β и γ, в каждом из которых содержится определенное количество информации — I_α, I_β, I_γ. Если эти законы открыты независимо друг от друга, то общая информация $I_\Sigma = I_\alpha + I_\beta + I_\gamma$.

Например, для идеального газа справедливы следующие законы:

закон Бойля–Мариотта (R. Boyle, 1662; E. Mariotte, 1676) — $pV\big|_{T=\text{const}} = \text{const}$;

закон Гей-Люссака (J.L. Gay-Lussac, 1802) — $\frac{V}{T}\Big|_{p=\text{const}} = \text{const}$;

закон Шарля (J.A.C. Charles, 1787) — $\frac{p}{T}\Big|_{V=\text{const}} = \text{const}$.

Предположим, что мы нашли теорию, которая устанавливает связи между этими законами. В нашем случае такой теорией является уравнение Клапейрона—Менделеева (B.P.E. Clapeyron, 1834; Д.И. Менделеев, 1874) — состояния идеального газа $pV = RT$, которое объединяет все три закона. Если мы возьмем результаты первого закона, то в них уже содержатся намеки на второй закон. Например, нам известно, что закон Бойля–Мариотта справедлив в интервале температур (T_1, T_2) (рис. 2, *а*). Тогда при установлении закона Гей-Люссака мы можем сузить пределы изменения V, что сокращает поле наблюдения (рис. 2, *б*). Следовательно, рассматривая закон β после закона α, мы получаем меньше информации $I'_\beta = k \ln \frac{n'_{0\beta}}{n_{1\beta}} < I_\beta = k \ln \frac{n_{0\beta}}{n_{1\beta}}$.

Пусть теперь нам известны первые два закона. Тогда при установлении третьего закона поле наблюдения уменьшается еще больше.

В результате возникает следующая ситуация: $I_\Sigma = I_\alpha + I_\beta + I_\gamma = I_\alpha + I'_\beta + I''_\gamma + K$, где K — информация, содержащаяся в корреляции. Она равна количеству предсказываемой информации, которую дает теория, устанавливающая корреляции между законами α, β и γ.

Рассмотренная картина наблюдается во всех физических теориях с конкретными областями применимости и с обычными экспериментальными ошибками. Любые теории содержат некоторые величины, например массу, заряд, начальные и граничные условия и т. п., которые являются следствием предыдущих наблюдений. Эти предварительные наблюдения, сделанные с некоторой ошибкой, содержатся по нашей схеме в эмпирическом законе α. Идеальной называется такая теория, для которой $I_{theory} = I_\Sigma - I_\alpha$. Это означает, что дальнейшие эксперименты не дадут ничего нового ($I_{\beta'} = I_{\gamma''} = 0$) и экспериментальная погрешность совпадает с ожидаемой погрешностью. Поэтому $I_{theory} = k \ln \frac{n_0^{theory}}{n_1^{theory}}$, где n_0^{theory} — область, в пределах которой справедлива теория; $n_1^{theory} = n_{1\alpha}$ — ожидаемые ошибки. К идеальной теории близки такие науки, как классическая механика, электродинамика и т. п.

Рассмотрим избыточность идеальной теории. В информатике избыточностью называется выражение $R = \frac{I_{\max} - I_{actual}}{I_{\max}} = 1 - \frac{I_{actual}}{I_{\max}}$.

Мы очень часто пользуемся избыточностью. Например, заучивая стихотворение, объясняя

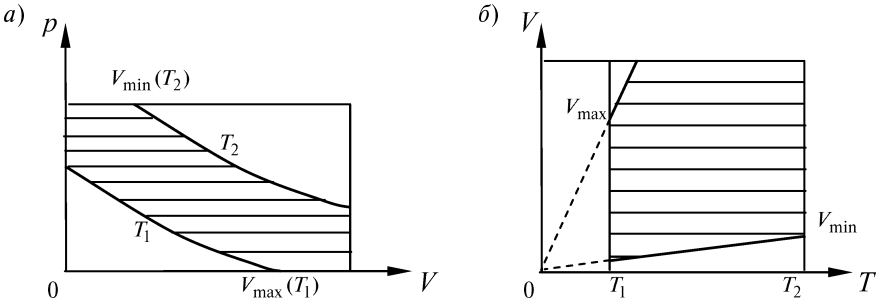


Рис. 2. Закон Бойля — Мариотта (*а*) и уменьшение поля наблюдения для закона Гей-Люссака (*б*)

одно и то же несколько раз, повторяя фразы, если плохо слышно, мы невольно увеличиваем избыточность. Слишком низкая избыточность может исказить передаваемое сообщение, слишком высокая — уменьшить скорость передачи информации по каналу связи. В случае идеальной теории $R = \frac{I_\Sigma - I_\alpha}{I_\Sigma} = 1 - \frac{I_\alpha}{I_\Sigma}$.

Если R уменьшается, то I_α растет. Это означает, что роль эмпирической информации растет и, как следствие, увеличивается вероятность искажений, что снижает ценность теории. Если же $R \to 1$, то $I_\alpha \to 0$, и, следовательно, эмпирическая информация играет меньшую роль, однако сложность и громоздкость теории значительно увеличиваются. Таким образом, оптимальная теория должна обладать вполне определенной избыточностью.

Следует обратить внимание на отличие математики от физических наук. Исторически математика была вначале системой экспериментальных наблюдений, например геометрия начиналась как сводка правил, которыми пользовались землемеры, и примыкала к геологии и географии. Сейчас считается, что геометрия базируется на системе постулатов, физический смысл которых не рассматривается. Математическая теория представляет собой строгую структуру, пригодную к любой области без всяких ограничений. Когда эту теорию используют как физическую модель, возникают ограничения, связанные с пределами применимости и с погрешностями. Математическая теория, не устанавливая пределов области своей применимости, дает бесконечное количество информации; в физической же теории в силу ограничений содержится конечное количество информации.

Почему мы придаем большое значение открытию научных законов? Ценность энергии определяется ее способностью превращаться без потерь в другие виды энергии. Чем больше ценность, тем меньше потери и, следовательно, меньше энтропия — мера теряемой энергии. Если уменьшается энтропия, то это означает, что увеличивается доля таких видов энергии, которые могут полностью превращаться во все другие виды, и уменьшается доля теплоты, которая этим свойством не обладает. Введем, следуя Шредингеру, негэнтропию $N = -S$. Тогда за критерий качества энергии (ее способности к превращениям) можно принять величину негэнтропии. Рассмотрим теперь какое-либо исследование. Если взять отдельные результаты, то их можно охарактеризовать определенным количеством информации (или негэнтропии). Упорядочим эти результаты на основе какой-нибудь модели. Упорядоченная система обладает большей негэнтропией за счет информации, содержащейся в модели. Этот вклад называется структурной негэнтропией. Он возникает при появлении связей, когда отдельные части соединяются в единое целое. Информация, которую содержит модель, основана, с одной стороны, на знаниях исследователя, т. е. на физических законах, а с другой стороны, — на его фантазии, которая связывает эти законы вместе. В совокупности с новыми результатами это позволяет создавать упорядоченные системы с большой негэнтропией, часто неизвестные природе.

Существуют два вида информации: эфемерная и классическая [8]. Эфемерная информация появляется в результате немногочисленных измерений, на проведение которых было затрачено небольшое количество негэнтропии. При этом роль структурной негэнтропии, как правило, невелика. Ценность эфемерной информации быстро убывает со временем, поэтому ее необходимо также быстро передавать. Отсюда стремление побыстрее опубликовать результаты. В основе классической информации, вершиной которой являются великие открытия, научные законы и т. п., лежит гораздо больше экспериментов. Закон обобщает большое количество эфемерной информации, и ему соответствует большее количество негэнтропии. Кроме того, научные законы содержат дополнительное количество информации, не следующей из эмпирических результатов. Эта часть информации называется корреляционной.

Таким образом, два фактора определяют значение научных законов:

степень упорядочения (нам проще иметь дело с теорией и общими законами, чем со справочниками, содержащими несвязанные данные);

степень новизны (теория позволяет делать предсказания). Однако, даже открыв научный закон, мы часто не можем сразу оценить всевозможные последствия. «Формулы умнее нас!» — (Генрих Герц).

Заканчивая краткое рассмотрение роли теории информации в развитии старых понятий и создании новых, отметим следующее. Теория

информации дала более понятное, менее формальное и более широкое определение энтропии, связав ее с мерой неопределенности, существующей в любой, а не только в физической системе. Кроме того, она еще раз обратила внимание на необходимость более тщательного изучения корреляций и упорядочения. Актуальность этих вопросов стала очевидной после появления компьютеров и новых численных методов исследования задачи многих тел.

Неполнота и избыточность

Традиционный подход к описанию явлений в системе многих тел заключается в следующем. Предположим, что исследуемая нами система состоит из N одинаковых частиц, которые мы будем считать бесструктурными. Состояние системы характеризуется ее расположением (конфигурацией) и скоростью изменения этого состояния. Если заданы значения координат $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ и скоростей $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$ всех N частиц системы, т. е. $i = 1, 2, \ldots, N$, то тем самым определено и состояние системы в данный момент времени t. Чтобы исследовать эволюцию системы, необходимо задать еще и закон движения, который указывает, с какой скоростью изменяется состояние системы.

Если рассматривать набор всех величин $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$ как координаты точки $\mathbf{u}$ в многомерном пространстве, то состояние системы можно охарактеризовать геометрически этой точкой. Такую точку называют фазовой точкой, а пространство — фазовым пространством. Название связано с тем, что в прошлом состояния нередко называли фазами системы. Изменение состояния во времени изображают как движение фазовой точки по некоторой линии, которую называют фазовой траекторией. Независимые величины $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$, которые необходимо знать, чтобы определить состояние системы, называют степенями свободы.

Предположим, что число заданных параметров, которые дают нам возможность судить о состоянии системы, неизмеримо меньше числа степеней свободы. Это означает, что полное динамическое описание невозможно [9]. Вследствие неполноты описания динамическую задачу заменяют другой: определить в каждый момент времени не состояние системы, а функцию распределения микросостояний. При этом полагают, что координаты и скорости частиц составляют набор $6N$ случайных величин, а при эволюции состояния — набор $6N$ случайных функций времени. Такое неконтролируемое движение частиц макросистемы называют *хаотическим*, или *тепловым*, движением, а для описания этого движения используют два метода: статистический и термодинамический.

По существу, это означает уход от решения вопроса, выходящего за рамки аппарата традиционной теории. Кроме того, это противоречит желаниям предшественников, которые «пытались разобраться во внутреннем состоянии движения нагретого тела и составили себе об этом некоторое представление» [1]. Более продуктивными оказываются принципиально новые методы исследования проблемы многих тел, которые занимают промежуточное положение между теорией и экспериментом, поэтому их часто называют численными экспериментами. Главную роль среди них играет мощный метод, который дает очень много информации, — это метод *молекулярной динамики* [10].

В молекулярной динамике [11–14] движение системы из N частиц описывают, используя уравнения Ньютона. Пусть $\mathbf{r}_i$ радиус-вектор частицы с номером i. Уравнения движения имеют вид

$$m_i \frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{f}_i = \mathbf{f}_i^F + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} \mathbf{f}_{ij}.$$

Здесь m_i – масса частицы; $\mathbf{f}_i$ — действующая на нее сила, которая складывается из силы внешнего поля $\mathbf{f}_i^F$ и сил взаимодействия между частицами. Запишем эти уравнения в декартовых координатах:

$$m_i \frac{d^2 x_{ia}}{dt^2} = f_{ia}^F + \sum_{j=1,\, j\neq i}^{N} f_{ij} \frac{x_{ia} - x_{ja}}{r_{ij}}$$

($a = 1, 2, 3$; $f_{ij} = \left|\mathbf{f}_{ij}\right|$, $r_{ij} = \left|\mathbf{r}_{ij}\right|$), а затем перепишем еще раз в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = v_i;$$

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{1}{m_i} f_i\left\{x_1(t), x_2(t), \ldots, x_{3N}(t), F\right\}.$$

Здесь t — время, v — скорость, а символ F, включенный в число аргументов, означает, что сила

f_i учитывает также и действие внешнего поля. Отметим, что индекс i здесь меняется от 1 до $3N$, однако это уже не номер частицы, а счетчик числа степеней свободы; при этом предполагается, что каждая частица имеет три степени свободы.

Введем в фазовом пространстве $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ вектор состояния $\mathbf{u}$. Здесь

$$\mathbf{x} = \{x_1(t), x_2(t), \ldots, x_{3N}(t)\};$$

$$\mathbf{v} = \{v_1(t), v_2(t), \ldots, v_{3N}(t)\}.$$

Состояние системы для любого значения t можно найти, решив операторное уравнение

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \hat{f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \hat{O}\,\mathbf{u}.$$

с заданным начальным значением $\mathbf{u}_{t=0} = \mathbf{u}_0$, где вид операторов $\hat{f}$, $\hat{O}$ определяется уравнениями движения.

До сих пор мы рассматривали непрерывные величины. Но чтобы использовать компьютер, надо перейти к дискретным величинам и переформулировать для них уравнения движения. Для этого применим метод конечных разностей (Brook Taylor, 1715), который широко использовался на начальном этапе становления физики как науки. Многие уравнения физики, известные нам сейчас в дифференциальной форме, были впервые сформулированы на языке конечных разностей. Практически дискретные величины получают, отсчитывая значения непрерывной функции через определенные промежутки времени:

$$t_k = k\,\Delta t, \quad k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots\ .$$

Интегрируя операторное уравнение по временному шагу Δt, найдем связь между значениями вектора состояния в двух соседних точках — k и $k + 1$:

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \hat{O}\,\mathbf{u}\,dt.$$

Но мы не знаем значений вектора состояния в интервале $t_k < t \le t_{k+1}$, поэтому не можем точно вычислить этот интеграл. Предположим, что для достаточно малых временных шагов подынтегральную функцию $\hat{O}\mathbf{u} = f(t)$ можно представить рядом Тейлора с конечным числом членов

$$f(t) \cong f(0) + f'(0)\,t + f''(0)\frac{t^2}{2} + \ldots = \sum_{s=0}^{n-1} \left(\frac{d^s f}{dt^s}\right)_0 \frac{t^s}{s!}.$$

Тогда

$$\mathbf{u}_{k+1} \cong \mathbf{u}_k + \int_0^{\Delta t} dt \left\{ \sum_{s=0}^{n-1} \frac{t^s}{s!} \left[\frac{d^s}{dt^s} \left(\hat{O}\,\mathbf{u} \right) \right]_k \right\}.$$

Интегрируя конечно-разностную аппроксимацию, найдем вектор состояния в следующий момент времени

$$\mathbf{u}_{k+1} \cong \mathbf{u}_k + \sum_{s=1}^{n} \frac{(\Delta t)^s}{s!} \left[\frac{d^{s-1}}{dt^{s-1}} \left(\hat{O}\,\mathbf{u} \right) \right]_k.$$

Здесь число n характеризует порядок точности разностной схемы по временному шагу Δt. Не следует путать точность с погрешностью: последняя на порядок выше. Мы рассмотрели в общих чертах метод молекулярной динамики. Резюмируя, дадим определение этого метода. Молекулярная динамика — это вид компьютерного эксперимента, в котором, задав закон взаимодействия частиц, начальные и граничные условия, численно интегрируют уравнения движения N частиц. Если число частиц велико, то система обладает статистическими свойствами. Это позволяет наблюдать динамическую структуру системы, следя за движением отдельных частиц, и одновременно вычислять средние по времени и ансамблю свойства системы (энергия, давление, температура и т. д.), которые можно сравнивать с экспериментально наблюдаемыми величинами.

«Молекулярная динамика есть тот самый демон Максвелла, который знает все о движении всех молекул» [10]. Следует подчеркнуть, что компьютерные эксперименты в форме молекулярной динамики не только производят информацию, но и создают базу для разработки новой аналитической теории на основе установленного скрытого движения микрочастиц, которое ускользает от наблюдения в лаборатории [11–14]. Но эти *ненаблюдаемые события* очень важны, так как в конечном счете ими определяются *наблюдаемые явления*.

В отличие от статистического и термодинамического методов с их неполнотой описания, в молекулярной динамике возникает противоположная проблема — проблема избыточности [14]. Подробное изучение траекторий атомов связано с выводом огромного количества информации, что в общем случае становится нецелесообразным. Поэтому наряду с изучением траекторий

в той части системы, где происходят радикальные изменения, необходимо выбрать такую усредненную характеристику, которая, отбрасывая второстепенные детали, позволяет изучать суть явления и получать на выходе информацию, сопоставимую с обычными экспериментальными данными. Удобной характеристикой при изучении природы теплового движения часто оказывается спектральная плотность колебаний.

Информация и стохастичность

Пусть у нас имеется система из N атомов. В простейшей модели твердого тела это может быть ангармоническая цепочка атомов. Траектории атомов можно рассматривать как статистические временные ряды [14, 15]. Под статистическим временным рядом понимают функцию времени $X(t)$, проявляющую свойства случайности или нерегулярного изменения. Имея запись такого ряда, невозможно точно предсказать его будущие значения. Однако такой ряд можно описать с помощью статистических законов. На первый взгляд такой подход к траекториям динамической системы кажется непоследовательным, так как формальное определение случайного процесса включает в себя требование иррегулярности, т. е. отсутствие алгоритма. Для динамических систем это требование нарушается по определению. Поскольку нам известны уравнения движения, начальные и граничные условия, мы можем с достаточной точностью вычислить траектории всех атомов.

В действительности требование иррегулярности не является обязательным [16]. Более того, это свойство относится к числу принципиально ненаблюдаемых, так как любую конечную по времени реализацию можно аппроксимировать некоторой регулярной функцией, например рядом Фурье. Если мы рассматриваем какую-то одну изолированную траекторию, заданную в промежутке $(t_1,\ t_2)$, и ничего не знаем о других, то эта траектория нам будет казаться случайной. Таким образом, неполная информация о системе приводит к тому, что наблюдателю поведение системы кажется случайным (стохастическим).

Степень стохастичности можно оценить количественно. Для этого надо взять уже рассмотренную формулу $I = k \ln (n_0 / n_1)$. Здесь n_0 — область, в которой справедлива модель; n_1 — область ожидаемых ошибок. При использовании компьютера $n_1 = n_1' + n_1''$, где первый член относится к исходным данным, а второй — к ошибкам вычисления. Если мы рассматриваем только одну частицу системы, состоящей из N частиц, то поле наблюдения уменьшается в N раз. Разность между первоначальным и полученным количеством информации дает нам степень неопределенности (энтропию)

$$S = I(n_0) - I\left(\frac{n_0}{N}\right) = k \ln N.$$

Таким образом, с ростом числа частиц системы ее поведение логарифмически приближается к абсолютно случайному процессу.

В общем случае свойства случайного процесса зависят от времени. Однако, если процесс находится в состоянии равновесия, его среднее значение и дисперсия постоянны. Многие ряды проявляют нестационарность только в виде тренда среднего значения. Такими рядами являются, например, траектории атомов при квазистатическом деформировании твердых тел. Траектории атомов твердых тел, деформируемых в динамическом режиме, имеют сложный осциллирующий вид, но их можно разбить на две составляющие:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i^0 + \delta \mathbf{x}_i.$$

Первая составляющая, которая соответствует медленному (адиабатическому) изменению траектории, дает тренд. Вторая (смещение относительно тренда) — соответствует тепловому движению в быстро осциллирующем поле, которое возникает в результате динамического взаимодействия атомов.

Пусть дискретные значения x_1, x_2, ..., x_n получены из непрерывного ряда $x(t)$ длительности T при отсчете значений функции через интервалы времени Δt. Это дает $n = T / \Delta t$ выбранных значений x_k, где $x_k = x(t_k) = x(k\,\Delta t)$, $k = 1, 2, ..., n$.

Если у нас в распоряжении имеется только запись конечной длины, то вместо истинной функции мы получим ее выборочную оценку. Дискретная выборочная оценка автоковариационной функции равна [15]

$$c_{xx}(k) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n-k}(x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}),$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} x_t$.

Выборочная оценка автокорреляционной функции находится по формуле

$$r_{xx}(k) = c_{xx}(k) / c_{xx}(0).$$

Преобразование Фурье от выборочной оценки автоковариационной функции дает выборочную спектральную плотность (выборочный спектр)

$$c_{xx}(\omega) = \int_{-T}^{T} c_{xx}(s) \exp(-i\omega s) ds; \quad -\infty < \omega < \infty.$$

Здесь $s = k\,\Delta t$; ω — частота. Обычно выборочный спектр временных рядов очень сильно колеблется и мало похож на теоретический. Это связано с тем, что выборочная спектральная плотность не является состоятельной оценкой, т. е. ее распределение не стягивается к истинному значению при увеличении объема выборки. Способы улучшения спектральных оценок основаны на сглаживании выборочных оценок [14, 15]. Для этого исходный временной ряд разбивают на q рядов, каждый из которых имеет длину m, причем $qm = n$. Затем рассматривают среднее значение $\overline{c_{xx}(\omega)}$ выборочных спектров q на частоте w. В этом случае математическое ожидание (теоретическое среднее) выборочной сглаженной спектральной плотности соответствует просматриванию теоретического спектра через спектральное окно

$$W(\omega) = m\left(\frac{\sin(m\omega/2)}{m\omega/2}\right)^2.$$

Во временной области это соответствует умножению автокорреляционной функции на корреляционное окно

$$w(s) = \begin{cases} 1 - |s|/m & \text{при} \quad |s| \le m\,\Delta t; \\ 0 & \text{при} \quad |s| > m\,\Delta t. \end{cases}$$

Оба окна называются окнами Бартлетта. Для чисто случайных процессов отдельные ряды разбиения независимы друг от друга, поэтому дисперсия $\overline{c_{xx}(\omega)}$ в q раз меньше, чем дисперсия $c_{xx}(\omega)$. Существуют и другие окна, которые нашли применение в молекулярной динамике, например окна Тьюки [17].

Выбирая длину m, можно регулировать ширину окна. Если $m \to 0$, то дисперсия спектральной оценки уменьшается, но при этом растет и ширина окна, пропорциональная $1/m$, в результате чего увеличивается смещение спектральной оценки. С другой стороны, узкое спектральное окно, уменьшая смещение, одновременно увеличивает дисперсию. Оптимальный путь состоит в следующем. Сначала проводится пробный спектральный анализ, на основании которого выбирается точка отсечения m там, где пробная корреляционная функция отклоняется от теоретической [14].

Мы подробно рассмотрели эти вопросы по следующей причине. Физики, как правило, незнакомы со спектральным анализом, который объединяет понятия и методы теории вероятностей и анализа Фурье, поэтому в литературе для оценки спектра процесса обычно используют классический анализ Фурье, разработанный для детерминированных функций. В результате спектральная плотность колебаний, вычисленная по данным молекулярно-динамического эксперимента, содержит большие осцилляции нефизического происхождения и дает искаженную картину спектра (см., например, [18]).

Термализация, эргодичность, перемешивание

Молекулярно-динамические исследования деформации и разрушения различных моделей твердых тел (ангармонические цепочки атомов, двумерные и трехмерные кристаллы) открыли новые явления и привели к новым понятиям в физике прочности [11–14, 19]. Это дало возможность связать деформацию и разрушение с широким кругом явлений, в основе которых лежат нелинейные колебания. Сверх того, эти исследования позволили по-новому взглянуть на «неконтролируемое движение частиц макросистемы, которое называют хаотическим, или тепловым, движением» [9].

Рассмотрим, как менялся взгляд на это движение [19]. В 1914 году Дебай (Peter Joseph William Debye, 1884–1966) предположил, что конечная теплопроводность кристаллов вызвана ангармоничностью (нелинейностью) колебаний атомов. Если сила взаимодействия между атомами линейна, то энергия беспрепятственно переносится независимыми нормальными модами. В кристаллической решетке со слабой нелинейностью нормальные моды, вычисленные для линеаризованных упругих сил, станут взаимодействовать и тем самым ограничат перенос энергии. Это предположение побудило Ферми, Паста и Улама (Enrico Fermi, John R. Pasta, Stan M.

Ulam, 1955) поставить численный эксперимент на компьютере Маниак I в Лос-Аламосе. Объектом исследования служила одномерная ангармоническая цепочка из 64 атомов (нелинейных осцилляторов). Функция Лагранжа для системы с одной степенью свободы, совершающей малые колебания, имеет вид

$$L = E_{kin} - U = \frac{m\dot{x}^2}{2} - \frac{k\,x^2}{2}.$$

Здесь E_{kin} — кинетическая энергия; U — потенциальная, m — масса, k — упругая постоянная (такую систему называют линейным одномерным осциллятором). В случае осциллятора со слабой нелинейностью появляется дополнительный член:

$$L = E_{kin} - U = \frac{m\dot{x}^2}{2} - \frac{kx^2}{2} - \frac{\alpha x^3}{3}, \quad \alpha << k,$$

где α — мера нелинейности. При жестко закрепленных концах граничные и начальные условия имеют вид

$$x_0 = 0;\ x_n = n\,a;\ x_i(t=0) = i\,a + A\sin\frac{\pi i}{n};$$

$$\dot{x}_i(t=0) = 0,$$

где a — параметр цепочки.

Таким образом, вначале была возбуждена только одна первая мода. В гармонической (линейной) цепочке энергия осталась бы в этой моде, и высшие моды не могли бы возбуждаться. Из-за нелинейности энергия перетекает от низших мод к высшим, и авторы ожидали, что это в конце концов приведет к равномерному распределению по всем степеням свободы. В таком случае этот численный эксперимент можно было бы рассматривать как модель установления теплового равновесия в системе.

Вопреки ожиданиям результат получился отрицательным. Вначале действительно энергия распределялась по нескольким низшим модам, но затем вновь собиралась в исходной моде с точностью до двух процентов, после чего процесс повторялся. Хотя сам Ферми назвал это явление «insignificant discovery», но эксперимент послужил толчком к многочисленным исследованиям в этой области, которая получила название проблема Ферми — Паста — Улама. Оказалось, что это явление можно описать с помощью представлений о солитонах [20—22].

Одного из авторов статьи интересовал вопрос, что может дать молекулярная динамика физике прочности; в частности, какие процессы, протекающие на атомном уровне, приводят к временной зависимости прочности твердых тел? С этой целью было исследовано растяжение ангармонических цепочек атомов, а также поведение цепочек при постоянной деформации и жестко закрепленных концах [14, 19]. В последнем случае граничные и начальные условия имели вид

$$x_0 = 0;\ x_n = n\,a\,(1+\varepsilon);\ x_i(t=0) = i\,a\,(1+\varepsilon);$$

$$\dot{x}_i(t=0) = A(\varepsilon)\sin\frac{\pi i}{n},$$

где ε — заданная деформация растяжения. Взаимодействие атомов описывалось потенциалом Морзе; при этом наряду с изучением траекторий атомов рассчитывали и спектральную плотность колебаний.

Спектральный анализ колебаний атомов в разных по длине, температуре и деформации растяжения ангармонических цепочках, выполненный с учетом рассмотренных выше рекомендаций, обнаружил повторяемость спектра. Параллельный анализ траекторий атомов привел к открытию новых квазичастиц, получивших название дилатоны, которые представляли собой аномально растянутые связи [14, 19, 23]. В их траекториях также наблюдалась повторяемость, коррелированная с повторяемостью спектра. Чтобы избавиться от дилатонов, мы повторили расчеты Ферми — Паста — Улама на недеформированных цепочках с потенциалом Морзе и в значительно большем временном интервале. В первом цикле повторяемости картина была такой же, как ее наблюдали первооткрыватели, т. е. возбуждались только низшие моды [20—22]. Однако во втором цикле началось возбуждение высоких мод, которые ослабили низшие моды, и повторяемость постепенно исчезла.

Появление высоких мод вызвано ошибками вычисления, которые возникают по ряду причин [14, 24], в их числе: замена дифференциальных уравнений разностными (ошибки усечения); итерационный способ решения (ошибки итерации); разрыв или резкое изменение производной (ошибки разрыва); конечная длина разрядной сетки компьютера (ошибки округления). Ошибки вычисления неизбежны; они приводят к неустойчивости движения и, как следствие, к нео-

братимости. Мерой неустойчивости движения служит энтропия Крылова — Колмогорова, или K-энтропия [9]. Она определяется формулой

$$K(t)=\frac{1}{t}\ln\frac{D(t)}{D(0)},$$

где $D(t)=\sqrt{\left[\mathbf{x}_1(t)-\mathbf{x}_2(t)\right]^2}$ — расстояние между двумя точками в фазовом пространстве двух траекторий, *1* и *2*; $D(0)$ — соответствующее расстояние в начальный момент. Если движение устойчиво, то с ростом t величина $K(t)$ стремится к нулю. Эта формула представляет скорее теоретический интерес и не учитывает дискретную природу компьютера.

Мы оценивали устойчивость движения по удержанию фазовой траектории [14, 25]. Способ заключается в следующем (для простоты рассмотрим одномерный случай). Проинтегрируем при одних и тех же начальных и граничных условиях уравнения движения с разными временными шагами, Δt_1 и Δt_2, например $\Delta t_2=\Delta t_1/2$. Это дает различный шум. Вычислим величины

$$\frac{x(t,\Delta t_1)-x(t,\Delta t_2)}{x(t,\Delta t_1)}=\frac{\Delta x(t)}{x(t)};$$

$$\frac{v(t,\Delta t_1)-v(t,\Delta t_2)}{v(t,\Delta t_1)}=\frac{\Delta v(t)}{v(t)}.$$

Здесь $x(t)$, $v(t)$ — координата и скорость какого-либо атома. Норма вектора отклонения

$$\delta u(t)=\sqrt{\left(\frac{\Delta x(t)}{x(t)}\right)^2+\left(\frac{\Delta v(t)}{v(t)}\right)^2}$$

дает погрешность вычисления фазовой траектории, т. е. вычислительную энтропию

$$D(t)=\sqrt{\left[\mathbf{x}_1(t)-\mathbf{x}_2(t)\right]^2}.$$

Как и в случае спектрального анализа, мы подробно рассмотрели методические вопросы. Причина в том, что в большинстве работ по молекулярной динамике в случае замкнутых систем за критерий точности интегрирования уравнений движения принимают закон сохранения энергии. Однако сохранение полной энергии еще не означает, что сохраняются фазовые траектории.

Вернемся к проблеме Ферми — Паста — Улама. Эта проблема вновь привлекла внимание к вопросу, как система частиц приходит в состояние теплового равновесия. В связи с этим появилось много новых терминов и много гипотез, что затрудняет чтение специализированной литературы. Поскольку эта наша статья, как и предыдущая [1], написана, главным образом, с педагогической целью, рассмотрим кратко эти понятия [5, 10, 19].

Переход системы в состояние, в котором энергия равномерно распределена между собственными колебаниями, называют термализацией ⟨от греч. θερμη — жара, теплота + λυσις — освобождение, разложение⟩. При этом динамические характеристики системы меняются во времени случайным образом и система приобретает статистические свойства. В результате аналитическая механика становится как бы статистической ⟨от греч. στατος — стоящий; статисты, занятые в массовках, обычно стоят, поэтому слово статистика имеет смысл массовости⟩. В соответствии с этим процесс перехода называют еще и стохастизацией ⟨от греч. στοχος — догадка, предположение⟩. Кроме того, под влиянием работ Больцмана (Ludwig Boltzmann) и Гиббса (Josiah Willard Gibbs) применяют термины эргодичность ⟨от греч. εργον — работа + οδος — путь⟩ и перемешивание.

По Больцману, система является эргодической, если при переходе в равновесное состояние фазовые траектории начинают равномерно покрывать всю доступную энергетическую поверхность. Эргодичность в физике обычно связывают с эргодической гипотезой. Она заключается в предположении, что средние по времени значения физических величин равны их средним статистическим значениям. Эта гипотеза часто служит обоснованием статистической физики. В математике говорят об эргодической теории. Здесь рассматривают классические динамические системы, движение которых описывается дифференциальными уравнениями. Такие системы имеют сильные статистические свойства, сходные со свойствами случайного процесса. В этом случае говорят, что классическая динамическая система изоморфна вероятностной.

Согласно Гиббсу, переход в равновесное состояние эквивалентен объединению нескольких идентичных систем, первоначально изолированных, в одну. При этом уравнения движения порождают в фазовом пространстве поток первоначальных состояний, перемешивание которых

приводит к равномерному распределению окончательных состояний по энергетической поверхности. Для иллюстрации перемешивания вначале использовали пример Гиббса — разбавление чернил водой. Затем перешли к более крепким напиткам, и перемешивание стали рассматривать на примере приготовления коктейля из джина и вермута.

Температура и дисперсия

В [1] мы рассмотрели эволюцию понятий температура и теплота, но определение дали только для температуры идеального газа, где температура — это величина, пропорциональная дисперсии функции распределения молекул идеального газа по скоростям. В недавно вышедшей работе [26] подвергнуто критике одно из определений температуры, приводимое в физическом энциклопедическом словаре: «В равновесных условиях температура пропорциональна средней кинетической энергии частиц тела». Авторы [26] указывают, что «это положение справедливо для газов, но категорически не выполняется для твердых тел». Подробно рассмотрев тепловое равновесие в твердом теле, авторы приходят к выводу: «поскольку не удается прийти к простому понятию «температура» исходя непосредственно из характеристик квантовой динамики в твердых телах, поэтому температурой твердого тела предлагается считать температуру газа, находящегося в тепловом равновесии с твердым телом». С критикой приведенного в словаре определения температуры трудно не согласиться, однако то, что предлагают авторы, по существу, представляет собой способ измерения, а не определение понятия.

Изложим нашу точку зрения на этот предмет. Два важнейших достижения характеризуют физику твердого тела в начале двадцатого столетия: теория рассеяния рентгеновских лучей и теория колебаний кристаллической решетки [27]. Последняя теория исходит из того, что тепловые колебания твердого тела представляют собой суперпозицию упругих колебаний, аналогичных звуковым волнам. Чтобы описать уменьшение интенсивности рассеяния рентгеновских лучей под действием тепловых колебаний решетки, пришлось объединить методы обеих теорий. В результате удалось описать уменьшение интенсивности с помощью множителя $\exp(-2W)$, который зависит от температуры. Этот множитель получил название фактора Дебая — Уоллера (Валлера) [27–29]. В литературе величину W обычно определяют формулой

$$W = \frac{3}{2}\frac{\hbar^2 K^2 T^2}{mk\theta^3}\int_0^{\theta/T}\left\{\frac{1}{\exp x - 1} + \frac{1}{2}\right\}x dx.$$

Здесь K^2 — квадрат вектора обратной решетки; m — масса атома; k — постоянная Планка; θ — температура Дебая. Напомним, что температура Дебая представляет собой температуру, выше которой возбуждены все нормальные колебания, а ниже — некоторые моды начинают вымерзать. Для нас важно, что величина W пропорциональна среднему значению квадрата амплитуды колебаний $< u^2 >$ атома в состоянии теплового равновесия при температуре T [29]:

$$2W = \frac{1}{3}K^2 < u^2 >.$$

Из этих формул следует, что при температуре выше дебаевской

$$< u^2 > \cong \frac{9\hbar^2 T}{mk\theta^2}.$$

Среднеквадратичное смещение атома из положения равновесия — это и есть дисперсия. Следовательно, при высоких температурах, как и в случае идеального газа, температура — величина, пропорциональная дисперсии функции распределения. Но эта функция разная: для идеального газа — распределение по скоростям, для твердого тела — по смещениям атомов. Температура ниже дебаевской связана с дисперсией более сложной зависимостью, которую дает фактор Дебая — Уоллера.

Среднеквадратичное смещение атома из положения равновесия, соответствующее нулевым колебаниям, не зависит от температуры и имеет вид [30]

$$< u_0^2 > \cong \frac{\hbar^2}{mk\theta}.$$

Здесь дисперсию связывают не с температурой (поскольку ее нет), а с дисперсией волновой функции осциллятора, которая имеет вид гауссиана $A\exp(-\alpha^2 u^2/2)$ и равна α^{-2}. Квадрат волновой функции дает вероятность нахождения осциллятора на расстоянии u от центра равновесия.

В радиационной физике твердого тела главным объектом изучения являются реальные

кристаллы, которые содержат много разнообразных дефектов, созданных облучением [31–34]. Структура поврежденной области и поведение радиационных дефектов очень сильно зависят от температуры. Поэтому большие усилия были затрачены на то, чтобы построить соответствующую теорию. Лобовой подход не привел к успеху: теоретические результаты плохо согласовывались с экспериментом.

Альтернативой послужил метод, который заключается в следующем [14, 35, 36]. Из двух последних формул следует, что увеличение амплитуды колебаний атомов происходит за счет роста температуры. Однако точно такой же эффект можно получить, если при нулевой температуре уменьшить массу атома. Следовательно, влияние температуры можно оценить, заменив обычную массу на эффективную, зависящую от температуры:

$$m(T) = m\frac{\theta}{9T}.$$

Эта простая формула оказалась очень эффективной. С ее помощью удалось ввести температуру в уравнения механики и получить зависимость от температуры величин, которые являются ключевыми при исследовании радиационных повреждений: переходной энергии (кинетическая энергия налетающей частицы, выше которой кристаллическая мишень ведет себя как аморфный материал), эффективного диаметра столкновения, длины свободного пробега краудиона, размеров субкаскадов и т. п. По-видимому, результативность этой формулы, а также выражений, полученных на ее основе, состоит в том, что она связывает меру хаоса (температура) и меру инерции (масса).

Самоорганизация хаоса

Недостаток любой статистической теории состоит в том, что она дает лишь общее или усредненное описание, не обеспечивая нас всей необходимой информацией относительно поведения многочастичной системы. Характерная особенность таких систем заключается в наличии флуктуаций [10]. Флуктуации ⟨от лат. *fluctuatio* — колебание⟩ — это случайные отклонения физических величин от их средних значений. В статистической физике флуктуации связывают с неконтролируемым движением, которое называют хаотическим, или тепловым [9]. Только «демон Максвелла» (молекулярная динамика) знает все о движении всех молекул. С помощью этого демона можно «разобраться во внутреннем состоянии движения нагретого тела и составить себе об этом некоторое представление». В кинетической концепции прочности полагают, что разрушение есть процесс последовательного разрыва межатомных связей тепловыми флуктуациями, который относится ко всем твердым телам независимо от природы межатомных сил и структурных особенностей материала [37]. Но что такое тепловые флуктуации, разрывающие межатомную связь? Молекулярная динамика показала [14, 19, 38], что разрывная флуктуация — это не просто тепловая флуктуация, а сложное явление, при котором не только возникают флуктуации кинетической и потенциальной энергии, но и образуются области коррелированного движения. Следовательно, можно говорить о структуре разрывной флуктуации и охарактеризовать эту структуру набором параметров. Наиболее неожиданным оказалось то, что во время разрыва возникает область коррелированного движения двух групп атомов, которые окружают разрываемую связь и, двигаясь в противофазе, играют роль захватов; при этом в каждую группу входит от 5 до 7 атомов.

Рассмотрим, что представляет собой коррелированное движение [14, 19, 39]. В молекулярно-динамических экспериментах вычисляли импульс P, усредненный по периоду τ_0 тепловых колебаний атомов:

$$< P(x,t) >_t = \frac{1}{\tau_0}\int_0^{\tau_0} P(x,t)\,dt.$$

Здесь x — координата, t — время. Этот импульс можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$P(x,t) = P_0(x,t) + p(x,t).$$

Первая составляющая соответствует плавному изменению импульса и описывает тренд ⟨англ. *trend* — общее направление, тенденция⟩, вторая — осцилляциям вокруг тренда с частотой порядка частоты атомных колебаний. Среднее значение функции $p(x,t)$ за время τ_0 близко к нулю, функция $P_0(x,t)$ за это время меняется очень мало, поэтому безразмерную величину

$$\eta(x,t) = P_0(x,t) / \frac{1}{L}\int_0^L P(x,t)\,dx$$

можно принять за параметр порядка. Здесь L — размер области коррелированного движения.

Функция распределения параметра порядка, который зависит от пространственных координат, имеет вид [40]

$$f\left(\eta(x)\right) = N\,\exp\left(-\frac{F}{kT}\right),$$

где F — функционал Гинзбурга — Ландау. Он равен

$$F = \int\left\{\frac{\alpha}{2}\eta^2(x) + \frac{\beta}{4}\eta^4(x) + \frac{\gamma}{2}\left[\frac{d\eta(x)}{dx}\right]^2\right\}dx.$$

Здесь η — параметр порядка; коэффициент α зависит от температуры T по закону $\alpha = \alpha_0(T - T_c)$ и меняет знак при определенном пороговом значении параметра T_c; положительные коэффициенты α_0, β не зависят от температуры; γ — коэффициент диффузии параметра порядка. Уравнение релаксации

$$\dot{\eta}(x,t) = -\frac{\delta F}{\delta\eta(x)}$$

дает зависящее от времени уравнение Гинзбурга — Ландау

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} = -\alpha\eta - \beta\eta^3 + \gamma\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}.$$

Молекулярная динамика подсказала, что решение этого уравнения следует искать в виде стационарных бегущих волн $\eta(x,t) = \eta(x - Vt)$. В этом случае уравнение принимает вид

$$\gamma\,\eta'' + V\,\eta' - \alpha\,\eta - \beta\,\eta^3 = 0,$$

где штрих означает дифференцирование по x. Авторы [39] нашли расходящееся решение этого нелинейного уравнения в виде разрывной волны

$$\eta = \eta_0\,\mathrm{cth}\left(\frac{x - Vt}{\Delta} \pm 1\right),$$

где η_0 — амплитуда; Δ — корреляционная длина (рис. 3).

Этот пример показывает, что в хаосе теплового движения может спонтанно образоваться солитоноподобная структура, которая получила название солитон параметра порядка.

Заключение и выводы

В предыдущей статье [1] мы показали, как зарождались такие понятия, как теплота, температура и энтропия от момента возникновения науки о теплоте и до конца XIX века, когда объектом исследования был сначала пар, а затем идеальные и реальные газы. В данной статье рассмотрена эволюция этих понятий в XX-м веке, примерно до начала девяностых годов. Здесь объектом исследования в физике было, в основном, твердое тело. Наряду с физикой, параллельно и практически независимо развивалась информатика, которая внесла свой вклад в развитие этих понятий. Во второй половине XX века появилась тенденция к проникновению информационного подхода в физику. Это было вызвано тем, что компьютеры стали широко применяться в физических исследованиях. В результате родился новый стиль исследования — комбинация численного эксперимента и последующего анализа полученных результатов, который в идеале завершается построени-

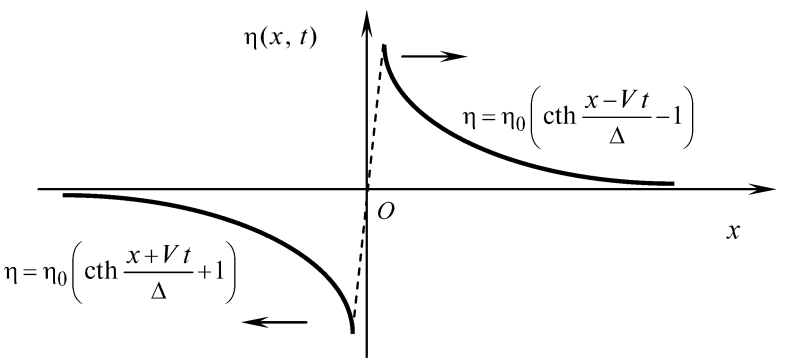


Рис. 3. Солитоны параметра порядка. Обе волны возникают одновременно; входящие в них группы атомов движутся в противофазе и играют роль захватов, растягивающих разрываемую связь

ем теории. Этот стиль становится все более важным для научных открытий.

Подведем промежуточные итоги. Эволюция понятий идет от частного к общему. Самое общее (почти философское) определение теплоты, температуры и энтропии в конце прошлого века могло бы звучать так: теплота — это количество хаоса, температура — это дисперсия хаоса, энтропия — это плотность хаоса. Эти выводы следуют из традиционного подхода к изучению различных моделей конденсированной среды.

Компьютерные, вначале немногочисленные, эксперименты, проведенные во второй половине XX-го века, показали, что хаос, даже в твердых телах, обладает структурой. Однако основной вопрос — как теплота связана с видами движения частиц системы — остался, как и во времена Больцмана, на уровне гипотез. Поэтому приведенные выше определения следует считать предварительными.

Газы и твердые тела — это предельные агрегатные состояния вещества. Наряду с ними существуют жидкости и полимеры. Полимерами называют вещества, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся групп — мономеров. Если число атомов в молекуле превышает 1000, то такую молекулу называют макромолекулой (Hermann Staudinger, 1922). Считают, что дальнейшее увеличение числа мономеров не меняет существенно свойства макромолекулы. Полимеры обладают свойствами, которые делают их похожими и на жидкости, и на твердые тела одновременно, поэтому их выделяют в особый класс — *soft condensed matter* (в русской литературе этот термин еще не прижился).

Моделирование свойств полимеров и биополимеров показало, что эта мягкая конденсированная среда обладает большой склонностью к самоорганизации [41–43]. В связи с этим возникли новые проблемы и вопросы: каковы механизмы самоорганизации, как при этом ведут себя температура и энтропия, сохраняется ли первоначальный смысл этих понятий? Эти вопросы мы рассмотрим в следующей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Melker, A.I.** Heat, Temperature, Entropy [Текст] / A.I. Melker, S.A. Starovoitov, T.V. Vozobyeba // Materials Phisics and Mechanics.— Proc. of the Thizteentn Int. Workshop jn Nano-Design, Technology and Computer Simulations.— 2010. Vol. 9. № 3.— P. 194–209.

2. Словарь иностранных слов [Текст].— М.: ГИИНС, 1954.— 856 с.

3. Longman Dictionary of English Language and Culture [Текст].— Essex, England: Addison Wesley Longmans Limited, 1992.— 1528 pp.

4. Новый иллюстрированный энциклопедический словарь [Текст].— М.: Большая Российская энциклопедия, 2000.— 912 с.

5. Математический энциклопедический словарь [Текст].— М.: Советская энциклопедия, 1988.— 848 с.

6. **Бауэр, Ф.Л.** Информатика [Текст] / Ф.Л. Бауэр, Г. Гооз.— М.: Мир, 1976.— 488 с.

7. **Бриллюэн, Л.** Научная неопределенность и информация [Текст] / Л. Бриллюэн. М.: Мир, 1966.— 268 с.

8. **Мелькер, А.И.** Ноофизика (Наука и ученые) [Текст] / А.И. Мелькер / Санкт-Петербургская академия наук по проблемам прочности.— СПб., 2006.— 152 с.

9. **Климонтович, Ю.Л.** Статистическая физика [Текст] / Ю.Л. Климонтович.— М.: Наука, 1982.— 608 с.

10. **Балеску, Р.** Равновесная и неравновесная статистическая механика. Том 1–2 [Текст] / Р. Балеску.— М.: Мир, 1978.— 406 и 400 с.

11. **Мелькер, А.И.** Моделирование эксперимента [Текст] / А.И. Мелькер // Серия: Физика 1991. Вып. 10.— М.: Знание, 1991.— 64 с.

12. **Мелькер, А.И.** Физика конденсированного состояния и компьютерное моделирование [Текст] / А.И. Мелькер // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ.— 2006. № 3(45).— С. 118–125.

13. **Melker, A.I.** Fiftieth anniversary of molecular dynamics [Текст] / A.I. Melker // Proceedings of SPIE.— Vol. 6597 (SPIE, Bellingham, WA, 2007) 659702-1— 659702-36.

14. **Мелькер, А.И.** Моделирование на ЭВМ разрушения твердых тел [Текст]: Дис. ... докт. физ.-мат. наук / А.И. Мелькер.— Л., 1987.— 445 с.

15. **Дженкинс, Г.** Спектральный анализ и его приложения. Том 1-2 [Текст] / Г. Дженкинс, Д. Ваттс.— М.: Мир, 1971-72.

16. **Заславский, Г.М.** Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний [Текст] / Г.М. Заславский, Б.В. Чириков.— Успехи физических наук.— 1971. Т. 105, № 1.— С. 3–39.

17. **Melker, A.I.** Calculation of energy characteristics of point defects in bcc iron by molecular dynamic technique [Текст] / A.I. Melker, D.B. Mizandrontzev, V.V. Sirotinkin // Z. Naturforsch.— 1990. Bd. 46a.— P. 233–239.

18. **Евсеев, А.М.** Молекулярно-динамическое исследование совершенных и несовершенных кристаллов [Текст] / А.М. Евсеев, В.М. Дергачев // Физика твердого тела.— 1976. Т. 18. № 8. — С. 2270–2276.

19. **Мелькер, А.И.** Динамика конденсированных сред. Часть 1. Колебания и волны [Текст] / А.И. Мелькер / Санкт-Петербургская академия наук по проблемам прочности.— СПБ., 2004.— 235 с.

20. **Скотт, Э.** Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике [Текст] / Э. Скотт.— М.: Сов. радио, 1977.— 384 с.

21. **Ньюэлл, А.** Солитоны в математике и физике [Текст] / А. Ньюэлл.— М.: Мир, 1989.— 324 с.

22. **Филиппов, А.Т.** Многоликий солитон [Текст] / А.Т. Филиппов.— М. Наука, 1990.— 288 с.

23. **Мелькер, А.И.** Новые квазичастицы в деформированных ангармонических цепочках [Текст] / А.И. Мелькер // Численные методы механики сплошной среды.— Новосибирск.— 1981. Т. 12, № 1.— С. 82–94.

24. **Nordsieck, A.** On numerical integration of ordinary differential equations [Текст] / A. Nordsieck // Math. Comput. 1962. Vol. 16. № 77. P. 22–49.

25. **Мелькер, А.И.** Моделирование нелинейных колебаний одномерной цепочки методом молекулярной динамики [Текст] / А.И. Мелькер, А.И. Михайлин, Н.П. Лиходедов, О.А. Усов.— Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР.— № 661.— Л., 1980.— 28 с.

26. **Слуцкер, А.И.** Понятие температуры и особенности теплового равновесия в системе твердых тел [Текст] / А.И. Слуцкер, Ю.И. Поликарпов, Д.Д. Каров // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2008. № 3(59).— С. 94–101.

27. **Слэтер, Дж.** Диэлектрики, полупроводники, металлы [Текст] / Дж. Слэтер.— М.: Мир, 1969. — 648 с.

28. **Займан, Дж.** Принципы теории твердого тела [Текст] / Дж. Займан.— М.: Мир, 1974.— 472 с.

29. **Китель, Ч.** Квантовая теория твердых тел [Текст] / Ч. Китель.— М.: Наука, 1967.— 492 с.

30. **Гюйе, Р.** Физика квантовых кристаллов [Текст] / Р. Гюйе.— В кн.: Квантовые кристаллы / Под ред. С.В. Вонсовского.— М.: Мир, 1975.— С. 23–133.

31. **Томпсон, М.** Дефекты и радиационные повреждения в металлах [Текст] / М. Томпсон.— М.: Мир, 1971.— 368 с.

32. Радиационные дефекты в металлах [Текст] / Под ред. А.Т. Лукъянова.— Алма-Ата: Наука, 1981.— 296 с.

33. **Кирсанов, В.В.** Процессы радиационного дефектообразования в металлах [Текст] / В.В. Кирсанов, А.Л. Суворов, Ю.В. Трушин.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 272 с.

34. **Кирсанов, В.В.** ЭВМ-эксперимент в атомном материаловедении [Текст] / В.В. Кирсанов.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 304 с.

35. **Мелькер, А.И.** Статистика структуры поврежденных областей, созданных ПВА в металлах и сплавах [Текст] / А.И. Мелькер // В кн.: Радиационные дефекты в металлах / Под ред. А.Т. Лукъянова.— Алма-Ата: Наука, 1981.— С. 15–23.

36. **Melker, A.I.** Defect clusters and subcascades. II.The spliting threshold and subcascades dimensions [Текст] / A.I. Melker, S.N. Romanov, N.L. Tarasenko // Physica status solidi (b). — 1986. Vol. 133. № 1.— P. 111–118.

37. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский.— М.: Наука, 1974.— 560 с.

38. **Мелькер, А.И.** Разрушающие флуктуации энергии в ангармонической цепочке атомов [Текст] / А.И. Мелькер, А.И. Михайлин // Физика твердого тела.— 1981. Т. 23. № 6.— С. 1746–1750.

39. **Мелькер, А.И.** Солитоны параметра порядка в ангармонической цепочке атомов [Текст] / А.И. Мелькер, И.А. Овидько // Физика твердого тела.— 1985. Т. 27. № 2. — С. 594–597.

40. **Хакен, Г.** Синергетика [Текст] / Г. Хакен.— М.: Мир, 1980.— 408 с.

41. **Воробьева, Т.В.** Молекулярно-динамическое исследование самоорганизации цепных макромолекул [Текст]: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Т.В. Воробьева.— СПб., 1994.— 110 с.

42. **Соловьев, Д.В**. Молекулярно-динамическое исследование деформации полиэтилена [Текст]: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Д.В. Соловьёв.— СПб., 1998.— 156 с.

43. **Френкель, З.М.** Изучение самоорганизации биополимеров методом молекулярной динамики [Текст]: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / З.М. Френкель.— СПб., 2002.— 230 с.

УДК 62-533.7

Б.В. Сидельников, М.А. Беляев, И.Л. Суворов

ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ОРИЕНТИРОВАННОЕ НА ПОЛУЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

В последнее время в научно-технической литературе отмечается очередной всплеск интереса к вопросу о возможности повышения КПД асинхронного электродвигателя (АД) при частотном управлении. В частности, целый ряд авторов [1 и др.] считают, что для АД насосных агрегатов, где используются, как правило, скалярные законы управления, для поддержания максимального КПД η АД при различных нагрузках необходимо обеспечивать оптимальное абсолютное скольжение $\beta_0 = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_{1н}$ ($\omega_{1н}$ — номинальная синхронная скорость, ω_1 — текущая синхронная скорость, ω_2 — скорость вала АД). Наиболее полные результаты, касающиеся этого вопроса, были получены в работах [2, 3], где на основе аналитических исследований показано следующее:

1. Для АД, работающего в линейной зоне характеристики намагничивания (условно ненасыщенная машина), значение β_0 практически не зависит от момента M нагрузки, но снижается по мере снижения синхронной частоты $f_1(\omega_1)$.

2. Для АД, работающего в нелинейной зоне характеристики намагничивания (насыщенная машина), значение β_0 снижается при уменьшении M.

3. Нелинейность характеристики намагничивания АД при прочих равных условиях приводит к снижению КПД.

4. В общем случае в точке максимума КПД насыщенной машины не выполняется равенство ее магнитных и электрических потерь.

Отметим, что все количественные результаты упомянутых работ получены по схеме замещения АД без учета насыщения. Что касается насыщенной машины, то согласно [3] нельзя получить в общем виде формулу, выражающую закон регулирования по минимуму потерь, а можно найти только общие условия и признаки, характеризующие экстремум. Поэтому для насыщенной машины предлагается приблизительный закон управления в виде стабилизации магнитного потока Ф в зависимости от β_1 и M, обеспечивающий минимум потерь в данной рабочей точке.

Объект и методика

В нашей статье, наряду с аналитической оптимизацией, предложен алгоритм, позволяющий проводить численный анализ влияния величин U и β_1 на значение КПД АД при заданной механической характеристике с учетом основных сопутствующих факторов, в том числе насыщения.

При решении задач использовалась преобразованная схема замещения [4,5,6] с сопротивлением магнитных потерь (r_m), вынесенным на зажимы источника питания (рис. 1), и общепринятые для АД относительные единицы (о. е.) измерений.

Для пересчета параметров обычной Т-образной схемы замещения [2] используется вещественная поправка $\delta_x = 1 + (r_1/r_m)$, весьма близкая к единице. Поэтому сопротивления x_1', r_1', x_2', r_2'', x_a' могут быть взяты непосредственно из каталогов. Значение r_m определяется по величине магнитных потерь $p_{маг}$.

Рассмотрим условно ненасыщенную машину ($x_a' = \text{const}$). Для оценки оптимального скольжения s_0, обеспечивающего максимальный КПД (минимум потерь для заданной рабочей точки), пренебрегаем током намагничивания $\dot{I}_m$ и ак-

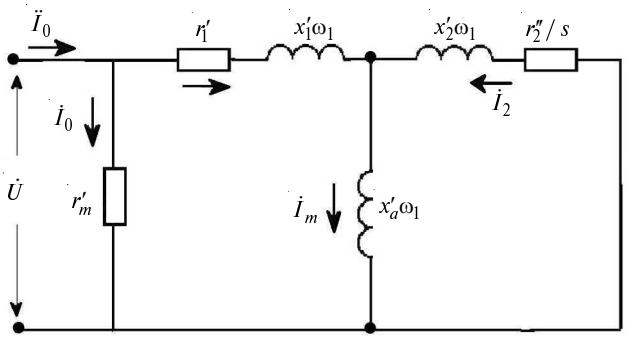


Рис. 1. Упрощенная схема замещения АД

тивным сопротивлением r_1 (что допустимо для достаточно больших значений ω_1): $\dot{I}_2 = I_1$, $\dot{U} = \dot{I}_2\left(\left(r_2'/s\right) + j\left(x_2' + x_1\right)\omega_1\right)$. При заданных величинах момента на валу M и частот ω_1 и ω_2 (соответственно скольжение будет $s = \left(\omega_1 - \omega_2\right)/\omega_1$) нетрудно определить потери АД:

$$\Delta p = M\frac{\omega_2\left[(r_2')^2 + s^2(\omega_1 x_2')^2 + (r_1 + r_2')s_2 r_m\right]}{C_M r_2' r_m (1-s)s} + p_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{мех}}$ — механические потери в выбранной рабочей точке.

Выражение (1) имеет минимум при

$$s_{\text{опт}} = \frac{r_2'\sqrt{(r_2')^2 + (\omega_1 x_2')^2 + (r_1 + r_2')r_m} - (r_2')^2}{(\omega_1 x_2')^2 + (r_1 + r_2')r_m}. \quad (2)$$

Для более грубой оценки, учитывая малость величин $(\omega_1 x_2')^2$ и $(r_2')^2$ по сравнению с r_m, можно пользоваться формулой

$$s_{\text{опт}} = \frac{r_2'}{\sqrt{(r_1 + r_2')r_m}}. \quad (3)$$

Обратим внимание, что выражение (3) совпадает с представленным в [7] выражением, если дополнительно учесть, что $x_a^2 \gg r_1$.

Следует отметить, что подобные (2), (3) аналитические зависимости имеют лишь относительную ценность, так как не учитывают ряд факторов, в том числе насыщение АД.

Получение «прозрачной» аналитической зависимости, характеризующей оптимальный режим работы с учетом всех элементов схемы замещения и кривой намагничивания машины, — очень сложная задача.

В принципе, ее решение с учетом всех определяющих факторов и необходимых ограничений по значениям I_1, U и Φ возможно численными методами. Однако прямой подход потребует значительного усложнения алгоритма поиска [8]. Поэтому в работе реализован следующий алгоритм.

В качестве исходных в относительных единицах задают:

параметры схемы замещения, включая сопротивление магнитных потерь r_m и ненасыщенное значение сопротивления намагничивания контура x_a;

электромагнитный момент M_e;

текущую синхронную частоту ω_1;

ряд значений абсолютного скольжения $\beta = \omega_1 - \omega$;

механические потери $p_{\text{мех}}$;

коэффициент насыщения k_μ в формуле для определения насыщенного сопротивления

$$x_{a\text{нас}} = \frac{x_a}{1 + k_\mu \Phi^5}.$$

Находим ток вторичного контура схемы (рис. 1):

$$I_2 = \sqrt{\frac{M_e\beta}{r_2'}}.$$

Совмещая вектор тока $\dot{I}_2$ с вещественной осью, рассчитываем напряжение $\dot{U}_{12}$, приложенное ко второму контуру:

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_2\frac{r_2'}{S} + \dot{I}_2 j\omega_1 x_2'. \quad (4)$$

С другой стороны,

$$\dot{U}_{12} = -j\omega_1\dot{\Phi}. \quad (5)$$

Из (4), (5) получаем

$$\dot{\Phi} = jI_2\frac{r_2'}{\beta} - I_2 x_2'.$$

Соответственно величина потока равна

$$\Phi = \sqrt{\left(\mathrm{Re}\dot{\Phi}\right)^2 + \left(\mathrm{Im}\dot{\Phi}\right)^2}.$$

Согласно рис. 1 $\dot{I}_m j x_{a\text{нас}} \omega_1 = -\dot{U}_{12}$, следовательно

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{\Phi}}{x_{a\text{нас}}};\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}_2.$$

Напряжение, подаваемое на двигатель, равно

$$\dot{U} = \dot{I}_1\left(r_1 + j\omega_1 x_1\right) + \dot{I}_m j\, x_{a\text{нас}}\omega_1,$$

а его модуль —

$$U = \sqrt{\left(\mathrm{Re}\dot{U}\right)^2 + \left(\mathrm{Im}\dot{U}\right)^2}.$$

Ток, потребляемый двигателем, и его модуль соответственно равны

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}}{r_m};$$

$$I = \sqrt{\left(\mathrm{Re}\,\dot{I}\right)^2 + \left(\mathrm{Im}\,\dot{I}\right)^2}.$$

Потери мощности: $p_{\text{эл1}} = I_1^2 r_1$; $p_{\text{эл2}} = I_2^2 r_2$; $p_{\text{мг}} = \frac{U^2}{r_m}$. Их сумма равна

$$\Delta p = p_{\text{мг}} + p_{\text{эл1}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{мех}}.$$

Активная мощность, потребляемая АД, выражается формулой

$$P_1 = \mathrm{Re}\dot{U}\,\mathrm{Re}\,\dot{I} + \mathrm{Im}\dot{U}\,\mathrm{Im}\,\dot{I}.$$

Тогда мощность на валу — это

$$P_2 = P_2 - \Delta P\ \left(P_2 = M_e\omega_1 - P_{\text{мех}}\right).$$

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности:

$$\eta = P_2/P_1;\ \cos\varphi = P_1/UI.$$

Алгоритм реализован в системе MathCad и позволяет в диалоговом режиме при заданных M_e и ω_1 определять зависимость η от β (или s) и все соответствующие параметры режима. Поскольку АД согласно [2] и [3] имеет один оптимум функции $\eta(\beta)$, нет необходимости задавать широкий диапазон изменения β (или s), уточняя значения и шаг изменения β в зависимости от результатов расчета.

Механические потери $p_{\text{мех}}$ зависят от частоты вращения вала ω, что необходимо принимать во внимание при широком диапазоне регулирования скорости АД. Далее при проведении численных экспериментов принято $p_{\text{мех}} = p_{\text{мехн}}\omega_1$.

В качестве примера рассмотрим работу погружного электродвигателя ПЭД-32-117ЛГВ-5, испытания которого проводились в АО «Электросила». Его номинальные данные: $P_{\text{н}} = 32$ кВт, $U_{\text{н}} = 1000$ В, $I_{\text{н}} = 26{,}5$ А, $s_{\text{н}} = 5{,}5$ %, $\cos\varphi = 0{,}86$, $f_{\text{н}} = 50$ Гц, $n_{1\text{н}} = 3000$ об/мин. Из опытов холостого хода и короткого замыкания были получены следующие параметры [в о.е.]: $r_1 = 0{,}042$; $x_1 = 0{,}065$; $r_2' = 0{,}053$; $x_2' = 0{,}065$; $r_m = 50$; $k_{\text{м}} = 0{,}35$; $p_{\text{мех}} = 0{,}01$, $x_a = 3{,}36$.

Относительное значение электромагнитного момента в номинальном режиме ($\omega_1 = 1$, $U = 1$) равно $M_e = 0{,}85$. Номинальный режим при относительных значениях напряжения $U = 1$ о.е., частоте питания $\omega_1 = 1$ о.е. и моменте $M_e = 1$ о.е. соответствует $s = 0{,}055$, $\eta = 0{,}875$. В то же время оптимальный $\eta = 0{,}883$ достигается при $\beta = (0{,}035–0{,}04)$ и повышении U от $U_{\text{ном}}$ на (10–20) % (см. таблицу). Сопоставление результатов расчетов с опытом свидетельствуют об адекватности представленной модели.

Таблица 1

Основные свойства двигателя при изменении абсолютного скольжения β в области максимума КПД

β	s	p_Σ	cosφ(β)	U	I_1	Φ	η
0,030	0,030	0,113	0,687	1,304	1,017	1,226	0,878
0,035	0,035	0,107	0,781	1,206	0,955	1,136	0,883
0,040	0,040	0,107	0,838	1,129	0,946	1,063	0,883
0,045	0,045	0,110	0,872	1,068	0,960	1,002	0,880
0,050	0,050	0,14	0,894	1,016	0,985	0,951	0,875
0,055	0,055	0,119	0,908	0,973	1,015	0,907	0,870

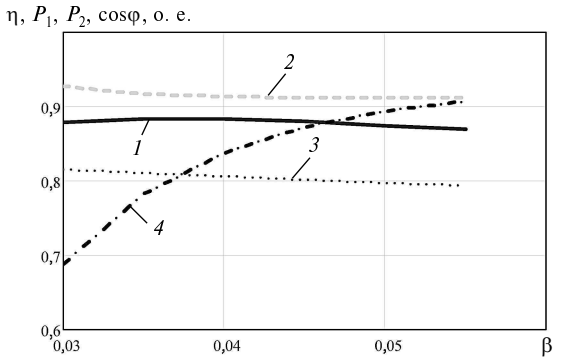


Рис. 2. Характеристики исследуемого АД в номинальном режиме:
1 — η; *2* — P_1; *3* — P_2; *4* — cosφ

Результаты исследования

Численные эксперименты, качественно подтверждая выводы [2, 3], дают возможность получения достаточно точных количественных показателей. Например, по известной характеристике рабочего механизма можно найти оптимальное (в смысле максимального КПД) соотношение между напряжением U и частотой ω_1 при заданных параметрах машины, а также сделать следующий ряд выводов, представляющих самостоятельную ценность:

1. В области максимума коэффициента полезного действия отмечается его малое изменение при относительно широкой вариации скольжения (рис. 2, табл. 1).

Это свидетельствует о том, что для получения η, близкого к максимальному, не нужна очень высокая точность искомых значений U и ω_1, и найденные оптимальные соотношения между ними для различных параметров и характеристик нагрузки могут быть реализованы на практике. Отметим также, что пологий характер оптимума свойственен «правильно спроектированным машинам». Например, если в двигателе с названными выше параметрами принять $r_2' = 0{,}033$, зависимость η от β будет иметь более выраженный экстремум. Однако, даже в этом случае область изменения ω, в которой η отличается от максимального не более, чем на $\Delta\eta = 0{,}005$, остается достаточно широкой — $0{,}022 < \beta < 0{,}028$ (рис. 3).

Таблица 2

Результаты исследования АД при различных законах управления («насыщенный» АД и «ненасыщенный» АД)

а) — «насыщенный» АД

Закон управления	Задаваемые (варьируемые) параметры режима, о. е.		Результаты расчета, о. е.			
	M_e	ω_1	β	η	U	Ф
$\frac{U}{\omega\sqrt{\omega}} = \text{const}$	0,85	1,0	0,050	0,875	1,02	0,83
	0,64	0,75	0,050	0,860	0,86	0,83
	0,43	0,5	0,055	0,7815	0,36	0,65
	0,21	0,25	0,050	0,500	0,130	0,43
$\beta = 0{,}04 = \text{const}$	0,85	1,0	0,040	0,883	1,13	1,06
	0,64	0,75	0,040	0,864	0,74	0,92
	0,43	0,50	0,040	0,820	0,41	0,76
	0,21	0,25	0,040	0,683	0,15	0,53
$\frac{U}{\omega_1} = 1{,}13 = \text{const}$ ($\Phi \approx 1{,}06$)	0,85	1,0	0,040	0,883	1,13	1,06
	0,64	0,75	0,030	0,872	0,85	1,06
	0,43	0,50	0,020	0,846	0,567	1,06
	0,21	0,25	0,010	0,741	0,28	1,06
$\beta = \beta_{опт}$	0,85	1,0	0,040	0,883	1,13	1,06
	0,64	0,75	0,030	0,872	0,85	1,06
	0,43	0,50	0,024	0,850	0,52	0,96
	0,21	0,25	0,015	0,782	0,231	0,86

Окончание табл. 2

б) — «ненасыщенный» АД

Закон управления	Задаваемые (варьируемые) параметры режима, о. е.		Результаты расчета, о. е.			
	M_e	ω_1	s	η	U	Ф
$s = s_{опт}$	0,85	1,0	0,025	0,890	1,40	1,34
	0,64	0,75	0,031	0,888	0,95	1,22
	0,43	0,50	0,034	0,869	0,62	1,16
	0,21	0,25	0,040	0,800	0,27	1,06
$s = s_{опт}$ с ограничениями по U и Ф	0,85	1,0	0,036	0,892	1,18	1,12
	0,64	0,75	0,037	0,884	0,87	1,11
	0,43	0,50	0,038	0,867	0,58	1,11
	0,21	0,25	0,040	0,800	0,27	1,06

2. Оптимальный по условию $\eta = \eta_{max}$ закон управления зависит от параметров АД, вида нагрузки и требуемого регулирования скорости вала. Например, для исследуемого АД при моменте на валу $M_T = 0{,}85\omega$ условие $U/\omega_1 = \text{const}$ практически совпадает с оптимальным до точки, где $M_T = 0{,}43$ о.е. и $\omega = 0{,}5$ о.е. (табл. 2). В этом случае работа системы ПЧ-АД остается в рамках скалярных законов управления. В частности, для насосных установок, обеспечивающих стабилизацию давления, реализация алгоритма управления представляется достаточно простой.

3. В работе [2] подчеркивается, что регулирование с постоянным абсолютным скольжением β для условно ненасыщенного АД практически совпадает с регулированием по закону М.П. Костенко с *IR*-компенсацией для произвольной механической характеристики. Заметим, что для «насыщенного» двигателя ПЭД-32-117ЛГВ-5 при $M_T = k\omega$ и ограниченном диапазоне регулирования скорости вала закон М.П. Костенко $U/\omega\sqrt{\omega_1} = 1$ практически соответствует условию $\beta = 0{,}05 = \text{const}$ (см. табл. 2). Однако с целью получения максимума η желательно увеличить отношение $U/\omega\sqrt{\omega_1}$ до 1,13, при этом для $\beta = 0{,}04 = \text{const}$ удается увеличить КПД на 0,6–0,8 %. В целом для иных видов нагрузки управление по $\beta = \text{const}$ для насыщенной машины также оказывается значительно ближе к соответствующим формулам М.П. Костенко, чем к закону поддержания оптимального абсолютного скольжения β_0.

4. Для получения максимального КПД ненасыщенной машины при различных нагрузках целесообразно ориентироваться на поддержание оптимальным относительного, а не абсолютного скольжения. Например, при $\omega_1 = \text{const}$ и вариации M_T величина s_0 практически не изменяется, в отличие от β_0, причем для $\omega_1 = 1$ относительное скольжение s_0 может быть найдено по формуле (3). Интересно, что для рассматриваемого двигателя при $k_\mu = 0$ максимальный КПД ($\eta = 0{,}897$) можно получить при $s_0 = 0{,}025$. Однако для этого напряжение U в номинальном режиме следует увеличить на 30–40 % с аналогичным ростом рабочего потока Ф. Если поставить ограничение $U < 1{,}2$ о.е., то при $s = 0{,}035$ – $\eta = 0{,}892$, т. е. на 1 % больше, чем у «насыщенной» машины (табл.2), естественно, имеющей лучшие массогабаритные показатели.

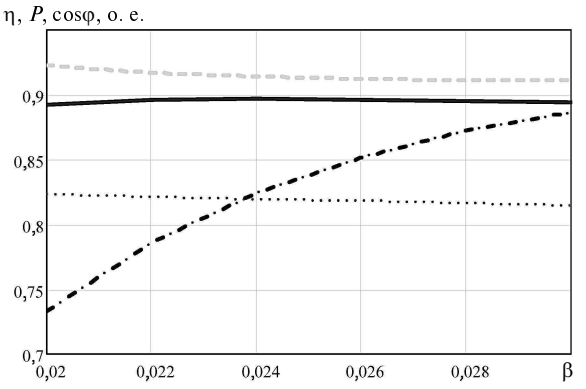


Рис. 3. Характеристики исследуемого АД в номинальном режиме при $r_2' = 0{,}033$:
(*1* — η; *2* — P_1; *3* — P_2; *4* — cosφ)

Разработанная математическая модель и проведенные на ее основе исследования с коррекцией приводят к некоторым известным теоретическим положениям. Полученные результаты могут быть полезны, а также являются первым шагом при создании экономически целесообразной и простой в реализации системы частотного регулирования АД малой и средней мощности (например, для центробежных насосов, работающих на противодавление).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гришин, А.П.** Закон регулирования преобразователя частоты при питании погружного электронасоса [Текст] / А.П. Гришин // Журнал: С.О.К., рубрика «Сантехника и водоснабжение». —2007. № 7.

2. **Булгаков, А.А.** Частотное управление асинхронными электродвигателями [Текст] / А.А. Булгаков.— М.: Наука, 1966.— 2-е изд., доп.

3. **Сандлер, А.С.** Частотное управление асинхронными двигателями [Текст] / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов.— М.: Энергия, 1974.— С. 328.

4. **Сидельников, Б.В.** Корректировка метода опытного определения параметров асинхронного двигателя [Текст] / Б.В. Сидельников, Г.С. Рогачевская // Сб. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика».— Днепродзержинск, 2007.— С. 513–515.

5. **Popescu, M.** Modeling in stationary frame reference o single and two-phase induction machines including the effect of iron loss and magnetizing flux saturation [Текст] / M. Popescu, V. Navvapesen / Intern. conf. on electrical machines.— Helsinki. University o Technology. Finland.— ICEM.— 2000. T. 1.— P. 407–411.

6. **Guemes, J.A.** A new equivalent circuit for three-phase induction motors [Текст] / J.A. Guemes, J.I. del Hogo / International conference on electrical machines.— Helsinki. University o Technology. Finland.— ICEM.— 2000. T. 1. — P. 402–408.

7. **Волянская, Я.Г.** Энергетическая оптимизация асинхронного электропривода путем плавного регулирования напряжения [Текст] / Я.Г. Волянская // Сб. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика».— Днепродзержинск, 2007.

8. **Черноруцкий, И.Г.** Оптимальный параметрический синтез: электротехнические устройства и системы [Текст] / И.Г. Черноруцкий.— Л.: Энергоатомиздат, 1987.

УДК 621.315

М.В. Дмитриев, М.Р. Кияткина

ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

Силовые кабели высокого напряжения 6–500 кВ современных конструкций все более широко используются для передачи и распределения электроэнергии, особенно в крупных городах и на промышленных предприятиях, где уровень электропотребления и плотность нагрузки достаточно значительны. Наибольшее распространение получают силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Высокое напряжение жилы однофазного кабеля в сетях классов 6 кВ и более приводит к необходимости использования металлического экрана, выполняемого в виде проволок и/или ленты. Основное его назначение — обеспечить равномерность электрического поля, воздействующего на главную изоляцию кабеля (изоляция «жила — экран»), что достигается только в случае заземления экрана. Заземление экрана удобно выполнять по концам кабеля, так как там, как правило, имеются заземляющие устройства.

Экраны современных однофазных кабелей 6–500 кВ выполнены из хорошо проводящего материала (медь); их заземление одновременно на обоих концах кабеля (рис. 1, *а*), если не приняты специальные меры, ведет к появлению в экранах и в нормальном симметричном режиме, и при коротких замыканиях значительных токов, сопоставимых с током жилы кабеля*.

* **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 152 с.

Токи и напряжения в экранах однофазных кабелей обусловлены только однофазной конструкцией этих кабелей и не имеют никакого отношения к материалу их изоляции (сшитый полиэтилен и проч.).

Измерения, выполненные на многих кабельных линиях различных классов напряжения (6–500 кВ), свидетельствуют о том, что при использовании однофазных кабелей надо обращать повышенное внимание на выбор способа соединения и заземления экранов и проводить соответствующие обосновывающие расчеты.

В качестве примера приведем для типового кабеля 10 кВ одной из энергосистем ОЭС Центра результаты прямых измерений токов в экранах, заземленных на обоих концах кабеля. Параметры кабеля: сечение жилы — 500 мм^2, сечение экрана 95 мм^2, длина — 2500 м. В нормальном установившемся режиме работы при токах 186 А в жилах трех фаз измеренный ток в экране каждой фазы составлял 115 А. В случае выхода указанного кабеля на номинальную нагрузку (ток в жиле около 700 А) ток в экране пропорционально возрастет до 430 А, что недопустимо много для сечения экрана 95 мм^2. В настоящее время от повреждений, вызванных нерасчетным тепловым режимом, рассмотренный кабель спасает лишь его сравнительно малая нагрузка, это же спасает и многие другие неверно спроектированные и уже находящиеся в эксплуатации кабельные линии с однофазными кабелями.

Другим примером может служить группа однофазных кабелей 630/35 мм^2 класса 35 кВ (длина 1500 м), питающих один из металлургических комбинатов Урала. Измерения в нормальном установившемся режиме работы показали, что при значении тока в жилах около 900 А ток в экранах составлял приблизительно 300 А. Столь большой ток, длительно протекавший в экране сечением 35 мм^2, привел к вплавлению экрана в изоляцию кабеля, т. е. фактически к повреждению кабеля.

Для борьбы с токами в экранах используют заземление экранов с одной стороны (рис. 1, *б*) или их транспозицию (рис. 1, *в*).

Способ соединения и заземления экранов кабелей оказывает заметное влияние:

на величину тока в экране (неправильное заземление экрана может даже привести к повреждению кабеля);

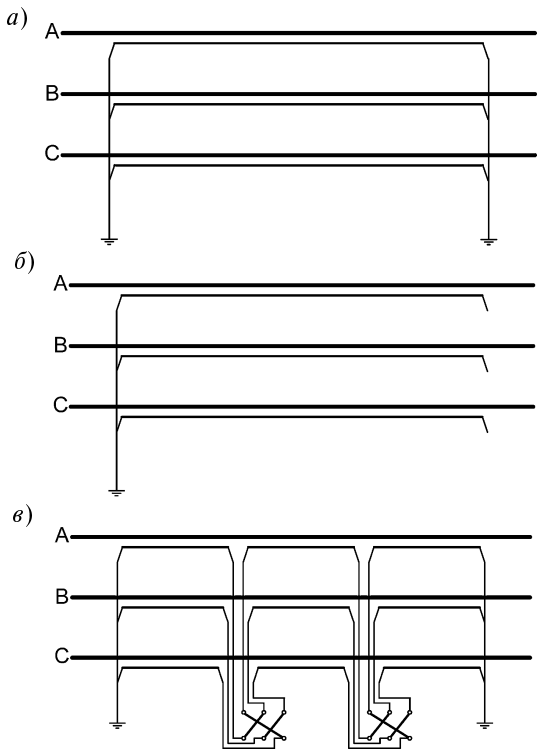


Рис.1. Схемы соединения экранов группы из трех однофазных кабелей:

а — экраны заземлены с двух сторон;
б — экраны заземлены с одной стороны;
в — экраны заземлены с двух сторон и транспонированы

на электрические потери в экране, а значит, на его тепловой режим и пропускную способность;

на величину напряжения экрана относительно земли, т. е. на надежность работы кабеля и безопасность его обслуживания;

на основные электрические параметры кабеля (продольные активное и индуктивное сопротивления).

Любопытный факт: по состоянию на 2008–2009 годы в России некоторые проектирующие и эксплуатирующие организации не имеют представления о проблемах, которые порождает неверное заземление и соединение экранов однофазных кабелей, в том числе так называемая «неидеальная» транспозиция.

При транспозиции экранов однофазных кабелей трехфазной кабельной линии (КЛ) участки между узлами транспозиции стараются по возможности сделать равной длины и с одинаковым способом прокладки кабелей (обычно «в треугольник»). Однако вследствие разных

причин (ограничения по длинам участков кабеля, по выбору места установки транспозиционных муфт и коробок транспозиции, а также при выполнении закрытых переходов и «проколов» КЛ) транспозиция может оказаться «неидеальной» — участки будут неодинаковыми, и, значит, в экранах кабелей будут протекать токи. Оценим величины этих токов при различных типах «неидеальной» транспозиции.

Рассмотрим КЛ, состоящую из трех однофазных кабелей, в которой экраны транспонированы, применен один полный цикл транспозиции (рис. 2). В общем случае участки КЛ между узлами транспозиции *1*, *2*, *3* могут иметь разную длину и конструкцию. Токи экранов и падения напряжения на них следующие:

$$\dot{I}_{эA}^{(1)} = \dot{I}_{эB}^{(2)} = \dot{I}_{эC}^{(3)} = I_{э1};$$

$$\dot{I}_{эB}^{(1)} = \dot{I}_{эC}^{(2)} = \dot{I}_{эA}^{(3)} = I_{э2};$$

$$\dot{I}_{эC}^{(1)} = \dot{I}_{эA}^{(2)} = \dot{I}_{эB}^{(3)} = I_{э3};$$

$$\Delta\dot{U}_{эA}^{(1)} + \Delta\dot{U}_{эB}^{(2)} + \Delta\dot{U}_{эC}^{(3)} = \Delta\dot{U}_{э1};$$

$$\Delta\dot{U}_{эB}^{(1)} + \Delta\dot{U}_{эC}^{(2)} + \Delta\dot{U}_{эA}^{(3)} = \Delta\dot{U}_{э2},$$

$$\Delta\dot{U}_{эC}^{(1)} + \Delta\dot{U}_{эA}^{(2)} + \Delta\dot{U}_{эB}^{(3)} = \Delta\dot{U}_{э3}.$$

Запишем уравнения для падения напряжения вдоль экранов кабелей с учетом возможности «неидеальной» транспозиции:

$$\Delta\dot{U}_{э1} = \Big[\dot{Z}_{э}^{(1)}\dot{I}_{э1} + \dot{Z}_{жэ}^{(1)}\ \dot{I}_{жA} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(1)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э2}\right) + \dot{Z}_{AC}^{(1)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э3}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(2)}\dot{I}_{э1} + \dot{Z}_{жэ}^{(2)}\dot{I}_{жB} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(2)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э3}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(2)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э2}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(3)}\dot{I}_{э1} + \dot{Z}_{жэ}^{(3)}\dot{I}_{жC} +$$

$$+\dot{Z}_{AC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э2}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э3}\right)\Big],$$

$$\Delta\dot{U}_{э2} = \Big[\dot{Z}_{э}^{(1)}\dot{I}_{э2} + \dot{Z}_{жэ}^{(1)}\dot{I}_{жB} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(1)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э1}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(1)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э3}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(2)}\dot{I}_{э2} + \dot{Z}_{жэ}^{(2)}\dot{I}_{жC} +$$

$$+\dot{Z}_{AC}^{(2)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э3}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(2)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э1}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(3)}\dot{I}_{э2} + \dot{Z}_{жэ}^{(3)}\dot{Z}\dot{I}_{жA} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(3)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э3}\right) + \dot{Z}_{AC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э1}\right)\Big], \qquad (1)$$

$$\Delta\dot{U}_{э3} = \Big[\dot{Z}_{э}^{(1)}\dot{I}_{э3} + \dot{Z}_{жэ}^{(1)}\dot{I}_{жC} +$$

$$+\dot{Z}_{AC}^{(1)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э1}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(1)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э2}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(2)}\dot{I}_{э3} + \dot{Z}_{жэ}^{(2)}\dot{I}_{жA} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(2)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э1}\right) + \dot{Z}_{AC}^{(2)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э2}\right)\Big] +$$

$$+\Big[\dot{Z}_{э}^{(3)}\dot{I}_{э3} + \dot{Z}_{жэ}^{(3)}\dot{I}_{жB} +$$

$$+\dot{Z}_{AB}^{(3)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э2}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э1}\right)\Big],$$

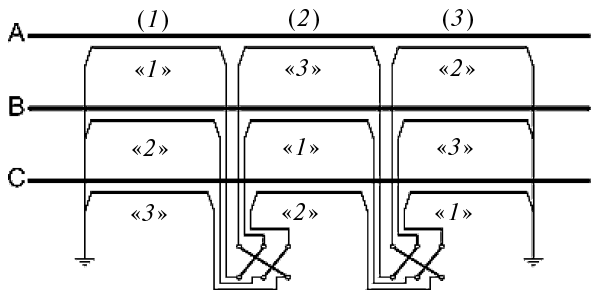


Рис. 2. Транспонированная КЛ

где $\dot{Z}_{э}^{(1)}$, $\dot{Z}_{э}^{(2)}$, $\dot{Z}_{э}^{(3)}$ — собственные сопротивления экрана, $\dot{Z}_{жэ}^{(1)}$, $\dot{Z}_{жэ}^{(2)}$, $\dot{Z}_{жэ}^{(3)}$ — взаимные сопротивления между жилой и экраном одного и того же кабеля; $\dot{Z}_{XY}^{(1)}$, $\dot{Z}_{XY}^{(2)}$, $\dot{Z}_{XY}^{(3)}$ — взаимные сопротивления жил (экранов) соседних кабелей соответственно на участках *1*, *2*, *3*; $\dot{I}_{жA}$, $\dot{I}_{жB}$, $\dot{I}_{жC}$ — токи жил *A*, *B*, *C* кабеля; $\dot{I}_{э1}$, $\dot{I}_{э2}$, $\dot{I}_{э3}$ — токи экранов «*1*», «*2*», «*3*».

Таким образом, можно корректно учесть сколь угодно сложную геометрию транспониро-

ванной КЛ. В качестве примера рассмотрим случаи, когда два первых участка имеют одинаковую длину и конструкцию «треугольник», а третий отличается от них или длиной, или способом прокладки («в ряд» вместо «в треугольник»).

Случай 1. Участки между узлами транспозиции имеют разную длину. В уже упомянутой публикации* приведена методика оценки токов в экранах в подобных случаях и предложена формула

$$\dot{I}_{э} = -\frac{\dot{Z}_{жэ} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{э} - \dot{Z}_{к}} K_{т} \dot{I}_{ж}, \qquad (2)$$

где $\dot{Z}_{э}$ — собственное сопротивление экрана; $\dot{Z}_{жэ}$ — взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабеля; $\dot{Z}_{к}$ — взаимные сопротивления жил (экранов) соседних кабелей при расположении их «в треугольник» (выражения для сопротивлений см. в [1]); $\dot{I}_{ж}$ — ток жилы кабеля; $K_{т}$ — коэффициент транспозиции,

$$K_{т} = \frac{L_1 + \left(-0,5 - j0,5\sqrt{3}\right) L_2 + \left(-0,5 + j0,5\sqrt{3}\right) L_3}{L_1 + L_2 + L_3};$$

L_1, L_2, L_3 — длины участков транспонированной линии.

Случай 2. Участки между узлами транспозиции имеют разный способ прокладки кабелей. Пусть два первых участка имеют конструкцию «треугольник», а третий — «ряд»; длины всех трех участков одинаковы. Напряжения вдоль экранов кабелей найдем из (1) с учетом того, что экраны кабелей двусторонне заземлены ($\Delta \dot{U}_{Э} = 0$), и в симметричном режиме токи жил кабелей образуют тройку векторов прямой последовательности ($\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{жB} + \dot{I}_{жC} = 0$):

$$0 = \dot{Z}_{э}\dot{I}_{э1} + \dot{Z}_{к}\left(\dot{I}_{жC} + 2\dot{I}_{э2} + 2\dot{I}_{э3}\right) +$$

$$+ \dot{Z}_{AC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{э2}\right) + \dot{Z}_{BC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э3}\right);$$

$$0 = \dot{Z}_{э}\dot{I}_{э2} + \dot{Z}_{K}\left(\dot{I}_{жA} + 2\dot{I}_{э1} + 2\dot{I}_{э3}\right) +$$

$$+ \dot{Z}_{AB}^{(3)}\left(\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{э3}\right) + \dot{Z}_{AC}^{(3)}\left(\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э1}\right); \qquad (3)$$

$$0 = \dot{Z}_{э}\dot{I}_{э3} + \dot{Z}_{K}\left(\dot{I}_{жB} + 2\dot{I}_{э1} + 2\dot{I}_{э2}\right) +$$

$$+ \dot{Z}_{AB}^{(3)}\left(\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{жC} + \dot{I}_{э1} + \dot{I}_{э2}\right).$$

Полученные уравнения можно решить относительно токов экранов (численно или аналитически). Достаточно простые аналитические выражения можно получить, если дополнительно положить $\dot{I}_{э1} + \dot{I}_{э2} + \dot{I}_{э3} = 0$:

$$\dot{I}_{э1} = \frac{\dot{Z}_{AC}^{(3)} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{э} - 2\dot{Z}_{к} - \dot{Z}_{AC}^{(3)}} \dot{I}_{жC},$$

$$\dot{I}_{э2} = \frac{\dot{Z}_{AC}^{(3)} - \dot{Z}_{к}}{\dot{Z}_{э} - 2\dot{Z}_{к} - \dot{Z}_{AC}^{(3)}} \dot{I}_{жA}; \qquad (4)$$

$$\dot{I}_{э3} = \frac{\dot{Z}_{к} - \dot{Z}_{AC}^{(3)}}{2\dot{Z}_{к} + \dot{Z}_{AC}^{(3)} - \dot{Z}_{э}} \dot{I}_{жB}.$$

В качестве примера определим токи в экранах трехфазной группы однофазных кабелей типа 500/95 мм^2, в жилах которых проходит ток 1000 А в двух указанных случаях «неидеальной» транспозиции. Результаты расчетов даны в табл. 1, 2, где через дробь указаны значения токов для трех экранов (если одна цифра, значит, для всех экранов результат совпадает).

Итак, резюмируя влияние транспозиции экранов, можно утверждать:

на величину тока в экране «неидеально» транспонированной линии решающее значение

Таблица 1

Токи в экранах при их транспозиции; кабели проложены «в треугольник», длина участка *3* отличается от длин участков *1* и *2* в K_L раз

Расчетная формула	Токи в экранах, А, при пяти значениях K_L				
	0,1	0,5	1	2	10
Расчет в EMTP	104/104/105	47/47/47	3	64/64/65	181/182/183
Расчет по (2)	108	50	0	63	189

Таблица 2

Токи в экранах при их транспозиции (на участках 1 и 2 кабели проложены «в треугольник», на участке 3 — «в ряд» с различным расстоянием «в свету» между кабелями *s*; длины участков равны)

Расчетная формула	Токи в экранах, А, для пяти значений расстояний s, м, между кабелями				
	0	0,1	0,2	0,5	1
Расчет в EMTP	60/60/20	138/129/68	178/166/110	240/224/175	289/271/227
Расчет по (3)	59/57/21	136/127/66	176/164/109	238/222/174	287/269/226
Расчет по (4)	65	147	187	247	294

оказывает способ прокладки кабелей на разных участках — по возможности они должны иметь одинаковую конструкцию; в противном случае транспозиция экранов будет неэффективна (см. табл.2);

если длины участков транспонированной КЛ различаются, в экранах кабелей также будут протекать токи, и при значительной (в разы) разнице в длинах участков транспозиция может оказаться неэффективной (см. табл. 1);

для приблизительной оценки максимального тока экрана при различных конструкциях участков между узлами транспозиции можно использовать простое выражение (4).

УДК 537.84:537.9

С.И. Кривошеев, В.С. Помазов, Г.А. Шнеерсон

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА СКИН-СЛОЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕГАГАУСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Современные средства численного эксперимента позволяют описать процесс электрического взрыва проводника при экстремально высокой линейной плотности тока. Изучение этого процесса актуально в связи с созданием установок, в токоведущих частях которых эта величина может достигать значений порядка 10^8–10^9 А/м. Взрыв скин-слоя, происходящий в таких условиях, представляет собой сочетание процесса нелинейной диффузии поля в среду с резко изменяющимися свойствами и гидродинамического течения за фронтом ударной волны, инициированной магнитным давлением сверхсильного поля. При компьютерном моделировании конкретных экспериментов эти процессы рассматриваются совместно.

В статье наряду с полным расчетом будет уделено внимание описанию роли отдельных факторов, определяющих взрыв скин-слоя. Такой подход необходим, чтобы понять физический механизм этого процесса.

Особенности формирования ударной волны в сверхсильном магнитном поле

При резко выраженном скин-эффекте указанным выше значениям линейной плотности тока соответствует индукция внешнего поля B_e масштаба 100–1000 Т. Простая модель, описывающая распространение в среде ударной волны, инициированной магнитным полем, исходит из предположения об идеальной проводимости материала. В таком случае глубина проникновения магнитного поля (и толщина токового слоя) бесконечно мала, и можно считать, что воздействие электромагнитных сил на среду подобно действию идеального непроницаемого магнитного поршня.

Условие Ренкина — Гюгонио и эмпирическое соотношение для скорости фронта ударной волны $D = c_1 + \lambda u_f$ позволяют вывести связь скорости среды за фронтом и магнитной индукции при стационарном течении [1, 4]:

$$p_{\text{ф}} = \rho_0 D\left(\frac{D-c_1}{\lambda}\right); \qquad \frac{B^2}{2\mu_0} = \rho_0 u_f D, \qquad (1)$$

где ρ_0 — начальная плотность среды; u_f — скорость среды за фронтом УВ; D — скорость фронта ударной волны; c_1, λ — эмпирические параметры среды (c_1 приблизительно равно скорости звука; $\lambda = 1{,}53$ — для меди).

Из формулы (1) вытекают выражения для u_f и D [1]:

$$u_f = \frac{c_1}{2\lambda}\left(\sqrt{1+\frac{B^2}{\bar{B}^2}}-1\right); \; D = \frac{c_1}{2}\left(\sqrt{1+\frac{B^2}{\bar{B}^2}}+1\right), \quad (2)$$

где $\bar{B} = c_1\sqrt{\mu_0\rho_0/2\lambda}$ — характерная индукция среды (для меди $\bar{B}$ = 250 Т). Если $B << \bar{B}$, выражение (2) приобретает следующий простой вид: $u_f \approx B^2/(2\mu_0\rho_0 c_1)$. В другом крайнем случае, когда $B >> \bar{B}$, $u_f \approx B/\sqrt{2\lambda\mu_0\rho_0} = u_a/\sqrt{2\lambda}$, где u_a — альфеновская скорость. В диапазоне $0 < B \le 4\bar{B}$ (то есть в полях до 1000 Т) удобна аппроксимация Ширера [1]:

$$u_f \approx a_0 B^{3/2} \text{ (для меди } a_0 = 0{,}15). \qquad (3)$$

На основании численных расчетов показано, что эти формулы справедливы не только в режиме установившегося течения, но и на фронте импульса внешнего поля. Согласно формуле (2) скорость фронта определяется мгновенным значением индукции. При выбранных условиях расчета это условие приближенно выполняется, что показывает рис.1. На нем представлены значения скорости фронта ударной волны в зависимости от индукции: вычисленные по (2) с использованием аппроксимации (3) и непосредственно определенных из численного эксперимента для двух зависимостей $B(t) = B't$, но с различной скоростью нарастания B' = const.

В рассматриваемой модели токовый слой бесконечно малой толщины всегда отстает от фронта ударной волны (рис. 1, *а*). Ситуация может измениться в случае, когда токовый слой имеет конечную толщину. При этом формируется своеобразное течение с распределенным полем объемных сил, примыкающих к фронту ударной волны. Часть тока может оказаться перед фронтом ударной волны в области, где проводимость холодного металла выше, чем проводимость нагретого металла в скин-слое. Есть основания ожидать, что это приведет к появлению специфического распределения магнитного поля вблизи фронта ударной волны с образованием двух максимумов на пространственной кривой плотности тока (рис. 2, *б*). На рис. 2 приведены примеры этих двух различных гидродинамических течений, полученные в результате численных расчетов, описанных в следующем разделе.

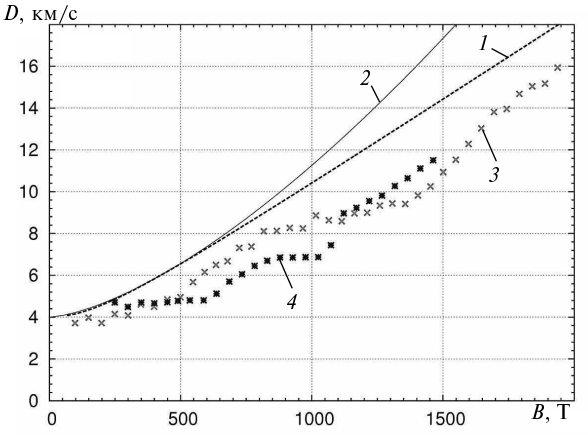


Рис. 1. Зависимость скорости D фронта ударной волны от мгновенного значения индукции B внешнего магнитного поля;

1 — рассчитано по формуле (2); *2* — аппроксимация Ширера (3); *3* — получено из вычислительного эксперимента для скорости нарастания внешнего магнитного поля $B' = 10^9$ Т/с; *4* — $B' = 10^{10}$ Т/с

Можно оценить условие появления этого эффекта при линейно нарастающем магнитном поле. Процесс нелинейной диффузии описывается моделью с зависимостью проводимости от объемной тепловой энергии вида $\sigma = \sigma_0/\left(1+2\mu_0\Delta q'/B_0^2\right)$, где σ — удельная проводимость, $\Delta q'$ — объемная тепловая энергия, а B_0 — характерная индукция (для меди B_0 = = 42 Т) [3–5].

При условии $B >> B_0$ формируется специфическое немонотонное распределение плотности тока с характерным максимумом (рис. 2, *а*). Его координату

$$\Delta_j = \frac{B}{B_0}\sqrt{\frac{t}{\mu_0\sigma_0}} \qquad (4)$$

можно при оценках считать координатой «магнитного поршня», создающего давление $B^2/(2\mu_0)$.

Условие, при котором часть тока будет сосредоточена перед фронтом ударной волны, можно представить следующим образом:

$$\Delta_j \geq \Delta_f , \qquad (5)$$

где $\Delta_f \approx \int_0^t D dt$ — расстояние, пройденное фронтом ударной волны. Из формулы (1) следует выражение для D:

$$D = \frac{B^2}{2\mu_0 \rho_0 u_f} .$$

Используя аппроксимацию Ширера (3), получаем $D = \sqrt{B}/(2\mu_0 a_0 \rho_0)$. Если поле нарастает линейно ($B = B't$), путь, пройденный фронтом ударной волны, можно оценить по формуле

$$\Delta_f = \int_0^t D dt = \frac{1}{3a_0 \mu_0 \rho_0} \sqrt{B'}\, t^{3/2}. \qquad (6)$$

Исходя их условия (5) приходим к неравенству

$$\frac{\sqrt{B'} t^{3/2}}{2a_0 \mu_0 \rho_0} \geq \frac{B' t}{B_0} \sqrt{\frac{t}{\mu_0 \sigma_0}}. \qquad (7)$$

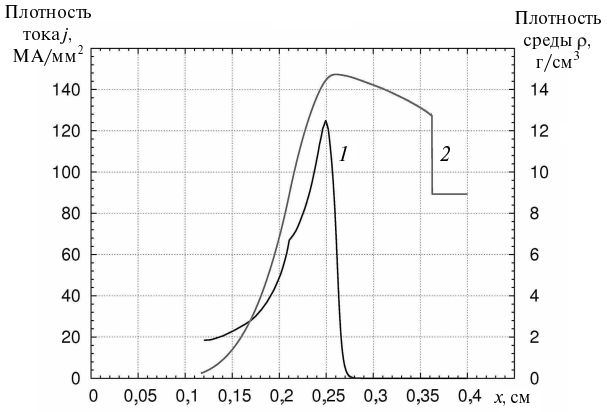
Отсюда получаем оценку порогового значения скорости нарастания индукции, при которой возможно ожидать появления второго максимума на распределении плотности тока (рис. 2, *б*):

$$B' \geq B'_{thr} = \frac{1}{9} \frac{B_0^2 \sigma_0}{\mu_0 a_0^2 \rho_0^2}. \qquad (8)$$

Для меди B_0 = 42 Т, ρ_0 = 8,9·10^3 кг·м$^{-3}$, σ_0 = 5,7·10^7 (Ом·м)$^{-1}$, откуда B'_{thr} = 5·10^9 Т/с.

Представляет интерес изучить возможность существования второго максимума тока после того, как индукция внешнего поля перестает нарастать и принимает фиксированное значение B_m. Если магнитный поршень отстает от фронта ударной волны в процессе нарастания поля, то после выхода индукции на постоянное значение это отставание сохранится. Иначе, есть основания считать, что если второй максимум плотности тока не образуется на фронте импульса индукции, то он не образуется и в дальнейшем. В тех случаях, когда второй максимум имеет место, можно ожидать, что после выхода внешнего поля на постоянное значение, амплитуда второго максимума плотности тока будет со временем уменьшаться. Для проверки этих предположений использовано численное моделирование процесса.

а)



б)

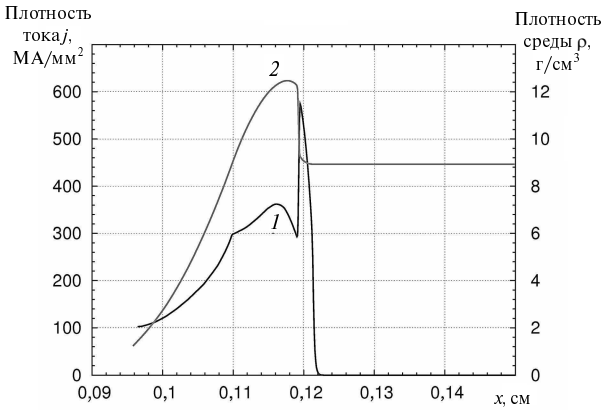


Рис. 2. Пространственное распределение плотности тока (*1*) и плотности среды (2), сформированное нелинейной диффузией сверхсильного поля по закону $B = B't$ для различных B' и моментов времени: *а* — B' = 2·10^9 Т/с, t = 450 нс; *б* — B' = 2·10^{10} Т/с, t = 30 нс

Компьютерное моделирование процесса формирования ударной волны, инициированной сверхсильным магнитным полем

Для подтверждения высказанных предположений проведена серия численных расчетов с использованием программы МАГ [6, 7]. Рассматривались процесс диффузии магнитного поля и формирование гидродинамического течения в меди, что описывается уравнением состояния Гаранина [8, 9] и проводимостью, определенной моделью Бакулина — Лучинского [10]. Нулевой координате соответствует начальное положение границы раздела «вакуум — проводник». Ниже приведены некоторые результаты

расчета диффузии магнитного поля с линейным нарастанием $B' = 10^9$ и $B' = 10^{10}$ Т/с и выходом на стационарное значение $B = 500$ Т после 50 нс.

На рис. 3, 4 представлены распределения плотности тока и плотности среды в стадии, когда ток нарастает по линейному закону. Следует отметить, что при скорости нарастания индукции $B' = 10^{10}$ Т/с наблюдается характерный второй максимум плотности тока, возможность образования которого рассмотрена выше. В поле со скоростью нарастания $B' = 10^9$ Т/с второго максимума плотности тока не наблюдается. Результаты серии расчетов позволяют найти пороговое значение B'_{thr}. Оно составляет около $B'_{thr} \approx \approx (5–7)\cdot 10^9$ Т/с, что приближенно соответствует приведенной оценке.

После прекращения нарастания индукции картина распределения тока и плотности в случае относительно медленного нарастания поля $\left(B' < B'_{thr}\right)$ остается качественно такой же, как на фронте импульса. Иная картина имеет место в случае высокой скорости нарастания. Со временем амплитуда второго максимума уменьшается: все меньшая часть тока оказывается сосредоточенной перед фронтом ударной волны (рис. 5). Это можно объяснить тем, что в постоянном поле (используем систему координат, связанную со средой) происходит рост толщины скин-слоя в соответствии с зависимостью $\Delta_j \approx B/B_0\sqrt{\gamma_0 t/\mu_0} \sim \sqrt{t}$. При этом скорость проникновения поля падает $(\partial\Delta_j / \partial t \sim t^{-\frac{1}{2}})$, тогда как

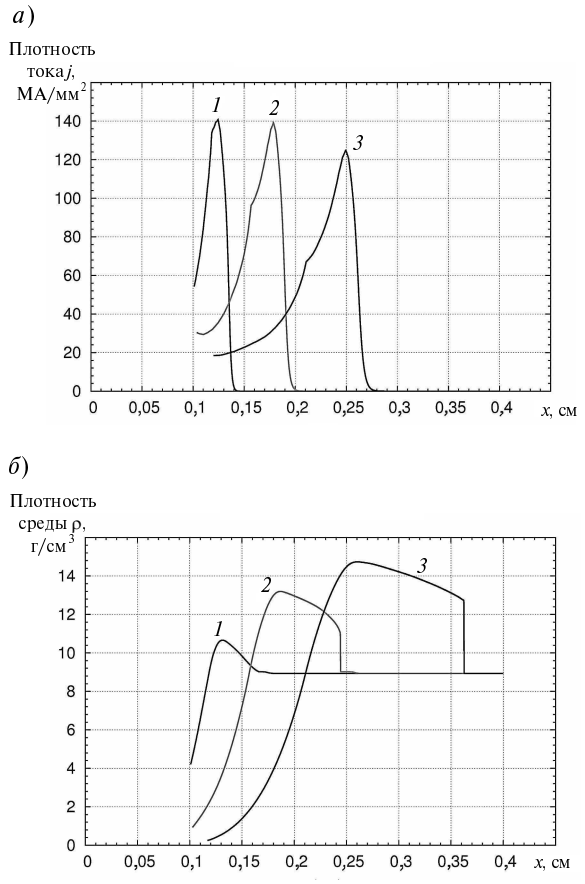


Рис. 3. Распределение плотности тока (*а*) и плотности среды (*б*) в пространстве при $B' = 2\cdot 10^9$ Т/с в различные моменты времени: *1* — t = 150 нс (B = 300 Т); *2* — t = 300 нс (B = 600 Т); *3* — t = 450 нс (B = 900 Т)

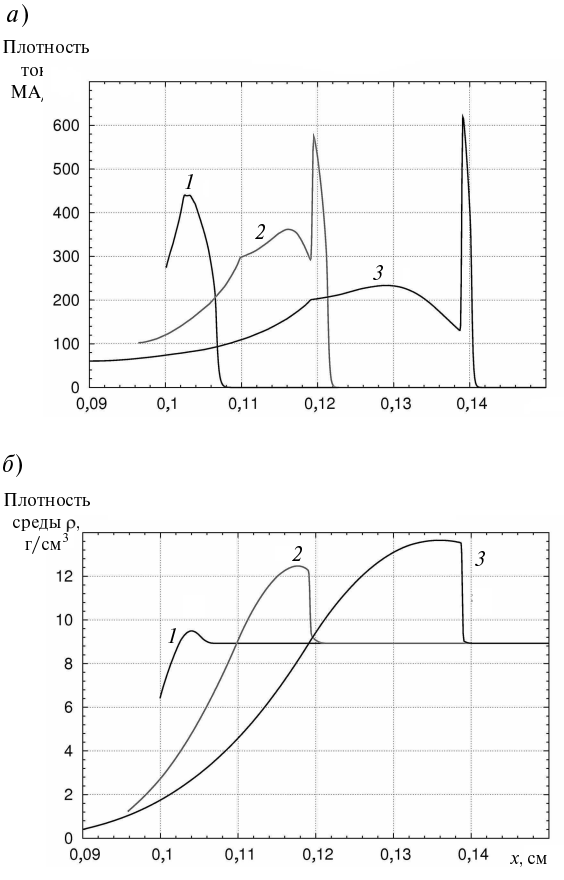


Рис. 4. Распределение плотности тока (*а*) и плотности среды (*б*) в пространстве при $B' = 2\cdot 10^{10}$ Т/с в различные моменты времени: *1* — t = 10 нс (B = 200 Т); 2 — t = 30 нс (B = 600 Т); 3 — t = 50 нс (B = 1000 Т)

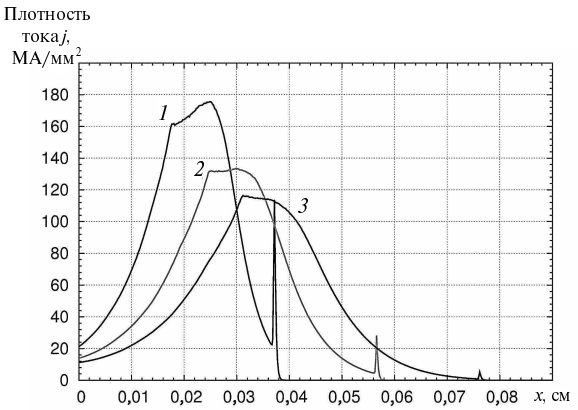


Рис. 5. Распределение плотности тока в пространстве в различные моменты времени *1* — t = 75 нс; *2* — t = 100 нс; *3* — t = 125 нс после выхода внешнего поля на стационарное значение B = 500 Т через 50 нс (скорость нарастания поля $B' = 10^{10}$ Т/с)

фронт ударной волны имеет постоянную скорость. Поэтому токовый фронт отстает от фронта ударной волны. В системе координат, связанной с фронтом ударной волны, получаем, что имеет место диффузия тока, сосредоточенного в области второго максимума (перед фронтом ударной волны), через плоскость фронта. В итоге второй максимум тока уменьшается.

Представляет интерес характер течения элементов среды, находящихся вблизи границы. Представление об этом дает координата лагранжевой точки, расположенной вблизи края расчетной области. До начала испарения этот элемент смещается под действием электромагнитной силы в положительном направлении. Однако после начала взрыва теряющие проводимость элементы среды меняют направление движения и приобретают отрицательную скорость. Через некоторое время скорость опять меняет знак, и устанавливается течение в положительном направлении. В стационарном режиме скорость границы остается ниже скорости течения за фронтом (рис. 6). Иначе говоря, граничные элементы сохраняют отрицательную скорость по отношению к элементам среды, находящимся вблизи фронта. Причиной такого «реверсивного» движения, отмеченного в работах [11, 12] является изменение знака объемной силы $f_x = -\partial P/\partial x + jB(x)$. Пример распределения объемной силы представлен на рис. 7.

Аналитические оценки для скорости ударной волны, рассчитанные при допущении об идеальной проводимости, приближенно соответствуют результатам компьютерного расчета в полях с индукцией до 1500 Т.

На основе анализа результатов численного моделирования и расчетов по аналитическим моделям взаимодействия сверхсильных импульсных магнитных полей с проводником выявлена возможность формирования двух различных режимов магнитогидродинамического течения. Первый из них реализуется при скорости нарастания

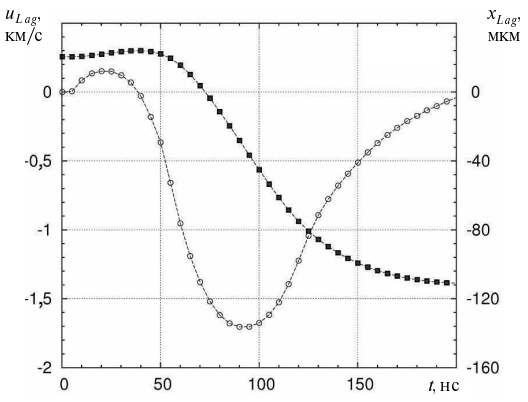


Рис. 6. Зависимость скорости U_{Lag} (*1*) и координаты x_{Lag} (*2*) лагранжевой ячейки, расположенной вблизи границы «внешнее поле — проводник», от времени

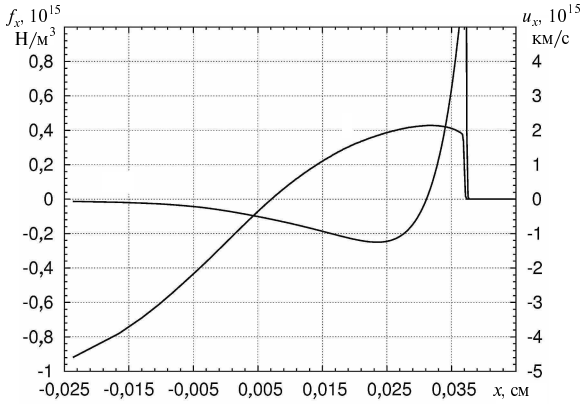


Рис. 7. Пространственное распределение объемной силы $f_x = -\partial P/\partial x + jB(x)$ (*1*) и скорости течения u_x (*2*) в момент времени t = 75 нс

индукции на границе $B' \le 5 \cdot 10^9$ Т/с; в этом режиме ударная волна в среде всегда распространяется со скоростью, превышающей скорость диффузии магнитного поля в проводник. При $B' \ge 7 \cdot 10^9$ Т/с скорость диффузии магнитного поля в начальной фазе превышает скорость ударной волны, что приводит к формированию токового распределения имеющего два максимума, один из которых находится перед фронтом ударной волны.

В тех случаях, когда индукция внешнего поля после нарастания с высокой скоростью принимает постоянное значение, второй максимум плотности тока затухает вследствие диффузии тока через плоскость фронта ударной волны.

Характерной особенностью течения элементов среды, находящихся вблизи границы, является реверс их скорости и отставание от течения за фронтом ударной волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shearer, J.W.** Interaction of capacitor bank-produced Megagauss Magnetic Field with small Single-turn Coil [Текст] / J.W. Shearer // J. Appl. Phys.— 1969. Vol. 40. P. 4490–4497.

2. **Spielman, R.B.** Limitations of Laboratory Pulsed Power Systems for Multi-Megagauss Field Generation [Текст] / R.B. Spielman, S. Chantrenne, H.D. McDaniel // Proc. of the Eleventh Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.— London.— 10–14 September 2000 (2007).

3. **Bryant, A.R.** The effect of Joule heating on the diffusion of megagauss fields into metals [Текст] / A.R. Bryant // Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments.— 1965.— P. 183.

4. **Кнопфель, Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля [Текст] / Г. Кнопфель.— М.: Мир, 1972.— 392 с.

5. **Shneerson, G.A.** On theory of electrical explosion of skin-layer in ultra-high magnetic fields [Текст] / G.A. Shneerson // J. Tech.Phys.— 1973. Vol. 43. № 2.— P. 419–427.

6. **Chabourov, M.** Virtual physics laboratory of the package MASTER [Текст] / M. Chabourov, V. Roudenko, E. Tchekhounov // Proc. Intern. Conf. «Physics Teacher Education beyond 2000».— Barcelona, 2000.

7. **Boriskov, G.V.** User Software MAG for Personal Computers as a Tool for Numerical Simulation of One-Dimensional Magneto-Hydrodynamic Flows [Текст] / G.V. Boriskov, M.I. Dolotenko, V.V. Rudenko, M.V. Shaburov // Proc. VIII Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.— 1998.

8. **Garanin, S.F.** Cooling down of plasma in magnetic field on the bound with exploding metal wall [Текст] / S.F. Garanin, V.I. Mamyshev // AMTPh.— 1990. №1. — P. 30–37.

9. **Buyko, A.M.** Investigation of the dynamics of cylindrical exploding liner accelerated by a magnetic field in megagauss range [Текст] / A.M. Buyko, S.F. Garanin, V.A. Demidov [et all.] // Magagauss field in pulsed power systems (MG-V).— 1989.— P. 743.

10. **Bakulin, J.D.** Magnetic hydrodynamics calculation of exploding conductors [Текст] / J.D. Bakulin, V.F. Kuropatenko, A.V. Luchinsky // JTPh.— 1976.— Vol. 46, № 9.— P.1963.

11. **Колгатин, С.Н.** Численное моделирование электрического взрыва проводника в сверхсильном магнитном поле [Текст] / С.Н. Колгатин, А.Я. Полищук, Г.А. Шнеерсон // ТВТ.— 1993. Т. 31. № 6.— С. 890–896.

12. **Krivosheyev, S.I.** Peculiarities of conducting medium MHD flow under skin layer electrical explosion in a megagauss magnetic field [Текст] / S.I. Krivosheyev, G.A. Shneerson, N.G. Karykhanov // Magagauss field in pulsed power systems (MG-IX).— 2000.— P. 529.

УДК 621.762.4

К.К. Мертенс, П.А. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Изучение физико-механических свойств порошковых материалов при динамических нагрузках представляет собой весьма сложную задачу, так как рассматриваемые свойства зависят от большого количества разнообразных факторов: химического состава, структурного строения и физического состояния, характера и параметров внешней нагрузки и др.

Высокоскоростное нагружение порошка вызывает изменение его физических свойств и приводит, в частности, к увеличению сопротивляемости порошкового тела деформации, что необходимо учитывать при теоретическом анализе и проектировании техпроцессов [1].

Основные механические свойства порошковых материалов, характеризующие их сопротивляемость внешним воздействиям, в общем случае определяются следующим:

законом сжимаемости, т. е. зависимостью между действующими нормальными напряжениями и соответствующими объемными деформациями;

законом формоизменения, т. е. зависимостью между касательными напряжениями и деформациями сдвига;

условием предельного состояния или прочности материала, определяющим предельное соотношение между нормальными и касательными напряжениями в материале по площадкам скольжения.

Важнейшим из этого является закон сжимаемости. Экспериментальное изучение сжимаемости материалов обычно проводится при испытании образцов в условиях одноосного сжатия с возможностью бокового расширения или без него, трехосного сжатия и всестороннего (гидростатического) сжатия. Исследуя сжимаемость при интенсивных динамических нагрузках, используют две различные группы методов. Первая группа методов основывается на непосредственном изучении сопротивляемости материалов внешним воздействиям путем испытания образцов в вышеуказанных условиях. При этом используются соответствующие устройства для создания внешней динамической нагрузки заданных параметров, испытательные приборы (одометры, стабилометры, приборы всестороннего сжатия), измерительная аппаратура для записи во времени давлений, деформаций или скоростей деформаций образцов. Вторая группа методов определения динамических диаграмм сжатия основывается на изучении напряженного и деформированного состояния исследуемых образцов при распространении в них волн напряжений, возбуждаемых ударами, взрывами и т. п.

Перечисленные испытательные установки — довольно сложные, поэтому создание более простых, малогабаритных и недорогих установок для испытания механических свойств некомпактных материалов при динамических нагрузках с широким диапазоном изменения их параметров — актуальная задача.

Выбор датчиков для записи динамических напряжений также представляет весьма сложную задачу. В частности, тензометрические мембранные датчики давления должны обладать избирательными свойствами, т. е. отсутствием чувствительности к боковым и тангенциальным напряжениям. Датчики не должны вносить существенных искажений в поле напряжений и деформаций, а период их собственных колебаний должен быть в 5–10 раз меньше времени нарастания регистрируемого процесса.

Поэтому к недостаткам существующих методов определения динамических диаграмм сжатия следует отнести также невысокую точность

измерения сопоставляемых параметров, обусловленную значительными погрешностями в процессе динамической тарировки тензодатчиков.

С целью повышения точности построения динамической диаграммы сжатия порошкового материала, расширения диапазона исследуемых скоростей деформирования и импульсных давлений была разработана методика определения зависимости между действующими нормальными напряжениями и соответствующими деформациями в условиях одноосного сжатия без бокового расширения.

Для оценки динамической сжимаемости в работе использовалось импульсное магнитное поле, так как величину его давления легко изменять и измерять, что позволяет исследовать динамическую сжимаемость в широком диапазоне скоростей деформации и давлений. В описанной методике не требуется использовать датчики, что повышает точность и надежность проводимых исследований. Опыты проводились на электрогидроимпульсной установке «Удар-12М» и магнитно-импульсной установке с энергоемкостью 10–20 кДж.

На рис. 1 показана схема для определения динамической сжимаемости порошковых материалов. Испытываемый материал *1* помещался в жесткую матрицу *2*. С высоковольтного конденсатора *C* на индуктор *4* подавался мощный импульс тока. Образующееся при этом в индукторе *4* импульсное магнитное поле воздействовало на пуансон *3* и разгоняло его до требуемой скорости. С данной скоростью пуансон *3*, двигавшийся далее в матрице *2* по инерции, сжимал испытываемый образец *1*. Перемещение пуансона *3* фиксировалось с помощью скоростного фоторегистратора (СФР). Подсветка в период фоторегистрации осуществлялась импульсной лампой ИФК-2000. Съемка производилась как в режиме фоторегистратора, так и в режиме «лупа времени».

Частота съемки определялась по скорости вращения зеркала. В режиме «лупа времени» для двухрядной линзовой вставки ее величина составляла

$$\omega = 8{,}33n \text{ кадр/с},$$

где n — число оборотов вращения зеркала в минуту.

В режиме фоторегистратора скорость перемещения луча по фотопленке определяется по формуле

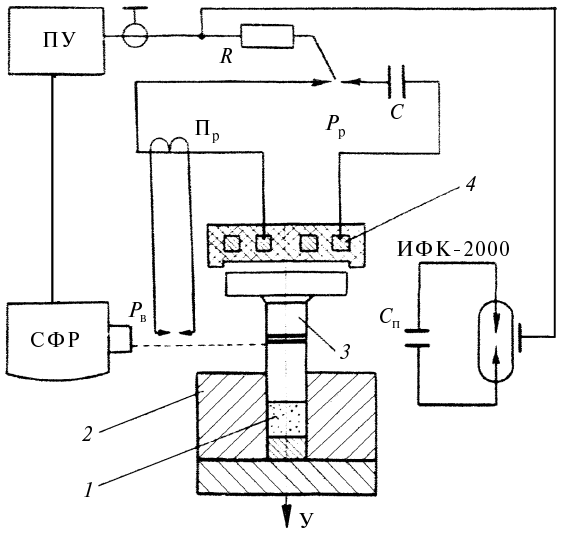


Рис. 1. Схема установки для определения динамической сжимаемости порошковых материалов

$$\vartheta = 2\omega r\left(1 + a\cos\varphi / r\right),$$

где ϑ — линейная скорость движения изображения; ω — угловая скорость вращения зеркала; r — радиус развертки; a — расстояние от оси вращения зеркала до отражающей плоскости; φ — угол поворота зеркала относительно оптической оси прибора.

Масштаб съемки определялся путем сопоставления размеров пуансона с его аналогичными размерами на фотопленке. Обработка СФР-грамм позволяет построить график перемещения пуансона в процессе сжатия порошкового материала. Из этого графика можно определить текущую деформацию прессовки $\varepsilon = \ln\dfrac{h-y}{h}$. Путем дифференцирования графика деформации можно определить скорость деформации прессовки $\dot{\varepsilon} = \dfrac{d\varepsilon}{dt}$. Текущую плотность образца можно вычислить по формуле $\theta = \theta_0 \dfrac{h}{h-y}$.

В результате двойного дифференцирования графика перемещения пуансона можно определить его ускорение

$$\frac{d^2y}{dt^2} \cong \frac{y\left(t+\Delta t\right) - 2y\left(t\right) + y\left(t-\Delta t\right)}{\left(\Delta t\right)^2}. \qquad (1)$$

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс сжатия материала пуансоном массой $M_{\text{п}}$, движущимся по инерции, имеет вид

$$\left(M_{\text{п}} + M_{\text{прп}}\right)\frac{d^2y}{dt^2} + p(\theta)\frac{\pi d^2}{4} + F_{\text{тр дин}} = 0, \quad (2)$$

где $M_{\text{прп}}\dfrac{\pi d^2}{8} + \rho_0 h$ — приведенная масса порошка; y — текущее перемещение пуансона, определенное из СФР-граммы; $p(\theta)$ — текущее сопротивление прессовки; d — диаметр пуансона; $F_{\text{тр дин}}$ — сила трения; h — высота прессовки в первоначальный момент деформации.

Оценить величину силы трения можно следующим выражением:

$$F_{\text{тр дин}} = \frac{1}{2}\pi d(h-y)\,p(\theta)\,K_{\text{тр дин}}K_{\text{бок}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{тр дин}}$ — коэффициент динамического трения; $K_{\text{бок}}$ — коэффициент бокового давления.

Из уравнения (1) с учетом зависимостей (2) и (3) можно определить давление в испытываемом материале:

$$p(t) = \frac{\left(M_{\text{п}} + M_{\text{прп}}\right)\dfrac{y(t+\Delta t) - 2y(t) + y(t-\Delta t)}{(\Delta t)^2}}{\dfrac{\pi d^2}{4} + \pi d(h-y)K_{\text{тр дин}}K_{\text{бок}}}. \quad (4)$$

Сопоставление соответствующих текущих значений давления $p(t)$ и значений плотности $\theta(t)$ позволяет построить диаграмму динамической сжимаемости исследуемого порошкового материала.

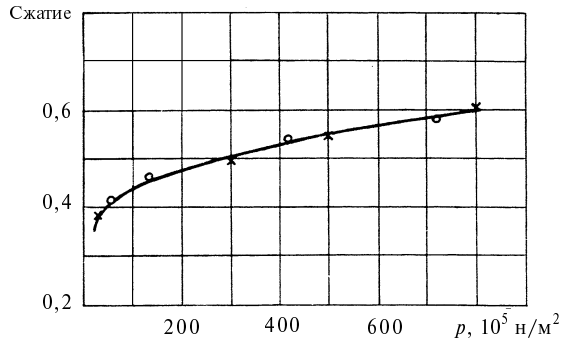


Рис. 2. Диаграмма сжатия медного порошка ПМС-2
(статическая — ×; динамическая — о)

Диаграмма динамической сжимаемости медного порошка ПМС-2, полученная по разработанной методике, изображена на рис. 2.

Сравнение динамической и статической диаграмм сжимаемости позволяет оценить динамичность процесса прессования порошкового материала. Для упрощенных расчетов оценку динамичности можно проводить путем определения коэффициента динамичности $K_{\text{дин}}$ по формуле

$$K_{\text{дин}} = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta^*}\dfrac{p_{\text{дин}}(\theta)}{p_{\text{стат}}(\theta)}d\theta}{\theta^* - \theta_0},$$

где θ^* — конечная плотность прессовки.

В исследованном диапазоне скоростей нагружения и величин импульсных давлений динамическая и статическая диаграммы для медного порошка ПМС-2 практически совпадают, поэтому коэффициент динамичности принимался в расчетах $K_{\text{дин}} = 1$.

При исследовании динамической сжимаемости порошковых материалов, как, в общем, при всех импульсных схемах прессования по схеме осевого сжатия, требуется количественно оценить величину потерь на трение порошка о стенки пресс-формы. Трибометрия порошковых материалов — актуальная и важная задача, так как трение препятствует перераспределению материала, увеличивает градиент плотности, вызывает необходимость в создании высоких давлений, увеличивает износ инструмента [2].

Наименее изучены процессы трения, происходящие при интенсивных импульсных нагрузках при высокоскоростном прессовании порошковых материалов. Отличия динамического прессования от статического, обусловленные различным характером нагрузки, определяют различие в потерях на внешнее трение.

Рассматривая состояние внешнего механического равновесия прессовки, можно величину потерь давления на внешнее трение $\Sigma p_{\text{тр}}$ определить по давлению прессования $p_{\text{тр}}$ и давлению, переданному на нижний пуансон $p_{\text{н}}$, из следующих соотношений:

$$K_{\text{тр}} = \frac{\sum p_{\text{тр}}}{\sum p_{\text{тр}} + p_{\text{н}}};$$

$$\sum p_{\text{тр}} = K_{\text{тр}}p_{\text{тр}}.$$

Эти соотношения являются основой большинства методик по определению параметров динамического трения. В условиях низких или средних скоростей прессования, характерных для электрогидроимпульсного и магнитноимпульсного прессования, трение обусловливается значительной локальной адгезией и срезанием зерен порошка в областях контакта. В процессе импульсного прессования порошковых материалов изменяются как скорости, так и давления прессования. Поэтому характер трения при этом также значительно меняется от обычного, так называемого «машинного», до пластического, существенно отличающегося от трения скольжения.

Таким образом, на величину возникающих на поверхности контакта элементарных сил трения при импульсном прессовании порошков оказывает влияние целый ряд факторов: состояние поверхности инструмента; физико-механические характеристики порошка, зависящие от способа получения порошка, формы частиц и т. д.; температура деформации; скорость деформирования; характер приложения нагрузки.

Важно не только характеризовать долю потерь на внешнее трение при динамическом прессовании и определять усредненный коэффициент динамического трения, но и выявлять влияние на него каждого из факторов, например скорости и давления.

Широко распространена методика определения параметров трения путем проталкивания через контейнер образца испытываемого материала, сжатого между двумя пуансонами. К недостаткам этого метода следует отнести значительную инерционность инструмента и приборов, а следовательно, невысокую точность измерения при больших скоростях деформирования.

Существующая стандартная методика, включающая прижим торца цилиндрического образца к вращающемуся диску, позволяет испытывать различные образцы в условиях, близких к реальным при сухом трении и трении со смазкой. Но данным способом невозможно определять коэффициент трения в трущейся паре при больших давлениях, соответствующих реальным процессам динамического прессования порошковых материалов.

Для определения коэффициента динамического трения при импульсном прессовании порошков были разработаны способ и устройство, позволяющие с высокой степенью точности измерять и вычислять его значение для различных некомпактных материалов и давлениях и скоростях деформации, соответствующих параметрам реального процесса импульсного прессования [3].

Способ заключается в том, что испытываемый образец и контробразец подвергают сжатию фиксированным давлением, образец перемещают относительно контробразца с помощью известного импульсного давления магнитного поля, при этом измеряют относительное перемещение образцов и давление магнитного поля. По диаграмме перемещения путем графического или численного дифференцирования определяют скорость и ускорение относительного перемещения, а из уравнения динамического равновесия вычисляют коэффициент динамического трения пары. Для реализации способа создано устройство, показанное на рис. 3.

Устройство содержит верхний пуансон *1*, закрепленный в плите пресса, нижний пуансон *2*, установленный на столе пресса и проходящий через отверстие в индукторе *3*, который подключен к генератору импульсных токов. Верхний пуансон *1* и нижний пуансон *2* сжимают усилием образец *4*, помещенный в полость цилиндрического контейнера, состоящего из внутреннего вкладыша *5* и наружного цилиндра *6*. Цилиндр изготовлен из материала с хорошей электропроводностью, например алюминия. Внутренний вкладыш *5* является контробразцом и изготавливается из материала исследуемой пары трения.

Испытываемый образец из порошка *4* сжимался фиксированным усилием между пуансо-

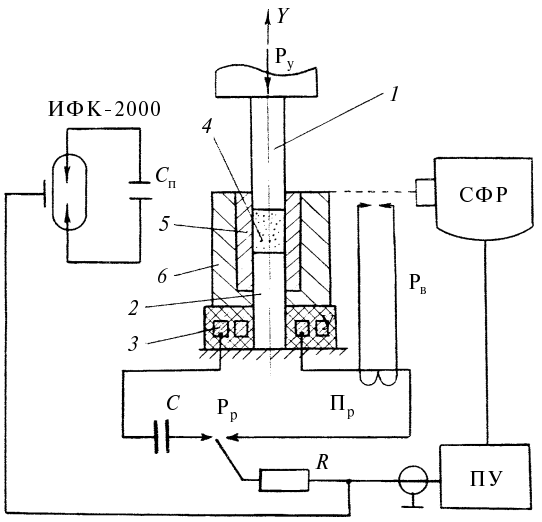


Рис. 3. Схема измерения параметров динамического трения

нами *1* и *2* в контробразце *5*. Давление сжатия порошка в процессе измерения поддерживалось постоянным. С пульта управления ПУ подавался сигнал на включение скоростного фоторегистратора СФР и разрядника $Р_р$ генератора импульсных токов.

Мощный импульс тока батареи конденсаторов *С* проходил через индуктор *3*. Импульсное магнитное поле перемещало контейнер *6* с контрообразцом *5* по испытываемому образцу *4*. Перемещение контейнера фиксировалось с помощью фоторегистратора СФР-2М. Подсветка объекта съемки осуществлялась импульсной лампой ИФК-2000. Момент свободного перемещения контейнера *6* точно фиксировался по разряднику $Р_в$, зажигание которого от пояса Роговского продолжалось в течение разряда конденсаторной батареи через индуктор *3*. Для момента времени, когда давление магнитного поля становится равным нулю, дифференциальное уравнение, описывающее процесс движения контейнера с контробразцом по образцу, можно записать в виде

$$M_к \frac{d^2y}{dt^2} + F_{тр\ дин} = 0, \qquad (5)$$

где $M_к$ — масса контейнера с контробразцом; *y* — перемещение контейнера, определенное из СФР-граммы.

Силу трения контробразца *5* по образцу *4* можно определить по формуле

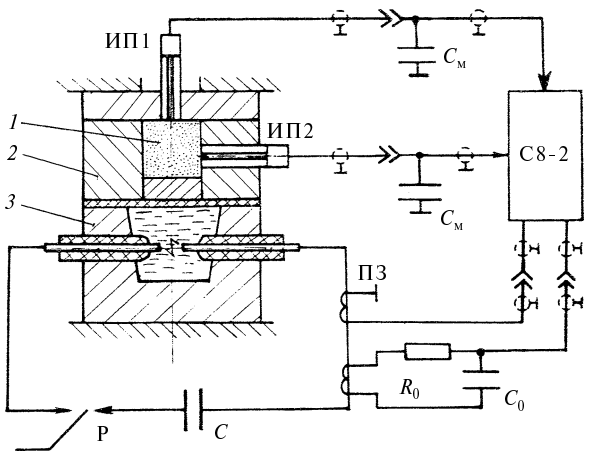


Рис. 4. Схема измерения бокового давления порошка на стенку матрицы при импульсном нагружении

$$F_{тр\ дин} = 4Py\frac{h}{d}K_{тр}K_{бок}, \qquad (6)$$

где *h* — высота исследуемого образца.

Коэффициент динамического трения можно определить из уравнений (5) и (6):

$$K_{тр\ дин} = \frac{M_к \dfrac{y(t+\Delta t) - 2y(t) + y(t-\Delta t)}{(\Delta t)^2}}{4Py\dfrac{h}{d}K_{бок}}.$$

Величину коэффициента бокового давления $K_{бок}$ можно определять по аналогичной методике. Схема измерения бокового давления на стенку матрицы при импульсном прессовании порошка изображена на рис. 4.

На один из каналов осциллографа подавался сигнал с импульсного преобразователя, измеряющего осевое давление в прессовке, на второй канал — с импульсного преобразователя, измеряющего боковое давление порошка на стенку матрицы.

Обработка осциллограмм показала, что величина коэффициента бокового давления для медного порошка ПМС2 зависит от относительной плотности и в среднем составляет: $K_{бок} \cong 0{,}35$–40 при изменении плотности от 0,60 до 0,75

Используя полученные данные, можно определить коэффициент динамического трения медного порошка ПМС-2 в стальной матрице. Рассчитанный коэффициент трения для исследованных параметров скорости деформирования $V_д = 2$–8 м/с равен 0,16–0,18.

Разработанные методики оценки динамичности импульсного прессования порошковых материалов и построения диаграмм динамической сжимаемости порошков могут быть эффективно использованы для исследования закона сжимаемости металлических порошков при электрогидроимпульсном и магнитноимпульсном прессовании.

Экспериментально установлено, что для указанных процессов в исследованных интервалах параметров давления динамичность процесса проявляется для пластичных металлических порошков незначительно.

Апробированная методика определения коэффициента динамического трения порошков позволяет определять влияние как давления прессования, так и скорости деформации в отдельности на параметры трения при электрогидроимпульсном и магнитноимпульсном прессовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чачин, В.Н.** Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении [Текст] / В.Н. Чачин, К.Н. Богоявленский, В.А. Вагин [и др.].— Минск: Наука и техника, 1987. — 231 с.

2. **Исаченков, Е.И.** Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1978.-208 с.

3. **А. с. №711833, G 01 №19/02.** Способ и устройство для определения динамического коэффициента трения [Текст] / П.А. Кузнецов, В.С. Мамутов, К.К., Мертенс [и др.].

УДК 669.1.017:669.018.44:669:018.28:621.74.011

А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев,
Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. Сообщение 2: ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЫДЕРЖКИ

Условия работы высокотемпературных установок нефтехимических и металлургических производств существенно отличаются от режимов эксплуатации энергетических установок, используемых в других областях техники, и являются одними из наиболее сложных в современной промышленности. При этом определяющие эксплуатационные факторы в них — рабочие температуры и среда [1, 2]. Так, в змеевиковых системах установок пиролиза отношение рабочей температуры к температуре солидуса сплавов, применяемых для их изготовления, достигает значения $T_{раб} / T_{сол} = 0,85$; тогда как в энергетических установках транспортных систем, например реактивных двигателях, $T_{раб} / T_{сол} \le 0,73$ (с учетом временных перегревов до температур 1150 и 950 °С соответственно) [3]. Кроме того, эксплуатация при максимальном значении $T_{раб} / T_{сол}$ для двигателей, в отличие от змеевиковых систем, жестко ограничивается длительностью от 0,5 ч до нескольких часов. Агрессивное воздействие рабочей среды на материал оборудования нефтехимических производств также существенно сильнее по причине более высокой рабочей температуры, повышенной концентрации агрессивных веществ и более сложных условий их движения.

Следствие перечисленных обстоятельств — неизбежная нестабильность структуры и механических свойств сплавов, применяемых для изготовления высокотемпературного нефтехимического оборудования. По этой причине параметры стабильности структуры сплава, устанавливаемые техническими условиями для материалов двигателей, фактически не включаются в требования к материалам оборудования нефтехимических производств. Однако именно характер и кинетика структурных изменений определяют работоспособность сплавов при длительной высокотемпературной эксплуатации [4].

В связи с этим целью представляемой работы было изучение структурной стабильности литого жаропрочного жаростойкого сплава на основе системы Fe-Cr-Ni базовой композиции Х25Н35 путем анализа изменений параметров структуры, химического состава и морфологии упрочняющих фаз при $T_{раб} / T_{сол} = 0,80–0,85$.

Материалом исследования был выбран сплав марки 45Х26Н33С2Б2, разработанный ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», который используется для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [5]. Сплав выплавляли в индукционных печах емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах по ТУ 1333-032-07516250–2008 и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литейные пробы (по ГОСТ 977–88). Фактический химический состав исследованного сплава, масс. %, следующий:

C	0,48
Si	1,86
Mn	0,91
Cr	24,6
Ni	35,3
Nb	1,72
W	0,57
Mo	0,23
Ti	0,14
N	0,05
Fe	Ост.

Из литых заготовок для структурных исследований изготавливали образцы размером 10×10×15 мм, которые подвергали высокотемпературной термической обработке. Нагрев и выдержку образцов осуществляли в электрической печи типа СШОЛ с нагревательной спиралью из фехралевой проволоки марки 0Х27ЮТ. Точность измерения температуры образца составляла ± 2 °С. Образцы выдерживали при температуре 1150 °С в течение 2, 10, 20, 50 или 100 ч с последующим охлаждением с печью или в воде. Выдержка в течение 2 ч была выбрана в качестве операции термообработки — гомогенизирующего отжига с целью стабилизации литой структуры; более длительные выдержки имитировали режимы эксплуатации действующих установок пиролиза. Охлаждение в воде использовали для фиксации структурного состояния сплава непосредственно после высокотемпературной выдержки, а охлаждение с печью соответствовало условиям эксплуатации исследованного материала.

Исследование микроструктуры сплава выполняли на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 при увеличениях ×50–1000 с помощью программы автоматического количественного анализа изображений согласно процедуре ASTM E 1245–03. Фазовый анализ сплава проводили с использованием микрорентгеноспектрального анализатора Tescan VEGA 5136 LM. Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в 10 %-й щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95.

Исследование сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии, результаты которого рассмотрены в Сообщении 1 [6], показало, что его литая структура состоит из следующих фаз и структурных составляющих: γ-твердого раствора с грубой дендритной ликвацией и неоднородным распределением кремния, хрома, железа, марганца; эвтектических колоний γ-фазы и карбидов Me_xC_y с неоднородным распределением основного элемента — хрома; включений, состоящих из нитрида титана и карбида ниобия. Соотношение структурных составляющих в сплаве находится в пределах (в объемн. %): 65–70 — γ-фаза; 30–35 — карбидная фаза, присутствующая в составе эвтектики и в виде изолированных включений (карбиды ниобия). Внутри карбидов ниобия, как правило, находятся нитриды титана.

Металлографический анализ сплава после выдержки при 1150 °С показал, что его микроструктура, как и в литом состоянии, представляет собой γ-твердый раствор и избыточные фазы (рис. 1). Однако по сравнению с литым состоянием в структуре сплава наблюдаются значительные качественные и количественные изменения, причем уже после выдержки длительностью 2 ч. Увеличение продолжительности выдержки от 2 до 100 ч снижает интенсивность структурных изменений, но усложняет их характер. При этом трансформации подвергаются все структурные составляющие сплава и отдельные фазы — матричная γ-фаза, эвтектические и изолированные карбиды.

Твердый раствор γ-фазы приобретает по сравнению с литым состоянием менее выраженное ячеистое строение (рис. 1). С увеличением длительности выдержки оси дендритов первого и особенно второго порядка постепенно «размываются», однако их размеры практически не изменяются. В случае охлаждения с печью после выдержки при 1150 °С наблюдается фрагментирование структуры в результате термической полигонизации вследствие фазового наклепа сильно легированного твердого раствора (рис. 1, *г*, *е*).

Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил, что после высокотемпературной выдержки однородность матрицы повышается. Если в литом состоянии приграничные объемы дендритных ветвей и особенно междендритные пространства существенно обогащены элементами, образующими твердые растворы замещения — Si, Cr и Mn, и обеднены Fe [6], то после термической обработки степень ликвации компонентов сплава в твердом растворе значительно уменьшается (рис. 2, табл. 1). Уже после 2 ч выдержки при 1150 °С различие в содержании железа, хрома и марганца в разных участках твер-

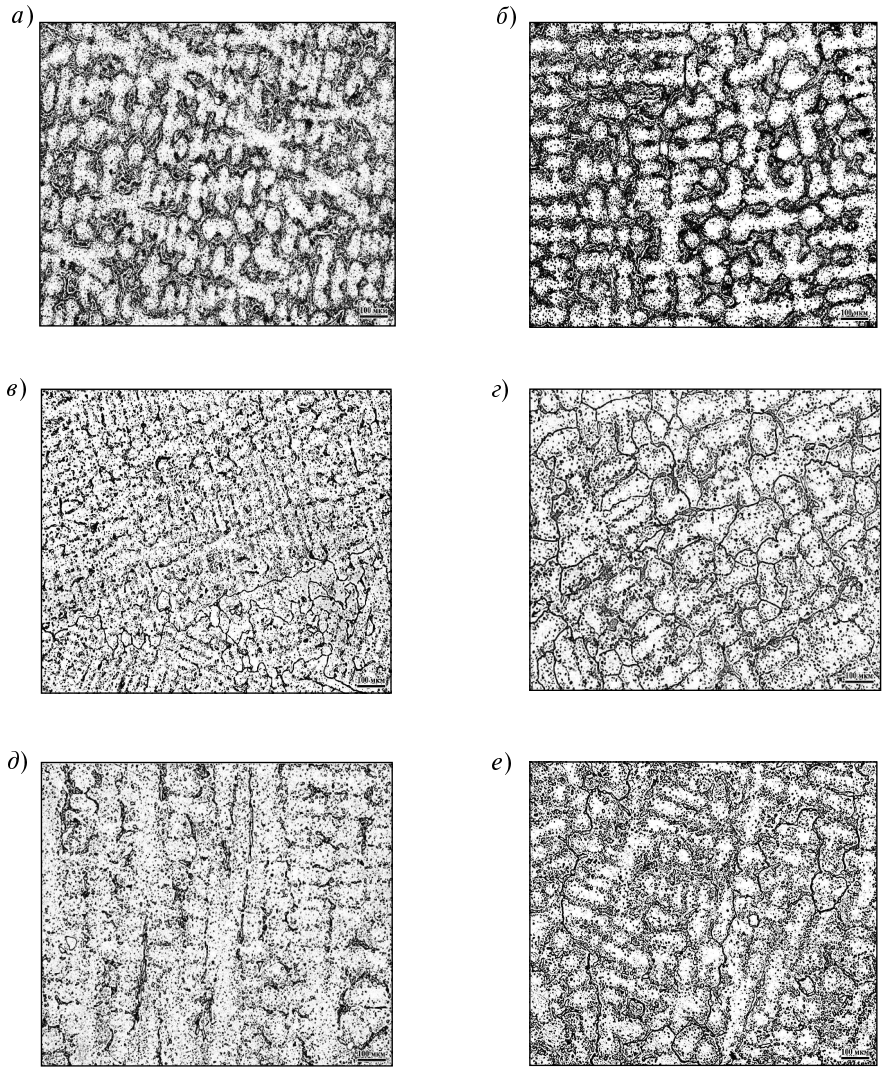


Рис. 1. Микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 2 (*а*, *б*), 25 (в, г) и 50 часов (*д*, *е*) с охлаждением в воде (*а*, *в*, *д*) или с печью (*б*, *г*, *е*); ×100

дого раствора отсутствует, а различие в содержании кремния уменьшается с 0,4–0,9 до 0,1–0,3 масс. %.

Важно отметить, что средний химический состав матрицы в литом состоянии и после выдержки при 1150 °С во всем исследованном интервале длительности практически не изменяется.

Одновременно с уменьшением степени химической неоднородности γ-твердого раствора после высокотемпературной выдержки изменяется его объемная доля в структуре сплава за счет процессов выделения-растворения избыточных фаз (рис. 3).

На рис. 4 приведены результаты количественного металлографического анализа соотношения структурных составляющих в сплаве после выдержки при 1150 °С различной длительности. Видно, что после 2 ч выдержки объемная доля избыточных фаз в структуре сплава резко возрастает по сравнению с литым состоянием: в 2 и в 1,5 раза при охлаждении соответственно с печью и в воде. При увеличении выдержки до 20–50 ч количество избыточных фаз постепенно уменьшается: при охлаждении с печью почти до исходного, а при охлаждении в воде до значения примерно в 1,5 раза ниже, чем в литом состоянии. Дальнейшая выдержка (до 100 ч) незначительно

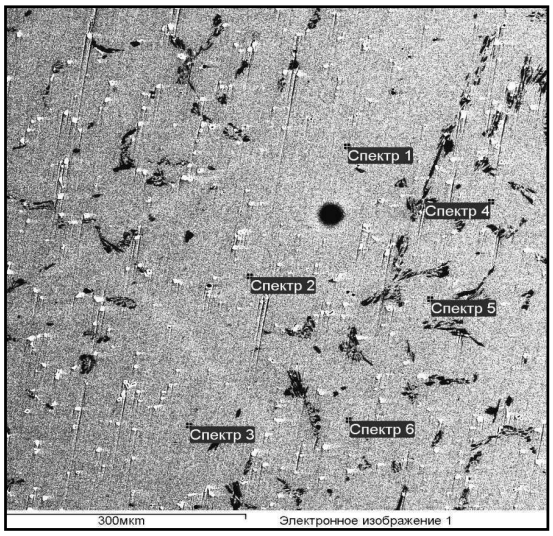


Рис. 2. Схема химического анализа и состав междендритных объемов и осей дендритов в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150°С длительностью 2 ч (охлаждение в воде)

Таблица 1

Состав междендритных объемов и осей дендритов в сплаве 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С в течение 24 час и охлаждения в воде

Номер спектра	Участок структуры	Содержание элементов, масс. %							
		Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	W
Спектр 1	Ось I	2,23	22,95	0,95	37,34	35,73	0,24	0,19	0,37
Спектр 2	Ось I	2,16	23,00	0,90	37,95	35,45	0,13	0,18	0,23
Спектр 3	Ось I	2,26	23,05	0,97	37,09	36,13	0,22	0,07	0,21
Спектр 4	Ось II	2,39	22,81	0,94	37,20	36,14	0,16	0,14	0,22
Спектр 5	Межосн. пр-во	2,47	22,85	1,03	37,25	35,63	0,25	0,18	0,34
Спектр 6	Межосн. пр-во	2,44	22,52	1,06	37,22	36,06	0,26	0,20	0,24

изменяет соотношение структурных составляющих в сплаве. Следует отметить, что большее количество избыточных фаз в структуре сплава после охлаждения с печью свидетельствует об их дополнительном выделении при медленном непрерывном охлаждении (см. рис. 3, 4).

Таким образом, выдержка сплава при 1150 °С длительностью 2 ч приводит к значительному повышению однородности твердого раствора по химическому составу и выделению в структуре большого количества вторичных фаз. Это подтверждает полученные в [6] косвенные экспериментальные данные о высокой структурной нестабильности литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при рабочих температурах и интенсивности диффузионных потоков химических элементов, образующих твердые растворы замещения. При увеличении длительности выдержки более 2 ч интенсивность структурных изменений в исследованном сплаве значительно снижается.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что в результате высокотемпературной

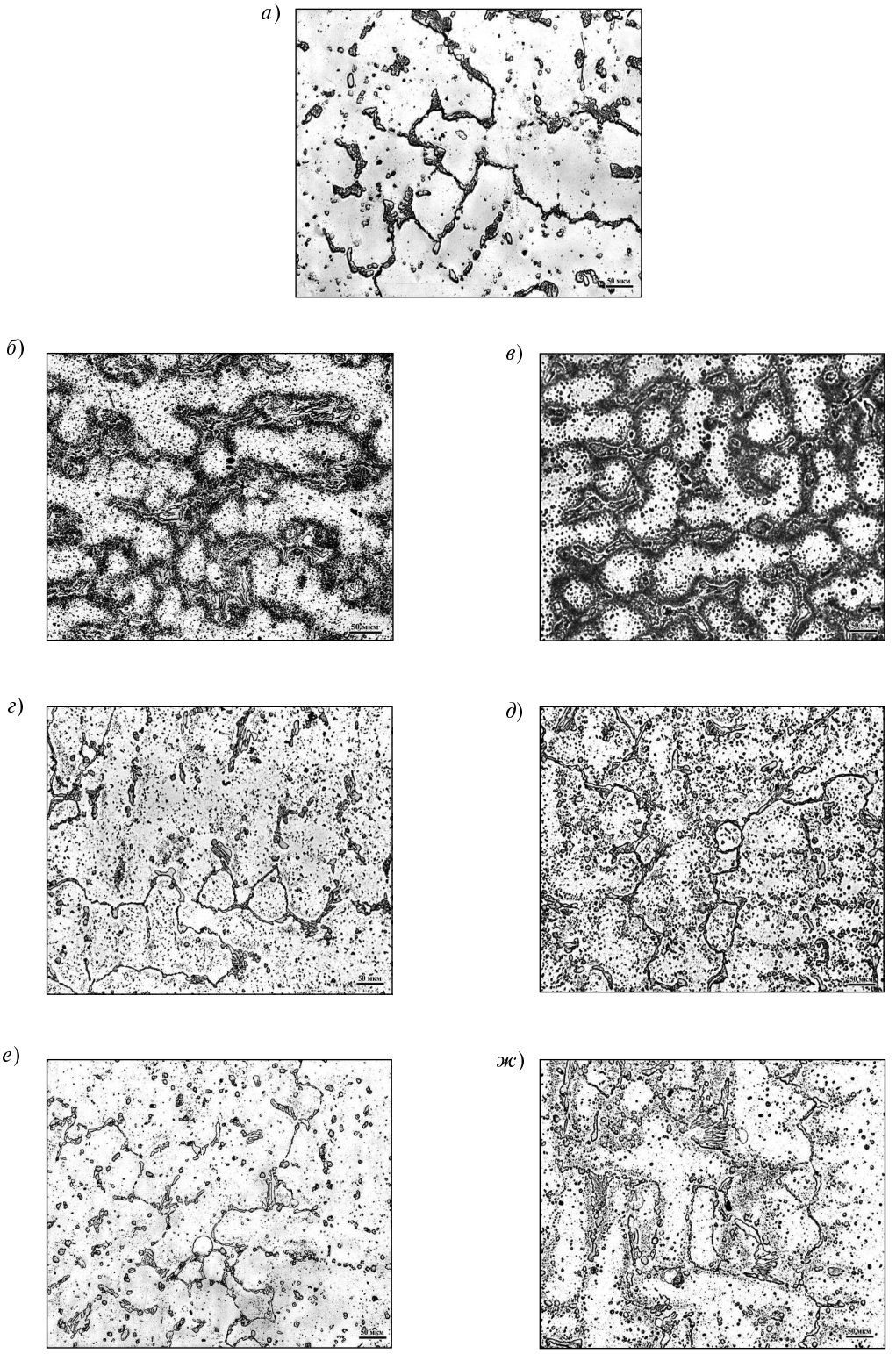


Рис. 3. Микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии (*а*) и после выдержки при 1150 °С длительностью 2 (*б*, *в*), 10 (*г*, *д*) и 100 ч (*е*, *ж*) с охлаждением в воде (*б*, *г*, *е*) и с печью (*в*, *д*, *ж*)

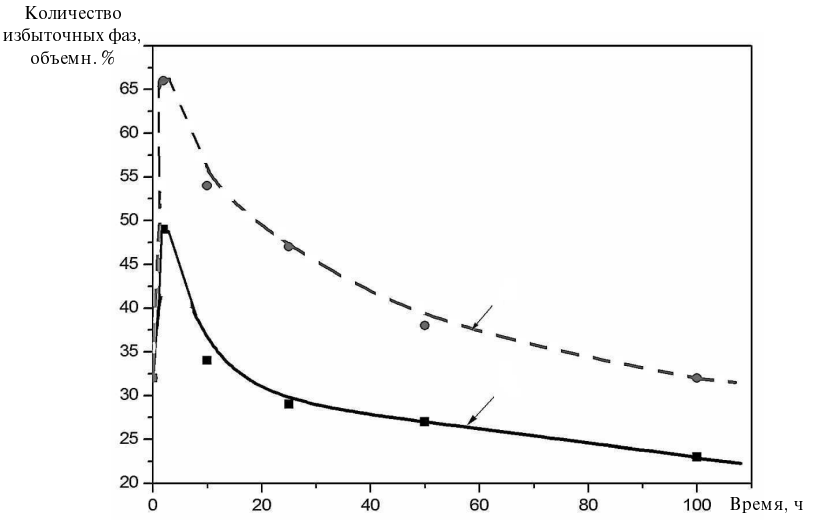


Рис. 4. Влияние длительности выдержки при 1150 °С на количество избыточных фаз в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после охлаждения в воде (*1*) или с печью (*2*)

выдержки изменяются не только количество избыточных фаз, но также морфология и химический состав эвтектических и изолированных карбидов.

После выдержки длительностью 2 ч в эвтектических карбидах хрома выявляется выраженная субструктура (рис. 5 и табл. 2). Во включениях эвтектических карбидов формируются ячейки разной контрастности неправильной формы размером в поперечнике около 2 мкм. Темные на фото ячейки карбидов обеднены, а светлые — обогащены вольфрамом и молибденом, причем содержание каждого из них в этих участках различается примерно в 2 раза; незначительно различается содержание хрома и углерода; концентрация железа и никеля на разных участках одинаковая. При увеличении длительности термообработки при 1150 °С до 50 ч ячеистое строение карбидов практически исчезает и после 100 ч не обнаруживается.

Сравнение химического состава эвтектических карбидов в литом состоянии и после термической обработки при 1150 °С длительностью более 50 ч показывает, что высокотемпературная выдержка приводит к снижению содержания хрома на ~ 5,5 масс. %, углерода на ~ 3,5 масс. % и увеличению концентрации железа на ~ 4,0 масс. %, молибдена на ~ 0,5 масс. % и вольфрама на ~ 1,8 масс. % (табл. 3).

Полученные результаты дают основание считать, что в литом состоянии основная карбидная составляющая эвтектики — это карбид Me_7C_3. Выдержка при 1150 °С приводит к его постепенному переходу в карбид $Me_{23}C_6$, причем наиболее интенсивно процесс протекает в интервале времени 2–10 ч, а в интервале 25–50 ч — завершается.

Изменение состояния эвтектической карбидной фазы не ограничивается только трансформацией ее формулы Me_xC_y. Анализ общего распределения химических элементов в структуре сплава показывает, что в эвтектике на границе карбида и γ-фазы образуется новая фаза, причем характер изменения структуры свидетельствует, что она образуется в матрице (рис. 6, 7). Образующаяся фаза содержит (в масс. %): 37 — Cr; 5 — Fe; 31 — Ni; 11 — Nb; 8 — Si; 3 — W; 0,5 — Mo; 4 — N (см. рис. 7 и табл. 4), соответственно ее условная формула — $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$. Вероятно, в сплаве 45Х26Н33С2Б2 она является упрочняющей γ′-фазой, поскольку известно [1–3, 5], что в сплавах на Fe-Cr-Ni-основе типа Х25Н35 при температурах выше 1000 °С возможно образование интерметаллидов различного состава с общей формулой $(NiFeCr)_m(Me)_n$, в которых к группе металлов могут относиться ниобий, кремний, вольфрам, молибден.

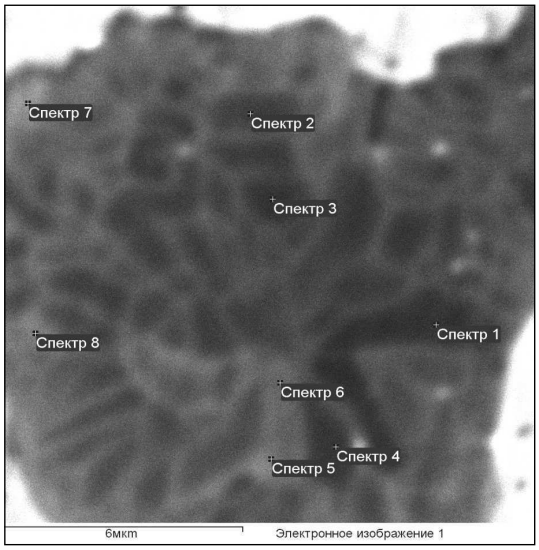


Рис. 5. Схема химического анализа и состав различных участков эвтектического карбида в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150°С длительностью 2 ч (охлаждение в воде)

Таблица 2

Состав различных участков эвтактического карбида в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С в течение 2 час и охлаждения в воде

№ спектра	Содержание элементов, масс. %					
	C	Cr	Fe	Ni	Mo	W
Спектр 1	**10,06**	**71,65**	**11,82**	**4,21**	**0,78**	**1,48**
Спектр 2	**9,85**	**71,62**	**12,36**	**3,97**	**0,68**	**1,52**
Спектр 3	**9,23**	**71,75**	**11,89**	**4,76**	**0,84**	**1,53**
Спектр 4	**10,29**	**70,58**	**12,24**	**4,56**	**0,76**	**1,57**
Спектр 5	9,28	68,83	12,99	4,75	1,28	2,87
Спектр 6	9,61	69,56	12,10	4,43	1,36	2,94
Спектр 7	8,80	70,27	11,75	4,77	1,25	3,16
Спектр 8	9,26	69,89	12,27	4,34	1,48	2,76

Таблица 3

Средний химический состав эвтектических карбидов в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии и после выдержки при 1150 °С различной длительности (с охлаждением в воде или с печью)

Состояние	Участок карбида	Содержание элементов, масс. %					
		C	Cr	Fe	Ni	Mo	W
Литое	–	9,10	78,76	8,51	1,55	0,66	1,42
После выдержки при 1150 °С в течение 2 ч	темный	10,31	71,14	11,82	4,40	0,78	1,55
	светлый	9,23	69,61	12,26	4,62	1,33	2,95
После выдержки при 1150 °С в течение 50 ч	–	5,61	72,84	12,76	4,38	1,24	3,17
После выдержки при 1150 °С в течение 100 ч	–	5,42	73,16	12,63	4,37	1,16	3,26

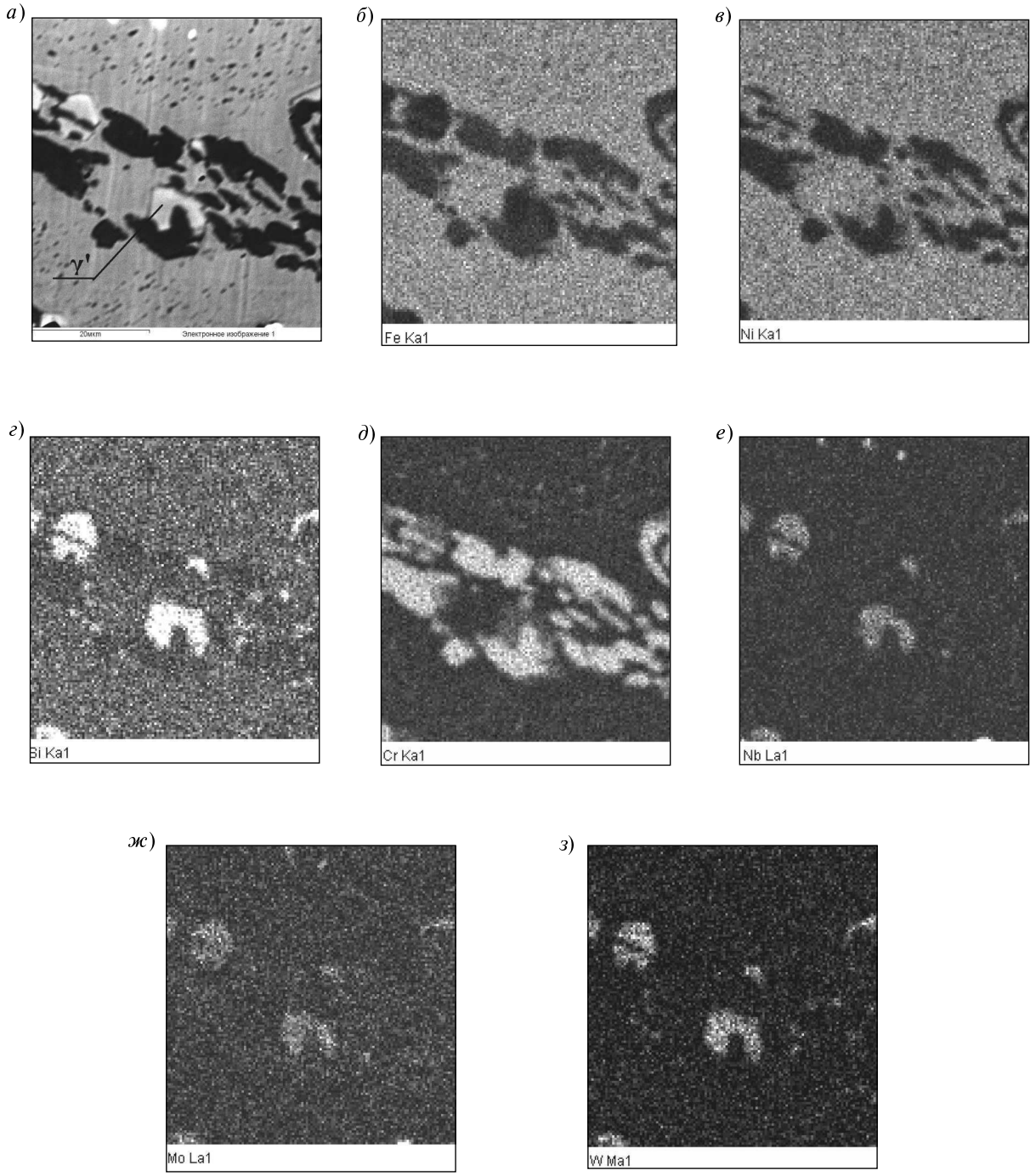


Рис. 6. Структура в обратно отраженных электронах (*а*) и распределение железа (*б*), никеля (*в*), кремния (*г*), хрома (*д*), ниобия (*е*), молибдена (*ж*) и вольфрама (*з*) в сплаве 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 50 ч и охлаждения в воде

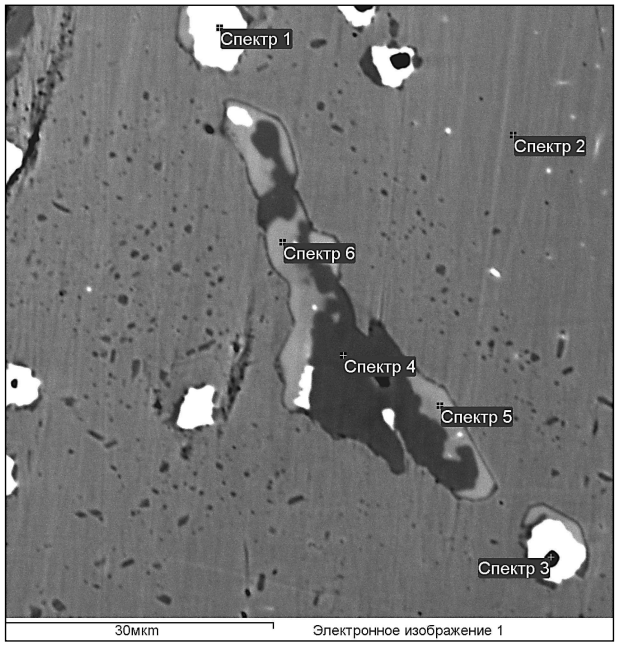


Рис. 7. Структура и состав γ′-фазы, образующейся на границе эвтектического карбида с матрицей, в сплаве 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150°С длительностью 50 ч (охлаждение в воде)

Таблица 4

Состав γ′-фазы на границе эфтектического карбида с матрицей (сплав 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С в течение 50 час и охлаждения в воде)

№ спектра	Фаза	Содержание элементов, масс. %										
		C	N	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	W
Спектр 1	NbC	11,70	–	–	0,83	1,24	–	0,70	0,73	84,80	–	–
Спектр 2	γ	–	–	2,32	–	22,53	1,00	37,20	36,47	0,12	0,15	0,21
Спектр 3	TiN	–	22,75	–	56,90	6,53	1,03	0,74	0,80	13,60	–	–
Спектр 4	Cr_xC_y	5,26	–	–	–	73,53	–	12,30	4,42	–	1,24	3,25
Спектр 5	γ′	–	4,35	7,93	–	36,60	–	4,92	31,55	11,70	0,37	2,95
Спектр 6	γ′	–	4,23	7,85	–	38,74	–	5,03	30,45	10,83	0,41	2,87

В отличие от карбидов хрома, химический состав карбида ниобия не изменяется после термической обработки по сравнению с литым состоянием. Однако на границе карбида ниобия и матрицы также образуется новая фаза, причем в этом случае ее образование, вероятно всего, происходит не в матрице, а в карбиде ниобия (рис. 8). Химический состав фазы (в масс. %): 66 — Cr; 15 — Fe; 13 — Ni; 1 — Si; 3 — W, а ее условная формула — Cr_5FeNi. Этот интерметаллид можно рассматривать как γ″-фазу.

Образование γ′- и γ″-фаз в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 наблюдается уже после 2 ч выдержки при 1150 °С, а после примерно 50 ч их количество достигает максимального значения. Дальнейшая выдержка до 100 ч не приводит к увеличению объемной доли интерметаллидных фаз в структуре сплава; наоборот, наблюдается начало их растворения (рис. 9).

Анализ включений нитрида титана в структуре сплава показал, что он не претерпевает никаких изменений в результате длительной

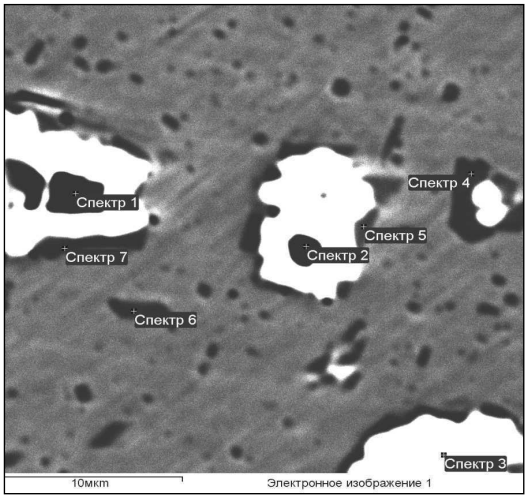


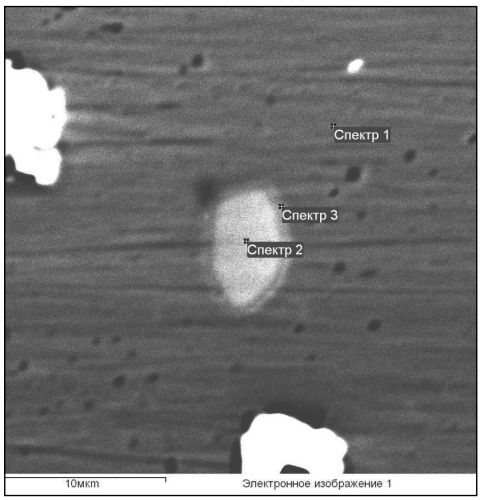
Рис. 8. Структура и состав γ″-фазы, образующейся на границе карбида ниобия с матрицей, в сплаве 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 50 ч и охлаждения в воде

Таблица 5

Состав γ″-фазы на границе карбида ниобия с матрицей (сплав 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150° в течение 50 час и охлаждения в воде)

№ спектра	Фаза	Содержание элементов, масс.%				
		Si	Cr	Fe	Ni	W
Спектр 4	γ″	1,24	66,46	13,32	15,67	3,31
Спектр 5	γ″	0,80	65,74	17,90	12,66	2,90
Спектр 6	γ″	0,61	66,85	17,42	12,65	2,47

а)



б)

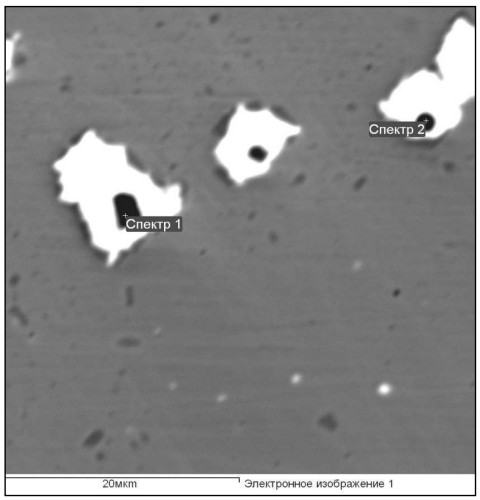


Рис. 9. Растворение интерметаллидов $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$ (*а*) и Cr_5FeNi (*б*) в матрице в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 после выдержки при 1150 °С длительностью 100 ч и охлаждения в воде

высокотемпературной выдержки. Как и в литом состоянии [6], нитрид титана, как правило, находится в центре «двойного» включения, снаружи которого располагается карбид ниобия. Однако при увеличении длительности выдержки сплава до 100 ч при 1150 °С за счет превращения карбида ниобия в γ″-фазу и последующего ее растворения в матрице доля NbC в «двойном» включении значительно уменьшается (рис. 9, *б*).

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой структурной нестабильности при температурах эксплуатации 1100–1200 °С литого жаропрочного жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2, применяемого для изготовления змеевиковых систем установок пиролиза. Для количественной оценки влияния этого фактора на работоспособность сплава необходимо исследовать механизм трансформации структуры и кинетику протекающих процессов, что является задачей следующих этапов работы.

Подведем итоги сказанного.

Полученные результаты исследования позволяют заключить, что литая структура сплава 45Х26Н33С2Б2 характеризуется высокой нестабильностью и интенсивностью диффузионных потоков химических элементов, образующих твердые растворы замещения, при температурах эксплуатации оборудования нефтехимических производств 1100–1200 °С. Это приводит к значительным качественным и количественным изменениям в структуре сплава, заключающимся в трансформации всех структурных составляющих и отдельных фаз — матричной γ, эвтектических и изолированных карбидов.

Выдержка при 1150 °С длительностью 2 ч приводит практически к полному устранению неоднородности распределения химических элементов в матричном γ-твердом растворе и значительному увеличению количества избыточных фаз в структуре литого сплава. При увеличении длительности выдержки до 20–50 ч количество избыточных фаз уменьшается до исходного значения (охлаждение с печью) или даже ниже (охлаждение в воде), а более 50 ч — практически не изменяется. При этом средний химический состав матрицы во всем интервале выдержек (до 100 ч) остается постоянным.

Выдержка при 1150 °С приводит к постепенному превращению эвтектического карбида $(CrFeNi)_7C_3$ в карбид $(CrFeNi)_{23}C_6$ в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2. Процесс фазового перехода развивается от начала выдержки, достигает максимальной интенсивности в интервале ее длительности 2–10 ч и практически завершается после 50 ч.

С увеличением длительности выдержки более 2 ч при 1150 °С в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 на границах эвтектических карбидов и матричной γ-фазы образуется интерметаллидная γ′-фаза состава (в масс. %): 37 — Cr; 5 — Fe; 31 — Ni; 11 — Nb; 8 — Si; 3 — W; 0,5 — Mo; 4 — N с условной формулой $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$. Фаза γ′ образуется преимущественно в матрице в интервале времени выдержки 2–50 ч, далее происходит ее постепенное растворение.

В результате выдержки до 100 ч при 1150 °С химический состав карбида ниобия в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 не изменяется. Однако после 2 ч выдержки на границе карбидов ниобия и матричного твердого раствора образуется γ″-фаза состава (в масс. %): 66 — Cr; 15 — Fe; 13 — Ni; 1 — Si; 3 — W с условной формулой — Cr_5FeNi. Интерметаллидная γ″-фаза образуется в карбиде ниобия в интервале длительности выдержки 2–50 ч, далее происходит ее постепенное растворение.

В результате выдержки до 100 ч при 1150 °С химический состав нитрида титана и форма его включений в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2 не изменяются. Однако за счет превращения карбида ниобия в интерметаллидную γ″-фазу и ее последующего растворения доля нитрида титана в «двойном» включении NbC — TiN значительно увеличивается.

Наибольшие структурные и фазовые изменения в литом сплаве 45Х26Н33С2Б2 при 1150 °С происходят в начальный период выдержки, а с увеличением ее длительности более 2 ч активность диффузионных процессов снижается. Это позволяет предположить, что кратковременный отжиг при 1100–1200 °С может способствовать повышению структурной стабильности и, как следствие, работоспособности исследованного сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орыщенко, А.С.** Жаростойкие жаропрочные сплавы [Текст] / А.С. Орыщенко.— СПб.: Наука, 2011.— 191 с.

2. **Орыщенко, А.С.** Разработка жаростойких сплавов для элементов конструкции радиантной части змеевиков высокотемпературных установок нефтесинтеза [Текст] // Вопросы материаловедения.— 2006. № 1 (45).— С. 147–159.

3. **Масленков, С.Б.** Стали и сплавы для высоких температур [Текст]: Справочник в двух книгах. Кн. 1 / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова.— М.: Металлургия, 1991.— 384 с.

4. **Бокштейн, С.З.** Структурная стабильность конструкционных материалов [Текст] / С.З. Бокштейн, С.Т. Кишкин, Р.Е. Шалин // Сб.: Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков.— М.: Изд-во ВИАМ, 1994.— С. 547–553.

5. **Орыщенко, А.С.** Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург.— 2008. № 2.— С. 66–68.

6. **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. Сер.: Наука и образование. 2012. — № 1 (142).— С. 155–163.

УДК 53.09, 539.42

С.И. Кривошеев, В.К. Сластенко

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Способность материалов выдерживать большие ударные нагрузки подтверждена многочисленными работами, но исследование процессов разрушения по-прежнему представляет большой интерес. Сложность описания процесса разрушения определяется влиянием многочисленных факторов и особенностей, зависящих от характеристик материала, параметров нагружения, многообразия напряженных состояний образцов при испытаниях. Импульсное нагружение затрудняет описание процесса разрушения вследствие появления не только пространственных, но и временных особенностей напряженного состояния материала образца. Главное различие разрушений при статическом и динамическом (импульсном) воздействии — несопоставимость временных масштабов (характерных времен) процессов нагружения и разрушения материалов, отношение которых при динамическом воздействии на много порядков меньше, чем в статическом случае.

Особенности импульсного нагружения

При импульсном воздействии возможна реализация схем нагружения, в которых:

формируется поле напряжений, где пространственная локализация существенно меньше размеров образца (ударно-волновой режим);

нагружение происходит при известных и контролируемых в процессе формирования нагрузки параметрах;

образец может рассматриваться как энергетически замкнутая система, так как после окончания импульса нагрузки энергообмен между образцом и загрузочным устройством отсутствует.

Режимы нагружения с такими характерными особенностями реализуются на лабораторном уровне при исследовании разрушения материалов в откольной схеме нагружения [1–3], а также при разрушении образцов с макродефектами типа трещин в результате импульсного нагружения, формируемого, например, магнитно-импульсным способом [1 , 2]. Подобная ситуация имеет место в ряде практических технологий, связанных с изготовлением тонкоизмельченных материалов и обогащением горных руд, а также при природных и техногенных землетрясениях.

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных при реализации схем

нагружения с отмеченными выше особенностями, позволяет отметить некоторые общие закономерности процесса разрушения:

этот процесс имеет пороговый характер при разрушении как бездефектных образцов (откольная схема нагружения), так и образцов с макродефектами типа трещин;

длина проросшей трещины зависит от амплитуды импульса;

амплитуды пороговых импульсов зависят от их длительности;

при нагружении пороговыми импульсами имеет место задержка начала разрушения;

стартовая скорость трещины линейно зависит от превышения амплитудой импульса порогового значения.

Анализ экспериментальных данных

Анализ экспериментальных данных сводится к определению напряженно-деформированного состояния образца и выбору соответствующего критерия разрушения.

Критерий разрушения. Наиболее удобным для описания экспериментов является структурно-временной критерий, учитывающий пространственно-временные неоднородности поля напряжений в образце.

Структурно-временной критерий впервые был предложен в [3] и в общем случае имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\tau}\int_{t-\tau}^{t}\frac{1}{d}\int_{0}^{d}\sigma(r,\theta,\,t')\,drdt' \le \sigma_c, \qquad (1)$$

где d и τ — структурный размер и структурное время разрушения; (r,θ) — полярные координаты; σ_c — статическая прочность материала; $\sigma\,(r,\theta,\,t)$ — растягивающее напряжение у вершины трещины $(r=0)$. Критерий (1) позволяет осуществить обобщение принципов линейной механики разрушения на динамику. Структурный размер d определяется по данным квазистатических испытаний образцов с трещинами и в случае плоского напряженного состояния связан с критическими параметрами материала следующим соотношением [4]:

$$d = 2K_{Ic}^2 / \left(\pi\sigma_c^2\right), \qquad (2)$$

где K_{Ic} — квазистатическая вязкость разрушения (критический коэффициент интенсивности). В соответствии с данным подходом σ_c, K_{Ic} и τ образуют систему определяющих параметров, которые описывают прочностные свойства материала. Реализация схем нагружения с отмеченными особенностями при известных параметрах импульса давления и значениях пороговых разрушающих нагрузок позволяет определить из (1) структурное время разрушения τ.

Эксперименты, проведенные на различных материалах, демонстрируют пороговый характер разрушения как бездефектных образцов, так и образцов с макродефектами типа трещин [3, 8, 9] и увеличение разрушающей амплитуды с уменьшением длительности импульса нагрузки. Ниже приведены результаты анализа разрушения материалов при ударно-волновом нагружении.

Волновой режим нагружения в бездефектных образцах. Для исследования разрушения бездефектных образцов традиционно используется откольная схема нагружения. Импульс сжатия создается на одном конце образца в результате взаимодействия последнего с ускоренным тем или иным способом бойком. После прохождения по образцу импульс сжатия отражается от свободного торца и возвращается в образец в виде волны растяжения, под воздействием которой и происходит разрушение. Параметры импульса воздействующего давления восстанавливаются по скорости движения свободной поверхности образца и зависят от свойств материала бойка, его скорости и размеров. Магнитно-импульсный способ позволяет расширить возможности этой схемы за счет формирования управляемых в широком диапазоне изменения параметров импульсных давлений непосредственно на границе образца [5]. Для вычисления параметра τ необходима информация об амплитудно-временных параметрах пороговой разрушающей нагрузки. Ее отсутствие ограничивает объем использованных при анализе данных по откольному разрушению.

Обобщенная зависимость прочности различных материалов от относительной длительности импульса, описывающая данные, представленные на рис. 1, имеет вид

$$\sigma_d = \sigma_c\left(T_p/\tau\right)^{-\alpha}, \qquad (3)$$

где σ_d — пороговая разрушающая нагрузка; T_p – длительность импульса; $\alpha \approx \sqrt{2}$.

Обработка результатов проводилась с использованием описанной в [15] методики. Следует отметить, что формируемый при импульсном

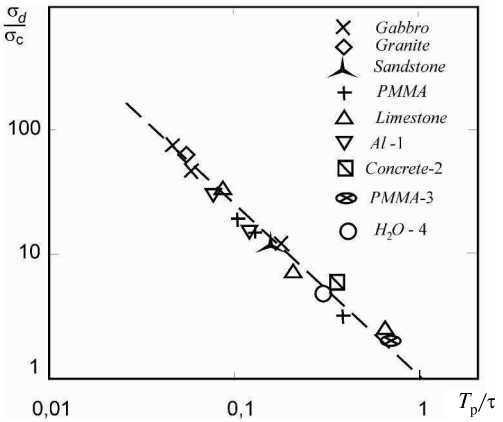


Рис. 1. Зависимость разрушающих пороговых нагрузок в откольной схеме нагружения от относительной длительности импульса (по обработанным данным из [10–14] и результатам испытаний магнитно-импульсным способом [15])

нагружении разрыв сплошности в воде также описывается критерием (1), который, по мнению авторов [14], имеет универсальный характер и может быть использован для описания процессов в различных конденсированных средах.

Разрушение образцов с макродефектами типа трещин. Для образцов с макродефектами типа трещин, нагружаемых по моде I равномерно распределенным по берегам трещины импульсным давлением, типичные зависимости длины проросшей трещины от амплитуды и длительности импульса показаны на рис. 2. На примере разрушения ПММА (кривые *7*, *8*, *9* рис. 2) показан рост пороговых разрушающих нагрузок с уменьшением длительности воздействия. Пороговые разрушающие нагрузки P_{tr} определяются путем экстраполяции длины проросшей трещины L_{cr} в область $L_{cr} \to 0$ (пример показан для кривой *4*) По критерию (1) определяется структурное время разрушения τ. Для исследованных материалов различие в значениях τ, определенных из опытов по разрушению бездефектных образцов и образцов с макродефектами типа трещин, не превышает 10 % [5]. Диапазон изменения этого параметра — от 7 мкс для сферопластика до 90 мкс для габродиабаза.

Энергия, требуемая для образования новых поверхностей при статическом нагружении линейно-упругого тела (постоянная Гриффица), равна сопротивлению роста трещины и определяется из соотношения [16]

$$\gamma_0 = K_{Ic}^2 / (2E), \qquad (4)$$

где E — модуль Юнга.

Особенностью магнитно-импульсного способа нагружения является полное прекращение энергообмена между образцом и загрузочным устройством после окончания импульса. Кроме этого разрушение материала при пороговых нагрузках происходит с задержкой t^*, близкой к τ [5]. Эти факторы делают возможным анализ энергобаланса процесса трещинообразования в динамике. При импульсном нагружении увеличивается не только амплитуда разрушающей нагрузки. В [6] показано, что поверхностная энергия разрушения может быть определена из данных по разрушению образцов с макродефектами типа трещин (вид *II* рис. 2) по следующему соотношению:

$$2\gamma_d = \frac{3T_p P_{tr}\tau}{2k\rho}, \qquad (5)$$

где k — тангенс угла наклона зависимости $L_{cr}(P)$ (рис. 2) в области $L_{cr} \to 0$ при длительности импульса нагружения T_p, м/Па; ρ — плотность материала; t^* — время до старта трещины.

Значения поверхностной энергии разрушения для различных материалов, рассчитанные по (5), хорошо описываются зависимостью [15]

$$\gamma_d = \gamma_0 A\left(T_p/\tau\right)^{-\beta}, \qquad (6)$$

где A — коэффициент пропорциональности, $\beta \approx 1$. Параметр A характеризует увеличение энергоемкости процесса разрушения при импульсном нагружении. Например, если длительность импульса нагружения T_p равна структурному времени разрушения τ, то $A = \gamma_d/\gamma_0$, т. е. поверхностная энергия разрушения в динамике в A раз превышает постоянную Гриффица γ_0.

Если связывать этот результат с разрывом атомно-молекулярных связей при образовании новых поверхностей в зоне магистральной трещины, то он кажется несколько неожиданным, так как трудно ожидать увеличения энергии связи атомов при временах воздействия существенно больших времен собственных колебаний атомной-молекулярной системы. Однако эксперименты, например [20], говорят о том, что процесс разрушения определяется не только про-

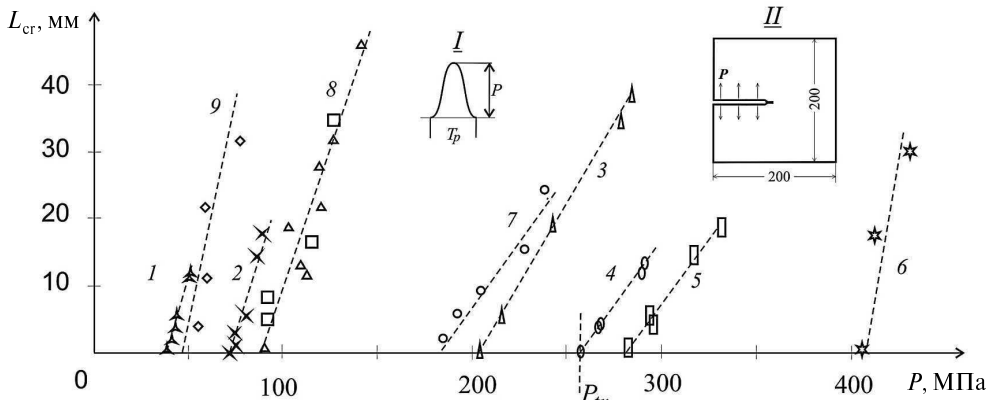


Рис. 2. Зависимости длины проросшей трещины от амплитуды одиночного импульса нагрузки для разных материалов и длительностей нагружения: *1* — известняк, 4,4 мкс; *2* — мрамор, 3,6 мкс; *3* — габродиабаз, 3,6 мкс; *4* — песчаник, 3,6 мкс; *5* — гранит, 3,6 мкс; *6* — полимерный композит — 1,5 мкс [19]; ПММА: *7* мкс; *8* — 2 мкс; *9* — 4,3 мкс [4]. Приведены форма импульса (*I*) и схема нагружения (*II*)

странственно локализованным продвижением магистральной трещины (МТ), но и сопровождается формированием в окрестностях ее вершины многочисленных микронарушений сплошности среды, влияющих на характеристики развития МТ.

Это предположение обосновывается и данными анализа состояния поверхности трещины при разных скоростях ее роста в условиях импульсного нагружения. Так, в [8] показано, что разрыв сплошности при продвижении МТ имеет не одномерною структуру, а сопровождается появлением мезотрещин, развивающихся под углом к основной траектории на глубину до 100 мкс, угол наклона которых имеет слабую корреляцию со скоростью продвижения трещины.

Формирование наблюдаемых микроразрывов [20] и развивающихся в наблюдаемом диапазоне скоростей (100–600 м/с) мезотрещин [8] требует дополнительной энергии, и можно допустить, что возможная причина увеличения энергоемкоемкости образования новых поверхностей заключается в многоуровневом характере процесса разрушения, локализация которого не детерминирована только самой МТ, реализующейся на макроуровне.

Выявленные зависимости $\sigma_d\left(T_p/\tau\right)$ и $\gamma_d\left(T_p/\tau\right)$ убедительно демонстрируют существенное отличие процесса разрушения при импульсном и статическом нагружении.

Размер разрушения

Критический коэффициент интенсивности для трещины длиной $2l$ в бесконечной пластине определяется соотношением $K_{1c}=\sigma_c\sqrt{\pi l}$. Известно, что прочность бесконечной пластины с трещиной длиной $a=2K_{Ic}^2/(\pi\sigma_c^2)$ в $\sqrt{2}$ раз меньше прочности бездефектного образца [16]. Будем считать такое снижение прочности достаточным для развития процесса разрушения на макроуровне, т. е. для разрушения образца, а размер a — критическим размером разрушения, определяющим его масштаб.

Это соответствует условиям описанных выше экспериментов, ориентированных именно на определение пороговых нагрузок, разрушающих образец. Кроме того, система определяющих параметров содержит статические параметры материала этого же масштабного уровня. Используя соотношение (4), критический размер дефекта в статике можно найти следующим образом:

$$a=2\frac{2E\gamma_0}{\pi\sigma_c^2}, \qquad (7)$$

т. е. для реализованного напряженного состояния критический размер разрушения зависит только от таких параметров материала, как поверхностная энергия разрушения и прочность. При импульсном нагружении имеет место связь этих параметров с длительностью воздействия,

т. е. в динамике следует ожидать, что критический размер разрушения становится функцией от длительности импульса нагружения, так как и σ_d и γ_d являются таковыми

С учетом (3) и (6) связь критического размера разрушения a^* с параметрами импульса нагрузки имеет вид

$$a^* = aA\left(\frac{T_p}{\tau}\right)^{-\beta+2\alpha}. \qquad (8)$$

В соответствии с полученным выражением относительный критический размер разрушения a^*/a зависит только от одной характеристики материала — структурного времени разрушения τ. Абсолютное значение критического размера разрушения определяется (7) с учетом статических прочностных характеристик материала. Выражение (8) получено на основе анализа и обобщения результатов экспериментального исследования группы материалов, в которой представлены ПММА, сферопластик и различные горные породы. Для этого семейства материалов с точностью не хуже $\pm 7\%$ определены значения параметров, характеризующих процесс разрушения: $\alpha \approx \sqrt{2}$, $\beta \approx 1$, $A \approx 50$.

Следует подчеркнуть, что экспериментальные данные по разрушению как бездефектных образцов, так и образцов с дефектами типа трещин, получены в условиях ударно-волнового воздействия, т. е. при выполнении условия

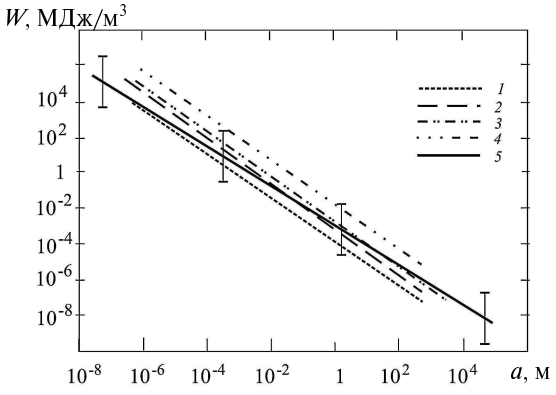


Рис. 3. Удельная энергия разрушения в зависимости от критического размера для габродиабаза (*1*), песчаника (*2*), гранита (*3*), глины (*4*), зависимость (*5*) из [23]

$$cT_p << D, \qquad (9)$$

где c — скорость распространения волны нагрузки в образце; D — характерный размер образца. Поэтому продвижение зависимости (8) в область больших длительностей воздействия обосновано только при выполнении условия (9).

Выявленная связь критического размера разрушения с параметрами материала σ_0, K_{Ic} в статике, структурным временем разрушения τ и длительностью порогового импульса нагружения T_p качественно соответствует многочисленным данным фрактографического анализа подвергаемых ударным нагрузкам материалов. Разрушение образца происходит только в том случае, когда параметры нагружения достаточны для формирования соответствующего структурного размера разрушения. В противном случае в материале происходит образование зон разрушения, спектр размеров которых ограничен сверху критическим размером разрушения. В [21, 22] проведен анализ распределения дефектов (центров разрушения) по размерам. Показано, что спектр размеров ограничен сверху, при этом средний размер разрушения есть функция амплитудно-временных параметров импульса нагружения.

На рис. 3 приведены зависимости удельной энергии разрушения некоторых материалов от размера (масштаба) разрушения, определяемого по (8). Наблюдаемая корреляция полученных результатов с зависимостью удельной энергии разрушения от размера объекта (рис. 3, кривая *5*), объединяющей данные по различным материалам [23], обосновывает правомерность выбранного подхода.

В общем случае рост поврежденности может приводить к модификации материала и изменению значений определяющих параметров σ_c, K_{Ic} и τ. Поэтому при повторных нагружениях анализ процесса разрушения необходимо проводить с учетом этого фактора. Режим нагружения, соответствующий условию (9), реализуется не только в лабораторных и промышленных условиях, но наблюдается и в некоторых природных явлениях. Примером служат такие геофизические процессы, как землетрясения. Средний размер разломов земной коры [24] хорошо коррелирует с критическим размером процесса разрушения, определяемым характерной длительностью волнового пакета при землетрясениях и усредненными параметрами среды.

Анализ результатов показывает, что разрушение материала происходит за счет формирования зон, насыщенных дефектами. Размер дефектов определяется относительной длительностью импульса и параметрами материала.

Использование магнитно-импульсного метода формирования управляемых ударных нагрузок обеспечивает реализацию схем испытаний, которые позволяют проводить корректный анализ энергобаланса развития трещины в начале ее роста.

Выявленные в результате анализа экспериментальных данных, проведенного с использованием структурно-временного подхода, зависимости прочности и поверхностной энергии разрушения материала демонстрируют существенный рост этих параметров с уменьшением длительности воздействия и позволяют определить критический размер образующихся дефектов.

Пространственный масштаб процесса разрушения (критический размер дефектов) в системе определяющих параметров σ_0, K_{Ic} и τ зависит только от длительности воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новиков, С.А.** Разрушение материалов при воздействии интенсивных ударных нагрузок [Текст] / С.А. Новиков // Соровский образовательный журнал.— 1999. № 8.— С. 116–121.

2. **Барахтин, Б.К.** Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов [Текст] / Б.К. Барахтин, Ю.И. Мещеряков, Г.Г. Савенков // ЖТФ.— 2010. Т. 80. Вып. 1.— С. 79–84.

3. **Кривошеев, С.И.** Экспериментальное изучение разрушения габродиабаза в условиях импульсного нагружения [Текст] / С.И. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбГТУ.— 2003. № 2.— С. 115–117.

4. **Кривошеев, С.И.** Инициирование разрушения твердых тел при интенсивном импульсном нагружении [Текст] / С.И. Кривошеев, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, Г.А. Шнеерсон // Известия Академии наук. Сер.: Механика твердого тела.— 1999.— № 5.— С. 165–172.

5. **Кривошеев, С.И.** Магнитно-импульсная методика тестирования материалов при импульсном нагружении / С.И. Кривошеев // ЖТФ.— 2004. Т. 75. Вып. 3.— С. 47–53.

6. **Морозов, Н.Ф.** Об анализе откола с позиций структурной механики разрушения [Текст] / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Уткин //ДАН СССР.— 1990. Т. 313. № 2.— С. 276–279.

7. **Морозов, Н.Ф.** Проблемы динамики разрушения твердых тел [Текст] / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров // СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997.— 132 с.

8. **Атрошенко, С.А.** Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакрилата [Текст] / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров // Журнал технической физики.— 2002. Т. 72. Вып. 2.— С. 52–58.

9. **Атрошенко, С.А.** Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках [Текст] / С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров [и др.] // Журнал технической физики.— 2002. Т. 72. Вып. 12.— С. 54–58.

10. **Ботани, Д.** Механические свойства вещества при больших скоростях деформирования, вызванного действием лазерной ударной волны [Текст] / Д. Ботани, В.И. Вовченко, Г.И. Каннель [и др.] // Доклады Академии наук.— 2003. Т. 389. № 3.— С. 328–331.

11. **Klepachko, J.R.** An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling / [Текст] / J.R. Klepachko, A. Braga // Int. Journal of Impact Engineering.— 2001. № 25.— P. 387–409.

12. **Златин, Н.А.** Определение прочности ПММА при одноосном растяжении длительностью 10^{-6} с / Н.А. Златин, Г.С. Пугачев, Э.Н. Белендир, Е.Л. Зильбербрант // ЖТФ.— 1984. Т. 54. № 4.— С. 797–802.

13. **Бесов, А.С.** Об аналогии начальной стадии разрушения твердых тел и жидкостей при импульсном нагружении [Текст] / А.С. Бесов, В.К. Кедринский, Н.Ф. Морозов, [и др.] // Докл. Акад. наук.— 2001. Т. 378. № 3.— С. 235–238.

14. **Груздков, А.А.** Кавитационное разрушение жидкостей большой и малой вязкости [Текст] / А.А. Груздков, Ю.В. Петров // ЖТФ.— 2008. Т. 78. Вып. 3.— С. 6–10.

15. **Кривошеев, С.И.** Мегагауссные поля и прочность материалов [Текст] / С.И. Кривошеев // LAP LAMBERT Academic Publishing.— ISBN-13: 978-3-8433-0864-9.— 2011.— 152 с.

16. **Броек, Д.** Основы механики разрушения [Текст] / Д. Броек.— М.: Высшая школа, 1980.— С. 368

17. **Березкин, А.Н.** Эффект запаздывания старта трещины при пороговых импульсных нагрузках [Текст] / А.Н. Березкин, С.И. Кривошеев, А.А. Уткин, Ю.В. Петров // Доклады РАН.— 2000. Т. 375. № 3.

18. **Груздков, А.А.** Энергоемкость разрушения материалов в условиях импульсного нагружения

микросекундной длительности [Текст] / А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров // Физика твердого тела.— 2003. Т. 45. Вып. 5.— С. 842–845.

19. **Klepachko, J.R.** Behavior of particle-filled polymer composite under static and dynamic loading [Текст] / J.R. Klepachko, S.A. Atroshenko, P. Chevrier [at al.] // Engineering Fracture Mechanics.— 2007. Vol. 75. Is. 1.— P. 136–152.

20. **Лексовский, А.М.** Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- и мезомасштаба и квазихрупкое разрушение однородных материалов [Текст] / А.М. Лексовский, Б.Л. Баскин // Физика твердого тела.— 2011. Т. 53. Вып. 6. С. 1157–1168

21. **Пунин, В.Т.** Прогнозирование накопления повреждаемости в металлах в явлении динамического разрушения [Текст] / В.Т. Пунин, А.Я. Учаев, Н.И. Завада, Е.В. Кошелева [и др.] // сб.: VII Забабахинские научные чтения.— Снежинск, 8–12 сентября 2003 г.

22. **Бонюшкин, Е.К.** Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева [Текст] / Е.К. Бонюшкин, Н.И. Завода, С.А. Новиков, А.Я. Учаев / Под ред. акад. РАН Р.И. Илькаева // Труды ученых ядерных центров России.— 1998. № 3.— Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, №3, 1998. С. 274.

23. **Пилов, П.И.** Выбор критической плотности энергии при измельчении [Текст] / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Г.Н. Стрельников [и др.] // Обогащение руд.— 2007. № 5. С. 7–10.

24. **Садовский, М.А.** Геофизика и физика взрыва [Текст] / М.А. Садовский // Избранные труды / Под ред. чл.-кор. РАН А.А. Адушкина.— М.: Наука, 1999.— С. 336.

УДК 621.762.4

К.К. Мертенс, П.А. Кузнецов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ

Электрогидроимпульсное прессование порошков (ЭГИП) — один из перспективных импульсных способов получения изделий различного назначения.

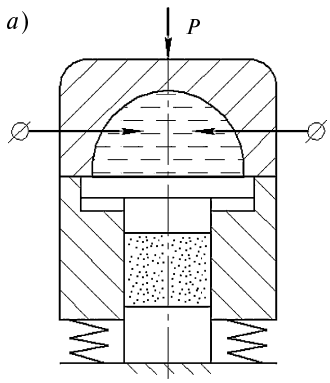
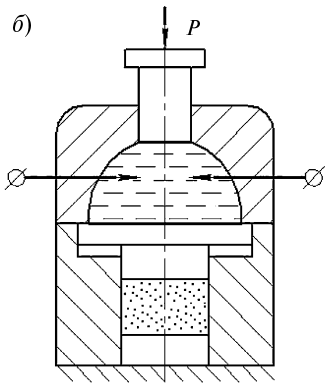
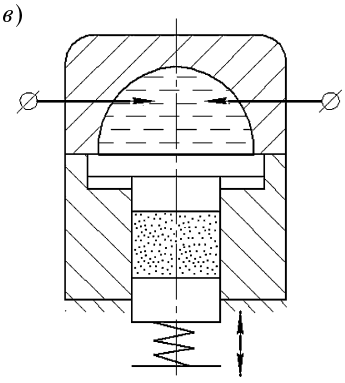
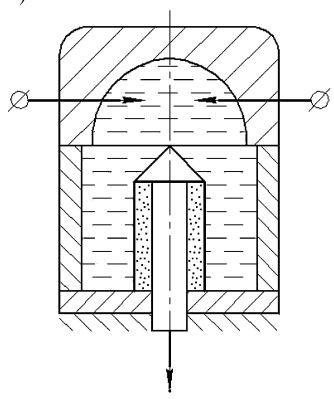
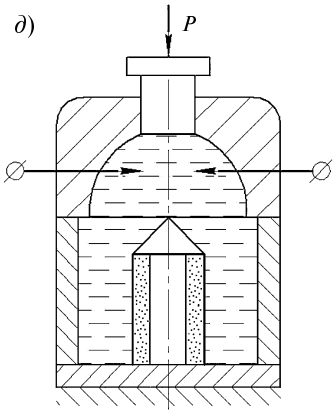
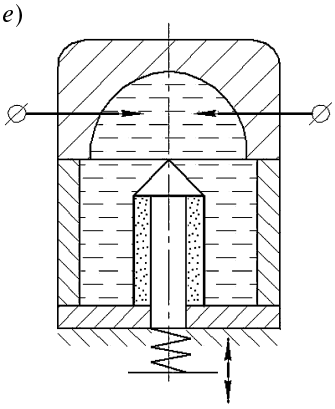
Процесс целесообразно использовать для изготовления тонкостенных изделий путем напрессовки порошка на спеченные или компактные основы и при прессовании многослойных изделий [1].

С точки зрения энергетических затрат на начальном этапе прессования, когда доминирует процесс переукладки частиц, целесообразно прикладывать небольшие давления либо осуществлять виброформование. Однако роль предварительного уплотнения не исчерпывается уменьшением энергетических затрат. Опыты показали, что плотность деталей при ЭГИП существенно зависит от начальной плотности порошка. В связи с этим для изготовления высокоплотных деталей целесообразно применять комбинированное прессование, включающее предварительное уплотнение порошка каким-либо способом и последующую электрогидроимпульсную допрессовку.

Предварительное уплотнение может осуществляться статическим, гидростатическим, эластостатическим прессованием, виброформованием или другими способами. Двухступенчатая технология прессования с одновременной или последовательной комбинацией различных способов нагружения позволяет изменять схему напряженно-деформированного состояния и получать детали большей плотности, более сложной формы, с улучшенными свойствами, что традиционными статическими способами не может быть достигнуто.

Разработаны различные технологические варианты комбинированного прессования (см. табл.). Большинство разработанных устройств защищены авторскими свидетельствами и патентами [2, 3]. Выбор способа предварительного уплотнения определяется формой и размерами детали, физико-механическими свойствами порошка. Результаты опытов показали, что для всех рас-

Технологическая классификация комбинированных совмещенных процессов прессования изделий из порошков с использованием ЭГИП

Вид ЭГИ нагружения	Совмещение способов нагружения		
	со статикой	с гидростатикой	с виброформованием
Осевое	*а*) 	*б*) 	*в*) 
Радиальное	*г*) 	*д*) 	*е*) 

смотренных схем плотность прессовок после комбинированного прессования выше предельной плотности прессовок, полученных статическим или электрогидроимпульсным прессованием. Ниже приведены результаты исследований комбинированного прессования с предварительной подпрессовкой статическим, гидростатическим давлением и виброформованием.

Одна из задач работы — исследование возможностей комбинированного статического и электрогидроимпульсного прессования, которое было проведено на порошках кварцевого стекла и магнезита. Опытным путем определяли влияние основных факторов комбинированного прессования — давления предварительного уплотнения, энергии и количества разрядов, схемы ЭГИП — на плотность прессовок. Для сравнения результатов были проведены опыты по статическому прессованию тех же материалов в жестких пресс-формах.

Результаты опытов показали, что для всех рассмотренных схем плотность прессовок, полученных комбинированным прессованием, выше плотности «статических» прессовок. Например, плотность втулок из кварцевого стекла, изготовленных комбинированным прессованием по схеме обжатия, повышена с $1{,}62\cdot10^3$ до $1{,}85\cdot10^3$ кг/м^3, т. е. на 14,2 %. Пористость их снижена соответственно с 30 до 20 %. Плотность втулок из кварцевого стекла после электрогидроимпульсной допрессовки по схеме раздачи увеличилась с $1{,}64\cdot10^3$ до $2{,}95\cdot10^3$ кг/м^3, т.е. на 19 %, а пористость уменьшилась на 10–11 %. В обоих случаях использовалось многоразрядное прессование.

На рис. 1 приведена зависимость плотности втулок из кварцевого стекла, изготовленных

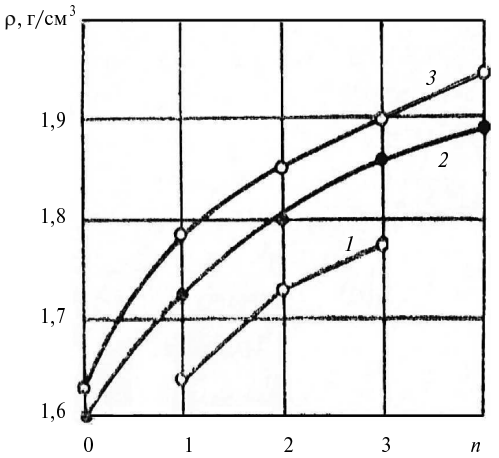


Рис. 1. Зависимость плотности втулок из кварцевого стекла от количества разрядов при давлениях подпрессовки 0 (*1*); 50 (*2*) 100 (*3*) МПа. Энергия единичного разряда — 10 кДж

комбинированным прессованием по схеме раздачи, от давления предварительного уплотнения и количества разрядов.

Существенное повышение плотности и снижение пористости получено также при комбинированном прессовании магнезитового порошка. Допрессовка втулок по схеме обжатия (табл., *г*) позволила увеличить плотность на 10 % и снизить пористость с 23,8 до 16 %. При аналогичной допрессовке с раздачей плотность втулок увеличилась с $2{,}6 \cdot 10^3$ до $2{,}87 \cdot 10^3$ кг/м^3, а пористость уменьшилась с 29,2 до 26,5 %. Наконец, выполнение электрического разряда, инициированного металлическим проводником внутри трубчатого изделия, привело к повышению плотности с $2{,}71 \cdot 10^3$ до $3{,}03 \cdot 10^3$ кг/м^3, т. е. на 12 %, и уменьшению пористости с 23,8 до 14,5 %.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что на плотность оказывает влияние также величина давления предварительной подпрессовки. Причем плотность образцов была тем выше, чем выше давление подпрессовки, т. е. степень предварительного уплотнения. Оптимальное давление подпрессовки зависит от свойств прессуемого порошка, формы и размеров детали, а также от требуемой плотности. При комбинированном прессовании кварцевого стекла, для которого характерна плохая прессуемость, более высокие свойства деталей получены при предварительном уплотнении прессовок давлением 80–100 МПа. Обладающую сравнительно лучшей прессуемостью массу из магнезита достаточно подпрессовать давлением 30–50 МПа.

ЭГИП исследуемых порошков проводилось и без предварительной подпрессовки. При этом плотность полученных прессовок была значительно выше, чем у полученных статическим прессованием в жестких пресс-формах (особенно для порошков из магнезитового порошка), но ниже, чем при комбинированном прессовании.

При использовании электрогидроимпульсного, гидродинамического и гидровзрывного прессования деталей, когда импульсное нагружение осуществляется жидкостью, естественно и целесообразно предварительное уплотнение проводить той же жидкостью с использованием одного и того же оборудования и оснастки.

Гидростатическое давление в разработанном способе на один-два порядка ниже, чем при гидростатическом прессовании. Его назначение состоит в предварительном уплотнении порошка и оформлении контуров прессуемой детали. Преимущества импульсного нагружения эффективно реализуются на заключительной стадии прессования, определяющей окончательные размеры детали и ее плотность.

Процесс осуществляли следующим образом. Порошок загружали в эластичную оболочку, герметизировали, при необходимости производили его вакуумирование и затем предварительно уплотняли гидростатическим давлением рабочей жидкости 10–50 МПа. Не снижая давления, в жидкости осуществляли электрический разряд либо несколько разрядов с определенной частотой, которые производили окончательное прессование изделия.

Предварительное уплотнение гидростатическим давлением улучшает структуру и качество детали. Неравномерность импульсного давления сказывается не так существенно, и деталь получается более равноплотной. Достоинством комбинированного способа является также то, что в момент импульсной разгрузки прессовка продолжает находиться под гидростатическим давлением, что предотвращает образование трещин.

Разработанный способ повышает производительность труда, так как предварительное и окончательное прессование осуществляется при одной установке оболочки с порошком. Нет необходимости в использовании дополнительного оборудования, например прессов, гидростатов.

Используемое оборудование необходимо дополнить лишь серийно выпускаемым гидронасосом для создания в рабочей камере гидростатического давления.

Однако эксперименты показали, что повышение гидростатического давления приводит к резкому ухудшению электрических характеристик неинициированных разрядов в воде. Таким образом при ЭГИП порошков при повышенном гидростатическом давлении необходимо осуществлять разряды с инициированием металлической проволочкой. Такой разряд менее чувствителен к гидростатическому давлению на стадии своего формирования.

Весьма эффективен для предварительного уплотнения процесс виброформования. Оптимальные частота, амплитуда и ускорение при виброформовании, а также величина прижима (давление), количество связки, длительность процесса зависят от многих факторов. Прежде всего к ним относятся физико-химические свойства порошка, его гранулометрический состав, форма и размеры изделия, принцип действия и конструкция виброустановки и др. Сложная зависимость плотности изделия от параметров виброформования не позволяет дать единые рекомендации для различных формуемых материалов и конфигураций изделий. Поэтому оптимальные параметры виброформования следует подбирать опытным путем.

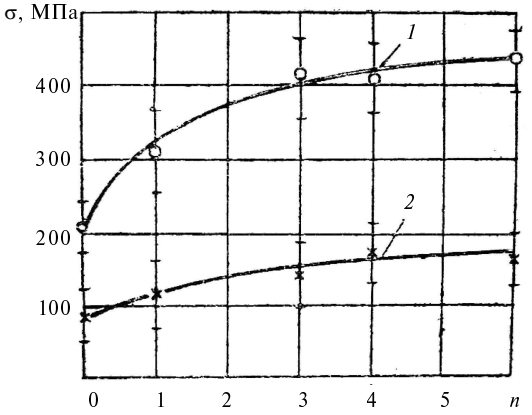


Рис. 2. Зависимости механической прочности на сжатие виброформованных образцов из глинозема (*1*) и корунда (*2*) от количества разрядов ЭГИП

Были экспериментально определены оптимальные параметры виброформования, ЭГИП и комбинированного способа и проведен их сравнительный анализ.

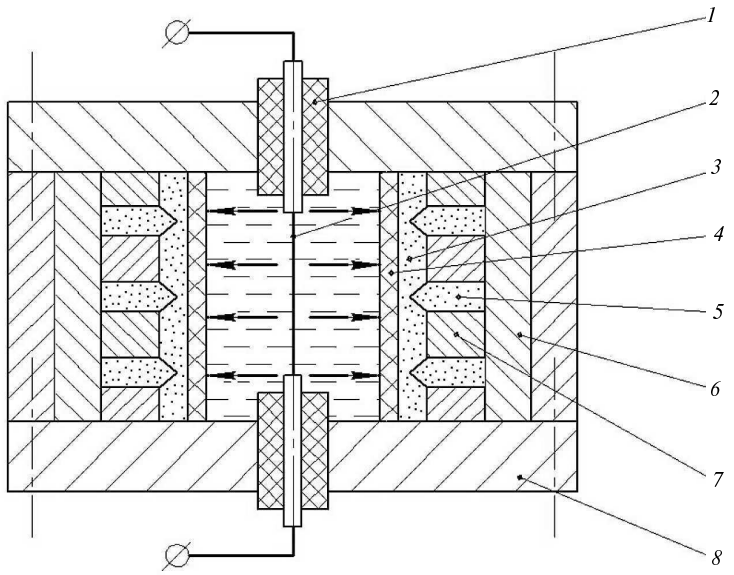


Рис. 3. Схема оснастки для комбинированного совмещенно-последовательного прессования втулок с ребрами: *1* — электрод; *2* — инициирующий проводник (проволочка); *3* — порошок; *4* — эластичная оболочка; *5* — кольцо (ребро, предварительно спрессованное); *6* — разъемная матрица; *7* — разъемное кольцо; *8* — плита

Важнейшее преимущество комбинированных процессов изготовления порошковых изделий состоит в возможности влияния на структуру и прочность получаемых прессовок. Значительный рост плотности, уменьшение пористости и улучшение структуры прессовок, изготовленных комбинированным электрогидроимпульсным прессованием, способствовали увеличению их механической прочности. Возможность повышения прочности деталей при электрогидроимпульсном прессовании имеет большое значение в связи с тем, что при статических методах прессования прочностные свойства изделий, особенно из малопластичных материалов, ограничены предельной уплотняемостью порошков.

При статическом прессовании в жесткой пресс-форме при увеличении давления от 100 до 200 МПа плотность прессовок из кварцевого стекла и магнезита изменяется незначительно. Аналогично плотности различие в механической прочности образцов, спрессованных при указанных давлениях, также невелико. Электрогидроимпульсная допрессовка брикетов, предварительно уплотненных давлением 100 МПа, обеспечила повышение предела прочности на сжатие прессовок из кварцевого стекла в 2,5 раза, образцов из магнезита — в среднем в 1,5 раза.

Прочностные характеристики деталей из керамических порошков, полученные комбинированным прессованием, не могут быть достигнуты статическим прессованием в жестких пресс-формах или виброформованием. Например, шихта из тонкомолотого глинозема отличается очень малой пластичностью и склонностью к перепрессовочным трещинам даже при виброформовании. Электрогидроимпульсное прессование образцов из глинозема и корунда, уплотненных виброформованием, привело к росту их механической прочности в 1,5–2 раза (рис. 2). Повышение плотности и механической прочности изделий из огнеупорных порошковых материалов способствует увеличению их термостойкости.

В ряде случаев, например при изготовлении втулок с поперечными ребрами, виброформование не обеспечивает равномерного заполнения порошком пресс-формы. Для получения равноплотного изделия необходимо применять комбинированную технологию, включающую предварительное прессование поперечных ребер (колец), дальнейшее электрогидроимпульсное прессование втулки с одновременной напрессовкой ее на ребра и спекание спрессованной детали. Ребра можно получать, например, статическим прессованием в той же пресс-форме, в которой проводится напрессовка, либо в отдельной пресс-форме. При раздельном прессовании упрощается оснастка, становится возможным применение разделительных колец из эластичных материалов и пластмасс. На рис. 3 представлена схема оснастки для комбинированного совмещенно-последовательного прессования втулок с ребрами [2].

В заключение можно сказать, что применение комбинированных процессов формования порошков, как последовательных, так и совмещенных, позволяет получать высокоплотные спеченные изделия более сложной формы и с более высокими эксплуатационными характеристиками, например увеличивает прочность керамических прессовок в среднем до 1,5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мертенс, К.К.** Технологические возможности эластостатического прессования порошковых материалов [Текст] / К.К. Мертенс, П.А. Кузнецов, А.В. Гоциридзе // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.— 2002. № 4.

2. **Богоявленский, К.Н.** Высокоскоростные способы прессования деталей из порошковых материалов [Текст] / К.Н. Богоявленский, П.А. Кузнецов, К.К. Мертенс [и др.].— Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1984.— 168 с., ил.

3. **Мертенс, К.К.** Прессование изделий из порошков подвижными средами [Текст] / К.К. Мертенс, П.А. Кузнецов // Металлообработка.— 2011. № 3.— С. 25–30.

УДК 628.472:504.05

В.И. Масликов, А.Н. Чусов
А.В. Черемисин, М.Г. Рыжакова

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ПОЛИГОНОВ ТБО ДЛЯ ВЫБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ

В России основной объем твердых бытовых отходов (ТБО) захоранивается на полигонах практически без сортировки и предподготовки, а потому содержит большое количество органики, пластика и других компонентов, загрязненных вредными веществами. При захоронении отходов происходят процессы их биохимического разложения, сопровождающиеся минерализацией, образованием биогаза и фильтрата, содержащего примеси, в том числе токсичные. Поэтому полигоны ТБО при их эксплуатации и в течение длительного времени после закрытия являются существенными источниками газовых и водных эмиссий загрязняющих веществ. Кроме того, большую опасность представляет загрязнение атмосферного воздуха дымовыми газами в случае пожаров на полигонах. Атмосферный воздух — основной канал распространения загрязняющих веществ от полигонов ТБО на значительные расстояния и их проникновения в организм человека. Важнейшая задача — разработка мероприятий по снижению загрязнения атмосферного воздуха выбросами полигонов на основе оценки геоэкологического риска, для чего необходимо определение уровней загрязнения и их влияния на здоровье населения. С этой целью могут быть использованы дорогостоящие и продолжительные натурные наблюдения, которые требуют больших затрат и длительного времени. В качестве альтернативного варианта можно использовать математические модели, позволяющие расчетным путем получить необходимые данные. Не отрицая необходимость проведения натурных исследований на полигонах ТБО, математическое моделирование образования газовых эмиссий, их распространения в воздушной среде, уровней загрязнения и риска заболеваний позволяет при минимальных затратах получить крайне важную информацию, необходимую для планирования природоохранных мероприятий.

Для оценки риска загрязнения атмосферного воздуха выбросами полигонов ТБО необходимо иметь данные об объеме, морфологическом составе, плотности отходов, месте, площади захоронения и др., а также о местных природно-климатических, географических условиях (количество и вид осадков, скорость и направления ветров, температура воздуха и почвы, рельеф, тип ландшафта и др.) в зоне расположения полигона. Это требует накопления, анализа, систематизации необходимой информации, создания специальной базы данных (рис. 1).

Кроме того, необходимо иметь модели для оценки объема и компонентного состава газовых эмиссий на полигонах ТБО, включающие определение диффузных выбросов биогаза, а также продуктов сгорания отходов в случае пожаров. Оценка диффузных выбросов биогазов выполняется с использованием апробированных математических моделей, откорректированных для условий конкретного полигона. Накопленный опыт показывает, что для этих целей наиболее удобна модель Табасарана — Ретенбергера [1]. Ее достоинство — надежность полученных результатов при минимальном количестве исходных данных (объем ежегодно завозимых ТБО, содержание органичного углерода, температура отходов и др.). Более сложной задачей оказывается определение выбросов загрязняющих веществ в случае пожаров на полигоне ТБО. Процесс

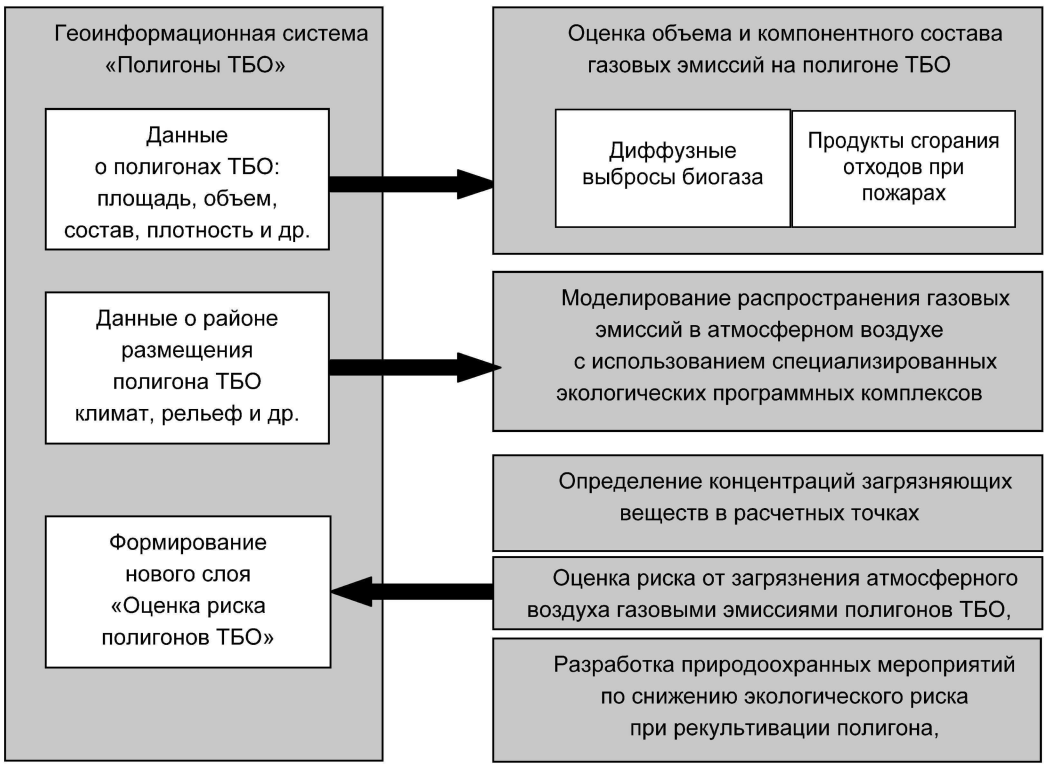


Рис. 1. Схема расчета риска загрязнения атмосферного воздуха

горения свалочных масс сопровождается выбросом в атмосферу значительного количества токсичных веществ, в том числе таких чрезвычайно опасных кумулятивных ядов, как диоксины. Для определения выбросов диоксинов необходимо иметь данные о пожаре на полигоне (продолжительность, объем и скорость выгорания ТБО, площадь горения, интенсивность образования диоксинов), которые определяются состоянием отходов на текущий момент времени. Такая информация практически отсутствует. Имеются лишь ориентировочные данные о выделении диоксинов при горении свалочных масс некоего усредненного морфологического состава. В нашей работе предлагается определение выбросов диоксинов в случае пожара на полигоне ТБО производить на основе данных о содержании в ТБО горючих материалов, удельной массовой скорости выгорания материала, удельной массе диоксинов, выделяемых при сгорании отходов, а также площади пожара.

Моделирование распространения загрязнений в атмосферном воздухе и определение концентраций загрязняющих веществ в расчетных точках выполняется с использованием программных комплексов «Эколог» (при диффузных выбросах биогаза) и «ZONE» (при выбросах продуктов сгорания ТБО в случае пожаров) [2, 3]. Применение программного комплекса «ZONE» позволяет производить моделирование распространения диоксинов в предельно малых концентрациях в трехмерном пространстве и получать более точные результаты по сравнению с использованием комплекса «Эколог», который обычно применяют для расчета концентраций загрязняющих веществ с меньшей токсичностью. При этом учитывается конфигурация тела полигона и очага пожара, интенсивность газовыделения на поверхности, а также климатические и географические характеристики места расположения полигона.

С использованием известной модели оценки риска [4] определяют вероятность токсических эффектов при загрязнении атмосферного воздуха выбросами полигонов ТБО:

$$Risk = 1 - e^{-UR \cdot C}, \qquad (1)$$

где $Risk$ — риск возникновения неблагоприятного эффекта, определяемый как вероятность (в долях единицы) возникновения этого эффек-

та при заданных условиях; *UR* — единица риска, определяемая как фактор пропорции риска в зависимости от величины действующей концентрации; *C* — реальная концентрация вещества, оказывающая воздействие

Например, для расчета риска острых токсических эффектов загрязнения атмосферного воздуха веществами 1-го класса опасности может быть использована следующая зависимость:

$$Prob = -9{,}15 + 11{,}6 \lg\left(C / \text{ПДК}_{\text{м р}} \right), \qquad (2)$$

где *C* — фактическая концентрация загрязняющего вещества; $\text{ПДК}_{\text{м р}}$ — максимальная разовая концентрация загрязняющего вещества для населенных мест.

На основе оценки риска разрабатываются необходимые природоохранные мероприятия при рекультивации полигона.

В настоящее время в Санкт-Петербурге актуальна задача закрытия и рекультивации самого крупного полигона, принимающего около 40 % общего объема ежегодно образующихся ТБО. Полигон введен в эксплуатацию в 1972 году, занимает площадь около 80 га. Объем захороненных отходов составляет более 50 млн м^3. Эксплуатация полигона должна завершиться в ближайшее время, так как он не удовлетворяет современным природоохранным требованиям и расположен в непосредственной близости к населенным пунктам. Полигон является крупным источником загрязнения атмосферного воздуха, выбросов биогаза, а также продуктов сгорания ТБО в случае пожаров.

На рис. 2 представлены результаты расчетов эмиссии биогаза при скорости разложения отходов $k = 0{,}04$ (год$^{-1}$) за периоды эксплуатации полигона с 1973-го по 2014 год.

Значения некоторых загрязняющих веществ, содержащихся в диффузных выбросах биогаза в атмосферу на год закрытия полигона определялись на основе данных, приведенных в [5].

С использованием унифицированной программы «Эколог» были проведены расчеты распространения загрязнений в атмосферном воздухе для июля месяца, самого теплого периода года, когда наблюдается интенсивный выброс биогаза и активное его распространение. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчета концентраций в приземном слое атмосферного воздуха веществ группы суммации (аммиак, сероводород, формальдегид).

Результаты расчета показали, что загрязняющие вещества распространяются на значительное расстояние за пределы санитарно-защитной зоны. Так, на расстоянии 1,5–2 км от полигона уровень загрязнения воздуха по аммиаку, сероводороду, формальдегиду превышает ПДК в 1,5–2 раза.

Расчеты загрязнений атмосферного воздуха диоксинами в случае пожара проводились вариантно (с использованием «ZONE») при задании возможных площадей пожаров 10 м^2 (локальное возгорание, рис. 4, *а*) и 100 м^2 (небольшой пожар, рис. 4, *б*) с учетом природно-климатических условий.

В случае пожара на участке полигона ТБО площадью 10 м^2 на границе санитарно-защит-

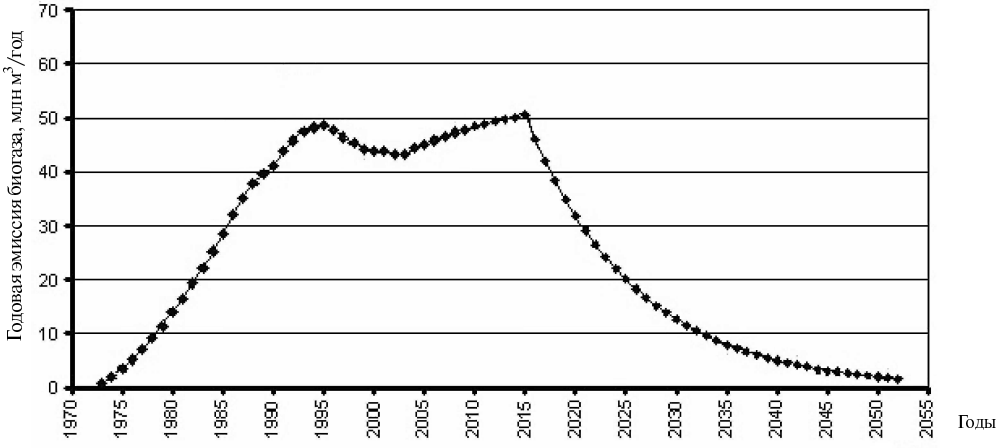


Рис. 2. Общая эмиссия биогаза на полигоне

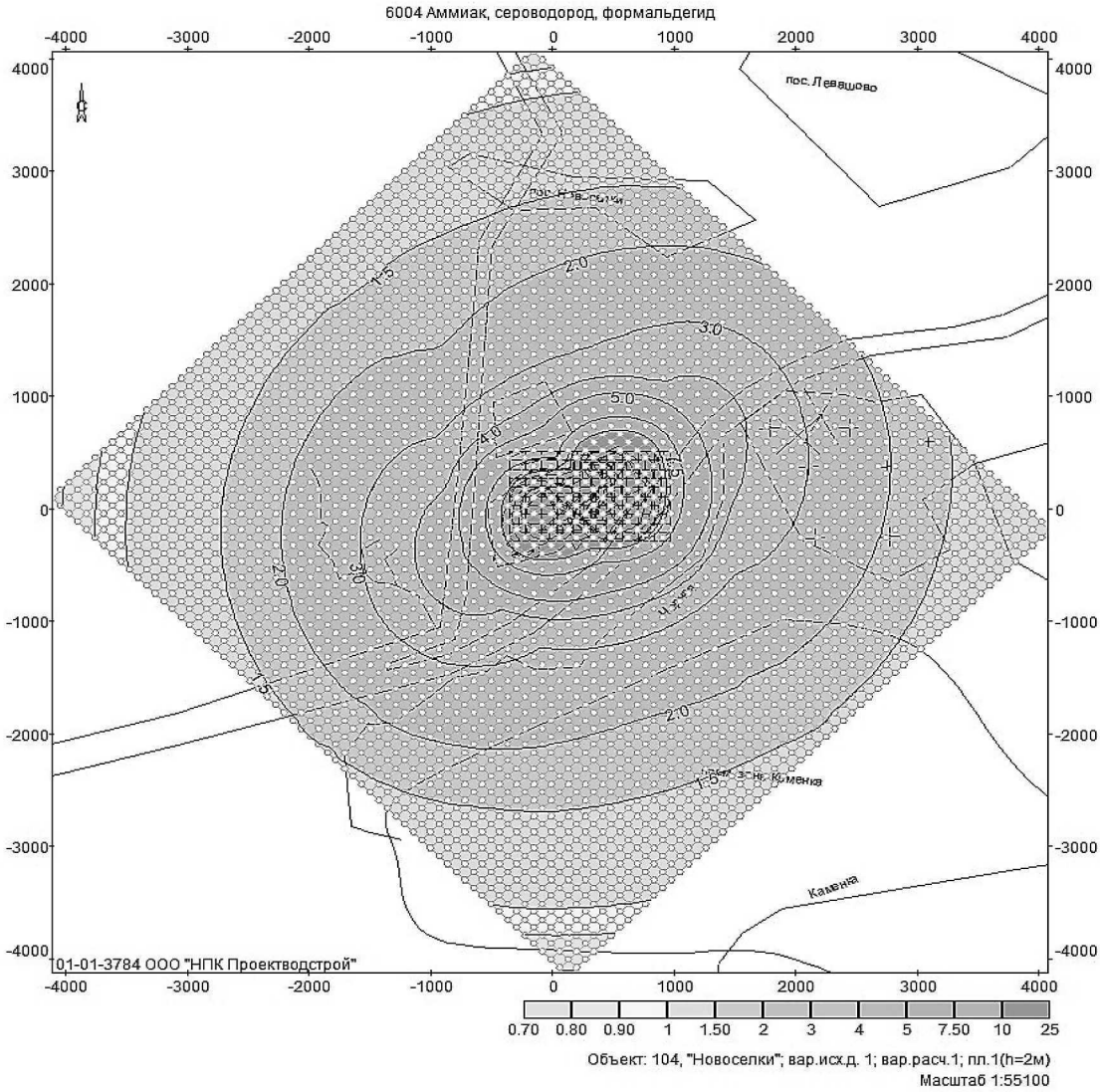


Рис. 3. Концентрация загрязняющих веществ группы суммации

ной зоны концетрация диоксинов составит около 5 ПДК, соответственно при пожаре на площади 100 м^2 концентрация диоксина составит порядка 60 ПДК, что представляет большую опасность для здоровья населения, проживающего вблизи полигона ТБО. Даже при локальном пожаре 10 м^2 экологический риск в расчетной точке составляет 0,157 (то есть из 1000 человек около 150 будут подвержены острым токсическим эффектам), а при сравнительно небольшом пожаре 100 м^2 этот риск равен 1, т. е. из 1000 человек каждый будет подвержен острому токсическому эффекту. При удалении на расстояние примерно 2 км от полигона ТБО экологический риск при пожаре на участке площадью 10 м^2 практически отсутствует, а при пожаре на участке 100 м^2 составит 0,18, т. е. есть из 1000 человек около 180 будет подвержено острым токсическим эффектам.

Таким образом, расчеты подтверждают, что полигон является существенным источником загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами в опасных для человека концентрациях не только в случае пожаров, но и при диффузных выбросах биогаза. Для минимизации геоэкологического риска целесообразно обустройство полигона системой сбора и использования биогаза, позволяющей практически исключить выбросы биогаза в атмосферный воздух, а также резко снизить опасность возникновения пожаров.

а) *б*)

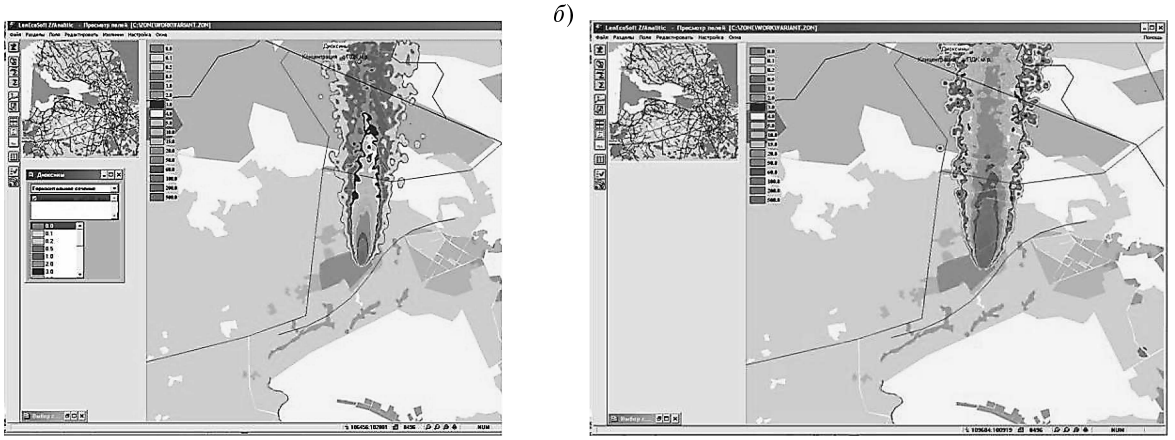


Рис. 4. Загрязнение атмосферного воздуха диоксинами при пожаре на участках полигона площадью 10 м^2 (*а*) и площадью 100 м^2 (*б*)

Основные выводы из проведенных исследований:

1. В условиях отсутствия натурных данных о состоянии полигона ТБО целесообразно для оценки геоэкологического риска использовать математическое моделирование газовых эмиссий при естественном разложении отходов, а также в случае пожаров, и их распространения в атмосферном воздухе.

2. Расчеты рисков показывают высокую опасность для здоровья населения, проживающего вблизи санитарной зоны полигона, даже диффузных выбросов биогаза, которая резко возрастает в случае возгорания отходов.

3. При планировании работ по рекультивации полигона необходимо предусмотреть создание системы сбора и утилизации биогаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fedorov, M.P.** Model of environmental risk assessment of atmospheric air pollution by toxic gases emission from MSW landfills [Текст] / M.P. Fedorov, A.N. Chusov, V.I. Maslikov // Proc. Twelfth Intern. Waste Management and Landfill Symposium— S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.— 5—9 October 2009.— Sardinia 2009, P. 593—594.

2. Унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы «Эколог». Версия 3.0. Руководство пользователя [Текст].— СПб.: «Интеграл» — 2003. — 60 с.

3. Теоретические основы и руководство пользователя ЭПК «Zone» [Текст] / Под ред. д-ра физ.-мат. наук А.С. Гаврилова. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 166 с.

4. **Киселев, А.В.** Методические рекомендации по оценке риска здоровью населения от загрязнения атмосферного воздуха [Текст] / А.В. Киселев, Л.А. Саватеева.— СПб.: «Дейта», 1996.— 54 с.

5. **Методика** расчета количественных характеристик выбросов загрязняющихвеществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов (издание дополненное и переработанное) [Текст] / Научно-производственное предприятие «Экопром» и др. — М., 2004. — 20 с.

УДК 621.396.67

Ю.М. Балагула,
В.Н. Боронин, Н.В. Коровкин

РЕГИСТРАЦИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ

В связи с интенсивным развитием средств связи и все большим проникновением электрических приборов в быт людей возрастает значимость электромагнитной экологии как раздела дисциплины «Электромагнитная совместимость» (ЭМС), занимающегося оценкой влия-

ния электромагнитных полей (в первую очередь антропогенных) на живые организмы. Одно из направлений исследований электромагнитной экологии состоит в выявлении поведенческой реакции животных на электромагнитные воздействия различного вида и интенсивности.

В лаборатории электрофизики естественных экосистем (кафедра экологических основ природопользования инженерно-строительного факультета СПбГПУ) под руководством проф. В.В. Александрова в течение ряда лет проводилась работа по изучению влияния слабых электромагнитных полей на рыб, при этом в качестве показателя физиологического состояния рыб принята их двигательная активность. С появлением доступных по цене видеокамер, компьютеров и средств оцифровки изображения стал активно использоваться метод визуальной экспертной оценки двигательной активности рыб по видеоматериалам. В рамках этого метода производится видеозапись аквариума с рыбами при наличии воздействия и без него, а оценку двигательной активности проводит специально обученный эксперт-ихтиолог.

Достоинством этого подхода по сравнению с инструментальными методами можно считать то, что эксперт способен более полно характеризовать поведение рыб и ухватить нюансы двигательной активности в самых разных ее аспектах. Недостаток же заключается в субъективизме эксперта и дороговизне его работы.

Дальнейшее интенсивное развитие и удешевление вычислительной техники и аппаратуры видеозаписи позволило ставить задачу разработки метода оценки двигательной активности рыб на основе компьютерного анализа видеоизображений, т. е. без непосредственного участия эксперта, но посредством математических методов.

Разработанная авторами методика обеспечивает объективную автоматизированную оценку двигательной активности рыб за заданные периоды времени. Объективность оценки означает, что она не зависит от субъективных факторов, вносимых наблюдателем. Автоматизация имеет целью минимизировать участие человека на всех этапах получения и обработки данных. Принцип, на котором основан метод видеорегистрации двигательной активности рыб, проиллюстрирован на рис. 1.

Структура метода регистрации выглядит следующим образом (рис. 2):

На первом этапе производится запись видеоизображения в течение заданного промежутка времени (на рис. 2 этому соответствует блок «Получение видеоизображения»). Результатом этого этапа является файл видеоданных (фильм), хранящийся на жестком диске компьютера.

Второй этап заключается в математической обработке фильма с целью получения первичной кривой двигательной активности (ДА) и других данных о движении рыб. Первичная кривая ДА — временной ряд чисел, характеризующий интенсивность движения рыб в каждый момент времени (блок «Обработка видеоизображения» на рис. 2).

На третьем этапе происходит математическая обработка первичной кривой ДА для выявления различных характеристик двигательной

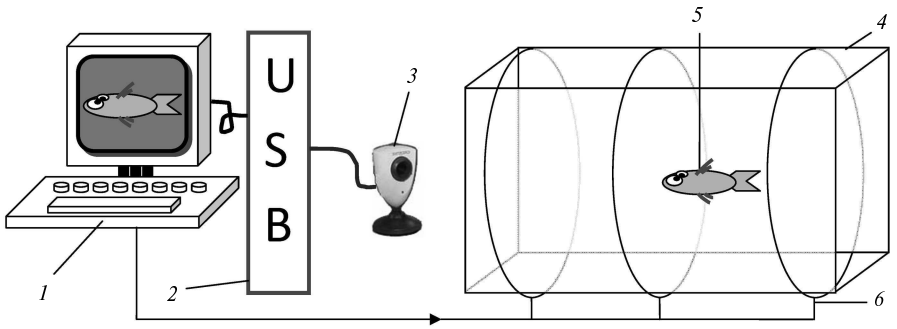


Рис. 1. Метод регистрации двигательной активности рыб по видеозаписям:

1 — компьютер, осуществляющий видеозахват и обработку данных, а также управление электромагнитным воздействием; *2* — USB-интерфейс или плата видеозахвата; *3* — веб-камера или видеокамера; *4* — аквариум; *5* — биологический объект, подвергаемый электромагнитному воздействию; *6* — кольца Гельмгольца или другой источник электромагнитного воздействия

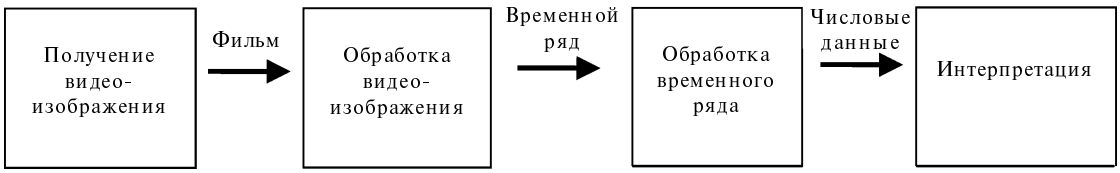


Рис. 2. Структура метода регистрации

активности рыб — спектральный анализ для выявления периодичностей, статистический, корреляционный анализ и т. д. (на рис. 2 блок «Обработка временного ряда»).

Задача четвертого этапа — оценивание того, насколько измеренные характеристики ДА для данного промежутка времени отклоняются от нормы, т. е. какова ДА рыб для исследуемого интервала времени — аномальная или нормальная, повышенная или пониженная. Эта оценка должна производиться на основе статистики наблюдений (блок «Интерпретация» на рис. 2).

Чтобы сформировать временной ряд, характеризующий интенсивность движения группы рыб, предложено использовать величину, которую можно назвать «вес кадра разности». Для ее вычисления производится вычитание двух следующих друг за другом кадров, т. е. поэлементное вычитание матриц, в которых пикселям, составляющим изображения рыб, соответствуют единичные элементы, остальное — нули. На результирующем кадре (кадр разности) неподвижные объекты исчезнут (соответствующие элементы матрицы обратятся в ноль) и вследствие сдвига изображения рыбы образуются элементы, заполненные единицами — «1» и «–1». Далее подсчитывается число элементов матрицы, содержащих «1» и «–1», т. е. число заполненных пикселей на кадре разности. Очевидно, что это число будет тем больше, чем больше рыба сдвинется. Следовательно, зависимость числа заполненных точек на картинках, полученных вычитанием двух последовательных кадров, от времени численно характеризует двигательную активность рыб, при этом охватываются различные ее аспекты — не только поступательное движение, но и дыхательные движения, шевеления хвостов, плавников и т. п. Эта характеристика может быть использована как для группы рыб, так и для одиночной рыбы. Для ее корректного определения необходимо, чтобы за время между двумя кадрами рыба успевала смещаться на расстояние значительно меньшее ее собственной длины, что для золотых рыбок, используемых в эксперименте, легко обеспечивается при частоте 5–10 кадров в секунду.

Таким образом, созданный программно-аппаратный комплекс видеорегистрации обеспечивает получение временного ряда, характеризующего двигательную активность рыб. Этот ряд может быть проанализирован различными методами для получения интегральной характеристики ДА рыб за исследуемый интервал времени. Один из наиболее адекватных для этого методов — фрактальный анализ временных рядов, ранее в похожей постановке задачи использованный авторами для диагностики состояния дуговой сталеплавильной печи [1].

Фрактальный анализ как метод исследования различных математических множеств основан на идеях фрактальной геометрии, разработанной Б. Мандельбротом. Фрактал — это геометрический объект сложной формы. Его главное свойство — самоподобие — состоит в том, что любая часть данного объекта в некотором математическом смысле подобна целому. Количественной характеристикой фрактала, его мерой, служит фрактальная размерность. Теория фракталов разработана также и для временных рядов, обладающих соответствующими свойствами; созданы специфические методы нахождения фрактальных размерностей самоподобных временных рядов [2]. Наиболее удобный, с точки зрения авторов, подход основан на традиционном гармоническом анализе. В [3] показано, что спектральная плотность мощности фрактального временного ряда представляет собой степенную функцию от частоты. Тогда спектральная размерность β вводится как показатель степени этой функции — зависимости спектральной плотности мощности временного ряда от частоты f:

$$S(f) \sim f^{-\beta}.$$

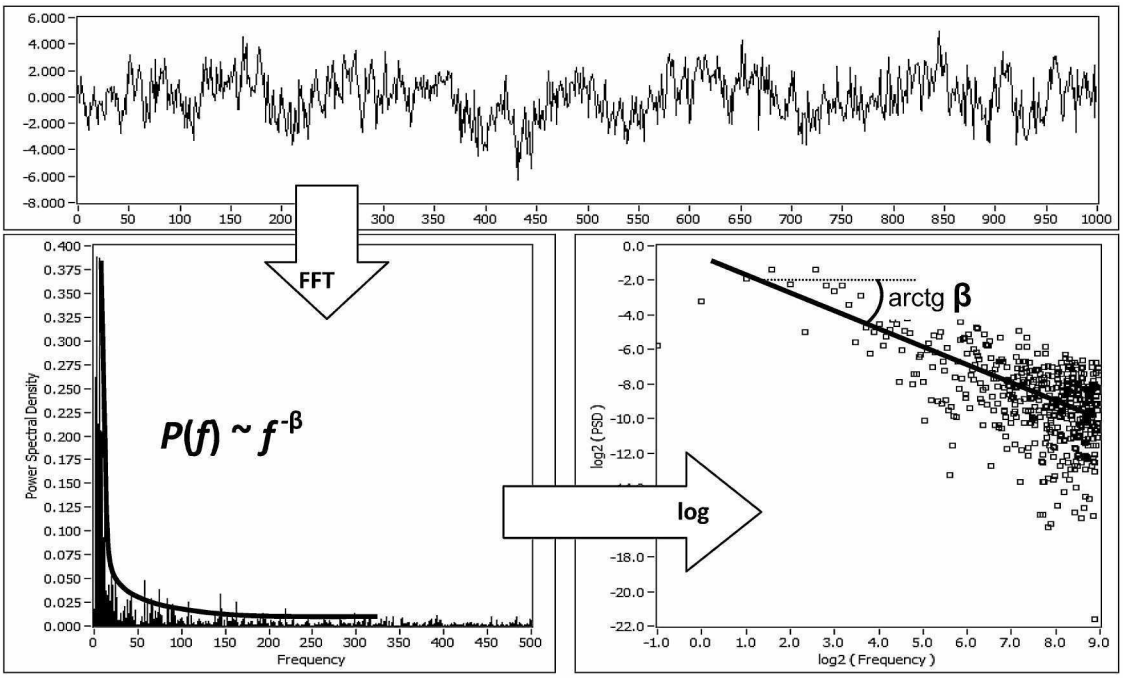


Рис. 3. Фрактальный анализ временного ряда двигательной активности

Из этого выражения следует, что β есть тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей кривую спектра мощности временного ряда, построенного в двойном логарифмическом масштабе.

Эксперименты показали, что временные ряды двигательной активности рыб, полученные по вышеописанной методике, обладают фрактальными свойствами. Следовательно, для них можно, применив быстрое преобразование Фурье (FFT), рассчитать спектральную размерность и использовать ее как интегральную характеристику двигательной активности. Пример полученного временного ряда и его фрактального анализа приведен на рис. 3.

В процессе отработки предлагаемого метода регистрации двигательной активности рыб были сняты и проанализированы видеозаписи поведения рыб в отсутствие электромагнитного воздействия. Результаты фрактального анализа полученных временных рядов двигательной активности приведены в таблице.

При разработке метода видеорегистрации двигательной активности рыб с применением фрактального анализа временных рядов были решены следующие задачи:

построение программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего (при необходимости) непрерывный видеозахват и анализ двигательной

Спектральные размерности временных рядов двигательной активности рыб

Дата съемки	Длительность, мин	Примечание	Спектральная размерность
19.11.03	10		0,53
26.11.03	60		0,49
26.11.03	30		0,46
03.12.03	20	после смены воды	0,47
10.12.03	10		0,49
16.12.03	20	после кормления	0,56

активности (то есть математическую обработку изображений) в режиме реального времени;

выявление наилучших с точки зрения последующей обработки изображений условий съемки (фон, освещение и т. п.);

подбор аппаратуры (компьютер, веб-камера), обеспечивающей приемлемое качество видеозахвата и математической обработки и обладающей при этом минимальной стоимостью;

подбор и разработка программного обеспечения для осуществления видеозахвата и математической обработки; оптимизация характеристик программно-аппаратного комплекса;

выявление оптимальных алгоритмов обработки сигналов, фрактального анализа и других видов анализа временных рядов двигательной активности;

получены значения фрактальной размерности временных рядов двигательной активности рыб в нормальном состоянии, т. е. в отсутствие электромагнитного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Balagula, Y.** The use of fractal analysis for quantifying the dynamic arc characteristics [Текст] / Y. Balagula, N. Korovkin, M. Sakulin, H. Renner // Сб. науч. докл. V междунар. симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (ЭМС).— 2003 / СПбГЭТУ.— 16–19 сентября 2003.— Санкт-Петербург— СПб., 2003.— С. 39–42.

2. **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы [Текст] / Б. Мандельброт.— М.: Институт компьютерных исследований, 2002.— 656 с.

3. **Кроновер, Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории [Текст] / Р.М. Кроновер.— М.: Постмаркет, 2000.— 352 с.

УДК 502.211: 582: 330.101.541

А.А. Филимонов

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ БОТАНИЧЕСКИХ САДОВ

Глобальная сеть ботанических садов в настоящее время развивается беспрецедентными темпами, однако в разных странах и регионах этот процесс протекает неодинаково [45]. Так, в частности, обращает на себя внимание преимущественная концентрация данных учреждений в областях с относительно низким видовым разнообразием растительности. Указанный феномен принято объяснять следствием исторических процессов, суть которых все еще остается предметом дискуссий [27, 29, 37, 40].

Вместе с тем опубликованы результаты исследований, свидетельствующие о возможной взаимосвязи числа ботанических садов и состава их коллекций с различными демографическими и макроэкономическими показателями [3, 23, 32].

С учетом изложенного интересно оценить зависимость между общим количеством ботанических садов и уровнем индикаторов, характеризующих состояние экономики, а также сохранность лесных массивов и видового состава флоры в различных странах мира.

Материалы и методы

В процессе написания статьи мы использовали информацию, размещенную на сайтах Международного совета ботанических садов по охране растений (Botanic Gardens Conservation International, BGCI), ООН, ЦРУ, Мирового банка и др. При этом установление количества существующих на данный момент ботанических садов было сопряжено с рядом трудностей.

Прежде всего они связаны с отсутствием единства в вопросе о том, что представляет собой ботанический сад [35]. Несмотря на длительные дискуссии и обилие предлагавшихся формулировок, эта проблема до сих пор не утратила своей актуальности [46].

Кроме того, проведенный нами анализ выявил наличие повторов и существенную гетерогенность контента базы GardenSearch (сайт BGCI) — наиболее авторитетного источника сведений о зарегистрированных ботанических коллекциях. Например, в разделе, посвященном Украине, дендропарк «Тростянец» упоминался дважды. Еще две записи представляли собой аннотации изданий, опубликованных ботаническими садами этого государства. Однако больше всего «инородных» объектов содержалось в разделе, относящемся к США. Наряду с мемориальными и иными парками, здесь встречаются зоологические сады, аквариумы, кладбища, фермы, фонды и пр.

В силу указанных причин исследователи, обратившиеся к базе GardenSearch, вынуждены производить предварительную сортировку объектов [32, 43].

Нами также была составлена выборка учреждений, в названии которых присутствуют словосочетания «ботанический сад», «дендрологический парк», «дендрологический сад», «арборетум» либо содержится название рода растений, коллекция которых отвечает признакам, удовлетворяющим наиболее часто цитируемому определению [45][1]. Такие объекты в рамках этой статьи мы будем называть «ботаническими садами» (БС).

Полученные данные сводили в рабочие таблицы MS Excel, после чего с применением стандартных встроенных функций программы производили расчет коэффициентов корреляции по Пирсону. С помощью специализированного online калькулятора вычисляли коэффициент ранговой корреляции по Спирмену [16].

Результаты и их обсуждение

Ботанические сады распределены по географическим регионам крайне неравномерно[2]:

Географический регион и его состав	*Число БС*
Африка:	124
в т.ч.	
Восточная Африка	45
Средняя Африка	9
Северная Африка	17
Южная Африка	23
Западная Африка	30
Америки:	683
в т.ч.	
Латинская Америка и Карибы	38
Центральная Америка	101
Южная Америка	143
Северная Америка	401
Азия:	414
в т.ч.	
Центральная Азия	24
Восточная Азия	211
Южная Азия	106
Юго-Восточная Азия	34
Западная Азия	39
Европа:	753
в т.ч.	
Восточная Европа	250
Северная Европа	112
Южная Европа	164
Западная Европа	227
Океания:	101
в т.ч.	
Австралия и Новая Зеландия	96
Меланезия	4
Микронезия	0
Полинезия	1
Всего	2075

Максимальное число БС насчитывается в Европе, тогда как в США их больше, чем в Африке, Азии и Океании вместе взятых. Менее всего таких учреждений создано в Океании, причем разительные диспропорции наблюдаются и внутри самого региона. Ранее аналогичную тенденцию отмечали и разработчики Международной программы ботанических садов по охране растений [5].

Поскольку именно в тропической климатической зоне, а также вблизи от экватора преобладают наименее развитые страны мира [34, 44], наличие связи числа БС и состояния экономики той или иной страны (территории) представляется весьма вероятным. В пользу этого предположения могут свидетельствовать результаты проведенного нами корреляционного анализа.

Однако прежде, чем перейти к их обсуждению, напомним, что отражает тот или иной индикатор, применяемый в подобных исследованиях.

К числу важнейших макроэкономических показателей в соответствии с классификацией [47] мы будем относить:

экономический потенциал страны;

[1] Ботаническими садами являются организации, имеющие документированные коллекции живых растений, использующие их для научных исследований, сохранения биоразнообразия, демонстрации и образовательных целей.

[2] Число БС приводится по состоянию на ноябрь 2011 г.

экономическую мощь страны;

уровень экономического развития страны.

В отличие от потенциально возможного объема производства (экономический потенциал), экономическая мощь отражает реально создаваемую в стране совокупность материальных благ. Ключевыми показателями экономической мощи служат объем производимого ВВП[3], а также национальный доход (НД) страны. О возможности страны влиять на мировые процессы принято судить по объему производства материальных благ (ВВП и НД) в расчете на душу населения (уровень экономического развития).

Данные, представленные в таблице, позволяют заключить, что между переменными «БС» и «ВВП» существует сильная позитивная корреляция ($r = 0{,}92$; $D = 84{,}4$ %). Логично предположить, что мощная экономика обеспечивает благоприятные условия для создания БС. Однако и здесь далеко не все однозначно. С одной стороны, страны-лидеры по уровню ВВП демонстрируют наибольшее — по сравнению с остальными — количество БС на своей территории. С другой, — одинаковое число БС (например, восемь) имели государства, существенно отличающиеся значениями ВВП (Словакия, Финляндия, Греция и Швеция — соответственно 89,034; 238,801; 304,865 и 458,004 млн долл. США).

Столь же высокие, как и в случае ВВП, значения коэффициента корреляции по Пирсону наблюдались в парах «Публикации в научных и технических журналах — БС» ($r = 0{,}92$; $D = 84{,}8$ %), «Университеты — БС» ($r = 0{,}90$; $D = 80{,}7$ %) и «Дорожная сеть — БС» ($r = 0{,}90$; $D = 80{,}2$ %). Соответствующие им величины коэффициента корреляции по Спирмену располагались в диапазоне от 0,73 до 0,79 (см. табл.). Подобное «единодушие» в поведении весьма разнородных показателей может свидетельствовать о том, что переменные прямо не связаны между собой, а варьируют сходным образом под влиянием какого-либо неучтенного фактора [15].

Нельзя, впрочем, полностью исключить существование причинно-следственной связи между, с одной стороны, числом БС и, с другой — числом университетов, а также публикаций в научно-технических журналах. Действительно, БС зачастую входят в структуру университетов, которые и обеспечивают подготовку научных кадров (в том числе ботаников и экологов), а в развивающихся странах выполняют основной объем фундаментальных и прикладных исследований [28].

В свою очередь, чем мощнее экономика страны, тем более обширную сеть образовательных и научных учреждений (и, соответственно, число специалистов) она в состоянии финансировать. Косвенное тому подтверждение — разительные диспропорции в количестве публикаций, принадлежащих специалистам из государств с разным уровнем экономического развития [36].

Сложнее объяснить возможное влияние протяженности дорожной сети на формирование БС. Если, однако, учесть, что «дороги существуют ради своих конечных пунктов» [22], а большинство обсуждаемых учреждений традиционно располагается в городской черте либо в непосредственной близости от населенных пунктов, картина несколько проясняется. Вместе с тем о важной роли транспортных артерий в развитии экономики писал еще Адам Смит [19], а соответствующие примеры приводил Фернан Бродель [2]

Ситуация заметно менялась при переходе от показателей мощности экономики к уровню экономического развития: для сочетания «ВВП (на душу населения) — БС» корреляционная связь оказалась слабой: $r = 0{,}16$; $D = 2{,}4$ % (см. табл.). Аналогичная картина наблюдалась и в случае другой производной от ВВП величины — индекса человеческого развития, ИЧР[4] ($r = 0{,}27$; $D = 7{,}5$ %). Если учесть, что в мире насчитывается 63 государства и территории, не имеющих БС, причем два из них (Лихтенштейн и Катар) демонстрируют наиболее высокие значения ВВП на душу населения, такой результат можно считать вполне ожидаемым.

[3] ВВП (валовый внутренний продукт) — рыночная стоимость всех конечных товаров и услуг, произведенных за год во всех отраслях экономики на территории государства для потребления, экспорта и накопления, вне зависимости от национальной принадлежности использованных факторов производства [33].

[4] ИЧР — индекс человеческого развития (или ИРЧП — индекс развития человеческого потенциала) — интегральный показатель, рассчитываемый периодически для межстранового сравнения и измерения бедности, грамотности, образованности и долголетия как основных явлений, определяющих человеческий потенциал исследуемой территории [10].

Корреляционный анализ глобальной сети БС

Анализируемые переменные	*r*	*D*	*K*	*n*
ВВП — БС[a]	0,92	84,4	0,73	189
ВВП (на душу насел.) — БС[a]	0,16	2,4	0,26	188
ИЧР — БС[b]	0,27	7,5	0,43	183
Население (город.) — БС[c]	0,65	41,7	0,66	190
Население (сельск.) — БС[c]	0,35	12,5	0,43	190
Население общее[c]	0,50	24,5	0.63	217
Плотность населения-БС[c]	−0,03	0,09	0,061**	217
Университеты — БС[d]	0,90	80,7	0,74	193
Площадь лесов — БС[e]	0,53	28,4	0,48	194
Территория гос-ва — БС[a]	0,66	43,0	0,44	217
Число видов исчез. раст. — БС[e]	0,15	2,3	0,24	202
Дорожная сеть — БС[e]	0,90	80,2	0,73	209
Публикации в научных и технических журналах (2007) — БС[e]	0,92	84,8	0,79	188
Число видов сосудистых растений — БС[e]	0,28	7,8	0,32*	60

Примечания: * Корреляция статистически значима по уровню 0,05.

** Корреляция не является статистически значимой.

r — коэффициент корреляции по Пирсону; *n* — число пар значений; *K* — коэффициент корреляции по Спирмену; *D* — коэффициент детерминации, отражающий долю (в %) изменений, обусловленных влиянием одной переменной на другую.

Источники данных: *a* — [9]; *b* — [10]; *c* — [12]; *d* — [13;14]; *e* — [11].

Ранее зависимость между числом ботанических садов и индексом человеческого развития анализировалась в работе [38]. Авторы заключили, что «Количество ботанических садов в каждой стране положительно коррелирует с ИРЧП для большинства стран лишь с несколькими исключениями» (с. 128). Заметим, однако, что соответствующий график, представленный в цитируемой статье, носил явно выраженный нелинейный характер, и, что особенно важно, на долю стран—исключений приходилось 54 % общемирового числа БС.

Учитывая, что в случаях нелинейной зависимости вычисления коэффициента корреляции по Пирсону дают некорректные результаты [4], нами для всех анализируемых переменных был дополнительно произведен расчет коэффициента корреляции по Спирмену (см. табл. 1). Последний «в равной мере характеризует степень сопряженности между признаками как в случаях прямолинейной, так и в случаях криволинейной корреляции» [4, с. 201].

В результате для пар переменных «ВВП (на душу населения) — БС», а также «ИЧР — БС» получены несколько более высокие (по сравнению с показателем *r*) значения коэффициента ранговой корреляции *K* (соответственно 0,26 и 0,43). Тем не менее, говорить о сколько-нибудь существенной взаимосвязи между этими переменными не приходится.

Одно из возможных объяснений отмеченного феномена — сложный характер причинно-следственных связей, обусловленный воздействием нескольких факторов на изучаемый признак. Например, по данным Голдинг с соавторами [32], видовое разнообразие коллекций ботанических садов варьировало под совместным влиянием уровня ВВП на душу населения и численности городского населения соответствующей страны.

В свою очередь, численность населения нередко рассматривается в ряду важнейших факторов экономического развития [17]. Наши расчеты показали, что значение коэффициента корреляции по Пирсону в паре «Население (город.) — БС» существенно превышало таковое для пары «Население (сельск.) — БС»; промежуточный уровень отмечен для общей численности

населения (соответственно $r = 0,65$; 0,35 и 0,50). При этом значения коэффициентов корреляции по Пирсону и по Спирмену для сочетания «Население (город.) — БС» различались весьма незначительно, в остальных случаях второй демонстрировал несколько более высокие значения по сравнению с первым.

По данным [3] в экономически развитых и динамично развивающихся странах численный рост городского населения на протяжении нескольких столетий сопровождался увеличением количества ботанических садов. По-видимому, чем более многочисленно городское население, тем выше спрос (в том числе — платежеспособный) на услуги данных учреждений. С учетом этого обстоятельства положительная взаимосвязь величины коллекций ботанических садов и численности населения городов, на территории которых последние располагаются [32], представляется вполне вероятной.

Интересно, что видовое богатство растительности на территории графств США возрастало по мере увеличения численности и плотности местного населения, причем независимо от наличия или отсутствия там университетов и ботанических садов [42].

Наши расчеты, вопреки предположению о возможной взаимосвязи между числом БС и плотностью населения в промышленно развитых странах зоны умеренного климата [1], свидетельствуют об обратном (см. табл.). Причина, возможно, кроется в специфике данного индикатора, не отражающего флуктуации плотности расселения людей. Достаточно вспомнить, что почти 93 % населения Российской Федерации проживает в так называемой «главной полосе расселения» (площадь порядка 1/3 территории), где сосредоточены все крупнейшие (свыше 500 тыс. чел.) города страны, а также большинство ботанических садов.

Косвенное тому подтверждение — промежуточные значения обоих коэффициентов корреляции между числом БС и территорией государства (r = 0,66 и K = 0,44), а также площадью лесов и числом БС ($r = 0,53$; $K = 0,48$). В обоих случаях наличие «главной полосы расселения», когда население преимущественно концентрируется в одних районах, а в других еще сохраняются значительные лесные массивы, могло сыграть свою роль.

Парадоксальная, на первый взгляд, картина наблюдалась для пар признаков «Число видов сосудистых растений — БС» и «Число видов исчезающих сосудистых растений — БС»: здесь коэффициенты корреляции по Пирсону и Спирмену имели весьма низкие значения (см.табл.). По-видимому, существующие БС просто не оказывают сколько-нибудь ощутимого влияния на процесс исчезновения растительных видов либо не ставят основной целью воспроизведение в коллекциях представителей флоры своей страны.

Обобщая результаты проведенного нами исследования, можно заключить, что число БС:

крайне слабо связано с показателями, отражающими уровень экономического развития, видовое разнообразие флоры соответствующей страны, а также процессы исчезновения видов растений;

обнаруживает промежуточные значения коэффициентов корреляции при сопоставлении с территориями и населением стран мира, а также площадью сохранившихся лесных массивов;

демонстрирует высокую позитивную корреляцию с индикаторами, характеризующими мощность экономики, развитие дорожной сети, а также научной и образовательной инфраструктуры государств.

Тем не менее делать вывод о том, что наблюдаемое распределение БС между современными государствами обусловлено исключительно состоянием их экономики, было бы преждевременно.

Во-первых, необходимо помнить, что до сих пор функционирует ряд ботанических садов, созданных в период, когда многие европейские страны на карте мира просто отсутствовали. Действительно, еще в XIX веке «немецкая нация была разделена на 15 государств; Италия — не только разделена, но частично подчинена Австрийской империи; ...Польша была поделена между Австрией, Пруссией и Россией; Балканы входили в Османскую империю; Норвегия состояла в навязанной ей унии со Швецией, которая испытывала мощное влияние Дании; ...Великобритания была союзом четырех исторических областей» [7, с. 617].

Затем начиная с 1900 года распались Австро-Венгерская, Османская, Российская, Британская, Французская империи; после Второй мировой войны — Германия (воссоединенная впоследствии вновь) и СССР [20, 21]. Если в 1815 году насчитывалось 35, то в 1998 году —

уже 154 государства [39]. Как следствие этого, многие из существующих ныне государств значительную часть своих БС просто получили «в наследство» от исчезнувших исторических гигантов.

Во-вторых, все больше исследователей разделяет мнение о том, что ВВП, ИЧР и другие социо-экономические индикаторы, используемые при межстрановых сравнениях, не свободны от серьезных «врожденных пороков» [30] и, возможно, формируют искаженную картину состояния экономики [31].

В-третьих, положительная корреляция, выявленная с применением того или иного математического «инструментария», еще не доказывает наличия причинно-следственной связи анализируемых переменных и совсем ничего не говорит о возможном ее характере, как, например, в случае обратной зависимости между длиной текста конституций и подушевым уровнем ВВП ряда государств [41].

В-четвертых, в силу специфики источников фактического материала, специалисты зачастую вынуждены производить предварительный «искусственный отбор» данных, что в свою очередь способно влиять на результаты последующих расчетов. В частности, сведения о российских университетах, приводимые международными и отечественными источниками, различаются практически в 3 раза [24]. Вероятная причина — в том, что статистические сводки нередко указывают общее число высших учебных заведений без подразделения их на университеты, институты и академии. Особенности контента, представленного в базе GardenSearch, мы отмечали выше.

Описываемую ситуацию, наряду с терминологией, усугубляет политика. В частности, публикуемые в аргентинских источниках данные об основной площади страны отличаются (в большую сторону) от общепринятых на 11 тыс. км^2. Именно столько составляет площадь Мальвинских (Фолклендских) островов — территории, вызвавшей военный конфликт между Аргентиной и Великобританией [6].

Таким образом, достижение неких «пороговых» значений тех или иных социо-экономических индикаторов, на наш взгляд, само по себе еще не ведет к автоматическому появлению БС. Иллюстрацией может служить Китай: по уровню ВВП он в настоящее время уступает только США, тогда как до «опиумных войн» доля его в мировой экономике была еще более значимой [18]. Тем не менее, первые ботанические сады появились в Китае лишь в 1929 и 1934 годах. В ходе последовавших боевых действий оба сада были разрушены и восстановление их началось после провозглашения Китайской народной республики и учреждения в 1949 году Академии наук КНР [26].

Мы полагаем, что созданию БС предшествуют осознание потребности в повышении престижа (личного либо государственного) и/или оформившиеся запросы со стороны образования (науки). «В определении выбора, который делает народ в отношении своего окружения, культура важнее разума и даже материальной потребности» [22, с. 261]. Как следствие этого, время и способы создания БС в разных странах могут существенно варьировать в зависимости от их географического положения, культурно-исторического «фона», в том числе от мощности экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Астров, А.В.** Ботанические сады Центральной Европы [Текст] / А.В. Астров.— М.: Наука, 1976.— 120 с.

2. **Бродель, Ф.** Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV–XVIII вв. Т. 3. Время мира [Текст] / Фернан Бродель; Пер. с фр. Л.Е. Куббеля.— 2-е изд.— М.: Изд-во «Весь Мир», 2007.— 752 с.

3. **Кузеванов, В.Я.** Ботанические сады как экологические ресурсы в глобальной системе социальных координат [Текст] / В.Я. Кузеванов, С.В. Сизых, Е.В. Губий // Экономические и экологические проблемы в меняющемся мире: Коллективная монография.— СПб.: Изд-во НПК «Рост», 2010.— С. 158–167.

4. **Лакин, Г.Ф.** Биометрия [Текст] / Г.Ф. Лакин.— М.: Высшая школа, 1968.— 284 с.

5. Международная программа ботанических садов по охране растений. Международный совет ботанических садов по охране растений [Текст] / Botanic Gardens Conservation International.— М., 2000.— 58 с.

6. **Наумов, А.В.** 2010. Размер территории как фактор развития крупнейших стран Латинской Америки [Текст] / А.В. Наумов // Сб. докл.: Страны-гиганты: проблемы территориальной стабильности / Под ред. И.М. Бусыгиной, Л.В. Смирнягина, М.Г. Филиппова.— М.: Изд-во МГИМО — Университет, 2010.— С. 206–216.

7. **Осборн, Р.** Цивилизация. Новая история Западного мира [Текст] / Роджер Осборн / Пер. с англ. М. Колопотина. — М.: АСТ МОСКВА: ХРАНИТЕЛЬ, 2008. — 764 с.

8. [Электрон. ресурс].— http://www.bgci.org/garden_search.php / Официальный сайт Botanic gardens conservation international

9. [Электрон. ресурс].— https://www.cia.gov/library/publications/the-world- factbook/rankorder/2004rank.html / Официальный сайт ЦРУ — CIA Factbook

10. [Электрон. ресурс].— http://hdr.undp.org/en/statistics / Официальный сайт ООН Human Development Report

11. [Электрон. ресурс].— http://data.worldbank.org/indicator / Официальный сайт Мирового банка

12. [Электрон. ресурс].— http://esa.un.org/unup // Официальный сайт ООН World Urbanization Prospects

13. [Электрон. ресурс].— http://univ.cc/world.php / Сайт Universities Worldwide

14. [Электрон. ресурс].— http://univ.cc/states.php / Сайт Universities Worldwide — United States Listing

15. **Плохинский, Н.А.** Биометрия [Текст] / Н.А. Плохинский.— Изд-е 2-е.— М.: Изд-во Московского университета, 1970.— 367 с.

16. Расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена [Электрон. ресурс].— http://spearman.ru/ru/correlation_analysis/spearman_rank_correlation_coefficient/calc

17. **Саймон, Д.** Неисчерпаемый ресурс [Текст] / Д. Саймон.— Челябинск: Социум, 2009.— 797 с.

18. **Самбурова, Е.Н.** Китай — страна-«супергигант»: проблемы и преимущества [Текст] / Е.Н. Самбурова // Сб. докл. : Страны-гиганты: проблемы территориальной стабильности / Под ред. И.М. Бусыгиной, Л.В. Смирнягина, М.Г. Филиппова.— М.: МГИМО — Университет, 2010.— С. 145–158.

19. **Смит, А.** Исследование о природе и причинах богатства народов [Текст] / А. Смит. М.: Эксмо, 2007.— 960 с.

20. **Трейвиш, А.И.** Россия среди стран-гигантов [Текст] / А.И. Трейвиш // Вопросы государственного и муниципального управления.— 2007. Т. 1, № 1.— С. 141–158.

21. **Трейвиш, А.И.** Что такое государства-гиганты и как с ними «бороться»? [Текст] / А.И. Трейвиш // Сб. докл.: Страны-гиганты: проблемы территориальной стабильности / Под ред. И.М. Бусыгиной, Л.В. Смирнягина, М.Г. Филиппова.— М.: МГИМО — Университет, 2010.— С. 24–50.

22. **Фернандес-Арместо, Ф.** Цивилизация [Текст] / Фелипе Фернандес-Арместо / Пер. с англ. Д. Арсеньева, О. Колесникова. — М.: АСТ МОСКВА, 2009.— 764 с.

23. **Филимонов, А.А.** Взаимосвязь социо-экономических показателей и развития ботанических садов в странах мира [Текст] / А.А. Филимонов // В сб.: Дендрология в начале XXI века. Матер. Междунар. научных чтений памяти Э.Л. Вольфа.— 6–7 октября 2010 года / Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010.— С. 217–219.

24. **Филимонов, А.А.** Филимонов А.А. Развитие экономики и проблема безопасности биологических ресурсов стран БРИК [Текст] / А.А. Филимонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование».— 2010, № 3 (106).— С. 170–181.

25. **Щелин, П.В.** Центральная Азия и регион Тихого океана как векторы геополитической стратегии Китая [Текст] / П.В. Щелин // Страны-гиганты: проблемы территориальной стабильности: Сб. докл. / Под ред. И.М. Бусыгиной, Л.В. Смирнягина, М.Г. Филиппова.— М.: МГИМО — Университет, 2010.— С. 159–179.

26. **Юй Дэ-цзюнь.** Ботанические сады Китая [Текст] / Дэ-цзюнь Юй // Бюллетень ГБС РАН.— 1960. Вып. 36.— С. 10–18.

27. **Adams, J.M.** Patterns in tree species richness as a test of the glacial extinction hypothesis [Текст] / J.M. Adams, F.I. Woodward // Nature.— 1989. Vol. 339.— P. 699–701.

28. **Altbach.** Higher Education, Democracy and Development: Implications for Newly Industrialized Countries [Текст] / Altbach // Interchange.— 1992. Vol. 23/1&2.— P. 143–163.

29. **Barthlott, W.** Biodiversity and botanic gardens [Текст] / W. Barthlott, G. Rauer, P.L. Ibisch [et all.] / / Bundesamt fьr Naturschutz.— Bonn (ed.) Botanic Gardens and Biodiversity / Mьnster: Landwirtschaftsverlag, 1999.— P.1–24.

30. **Constanza, R.** Toward Ecological Economy [Текст] / R. Constanza // Chinese Journal of Population, Resources and Environment.— 2007. Vol. 5. № 4.— P. 20–25.

31. **Dasgupta, P.** Nature«s role in sustaining economic development [Текст] / P. Dasgupta // Phil. Trans. R. Soc. B.— 2010. Vol. 365.— P. 5–11.— doi:10.1098/rstb.2009.0231.

32. **Golding, J.** Species-richness patterns of the living collections of the world's botanic gardens: a matter of socio-economics? [Текст] / Golding J., S. Gьsewell, H. Kreft, [et all.] // Annals of Botany.— 2010.— Vol. 105(5).— P. 689–696.— doi:10.1093/aob/mcq043.

33.Gross domestic product (GDP) [Текст] / In Encyclopedia Britannica.— Retrieved April 14, 2010.—

from Encyclopedia Britannica Online: [Электрон. ресурс] // http://www.britannica.com/EBchec-ked/topic/246647/gross-domestic-product

34. **Hall, R.E.** Why do some countries produce so much more output per worker than others? [Текст] / R.E. Hall, C.L. Jones // Quarterly Journal of Economics.— 1999.— Vol. 114 (1).— P. 83–116.— [Электрон. ресурс] / http://www.springerlink.com/content/5hw61284552h1672/fulltext.pdf

35. **Heywood, V.H.** The changing rфle of the botanic gardens [Текст] / V.H. Heywood // Bramwell, David [et al.] (eds). Botanic Gardens and the World Conservation Strategy.— London: Academic Press, 1987.— P. 3–18.

36. **Holmgren, M.** Science on the Rise in Developing Countries [Текст] / M. Holmgren, S.A. Schnitzer // PLoS Biology.— 2004. Vol. 2. Issue 1.— P. 0010–0013.— [Электрон. ресурс] // http://biology.plosjournals.org

37. **Huntley, B.** Species-richeness in north-temperate zone forests [Текст] / B. Huntley // J. Biogeogr.— 1993. Vol. 20.— P. 163–180.

38. **Kuzevanov, V.** Botanic Gardens Resources: Tangible and Intangible Aspects of Linking Biodiversity and Human Well-Being [Текст] / V. Kuzevanov, S. Syzikh // Hiroshima Peace Science.— 2006.— Vol. 28.— P. 113–134.

39. **Lake, D.A.** The Incredible Shrinking State [Текст] / D.A. Lake, A. O«Mahony // Journal of Conflict Resolution.— 2004. Vol. 48. № 5.— P. 699–722.

40. **Maunder, M.** 2001.The effectiveness of botanic garden collections in supporting plant conservation: a European case study [Текст] / M. Maunder, S. Higgens, A. Culham // Biodiv. Conserv. Vol. 10.— P. 383–401.

41. **Montenegro, A.A.** Constitutional Design and Economic Performance [Текст] / A.A. Montenegro // Constitutional Political Economy.— 1995. № 6 (2).— P. 161–169.

42. **Pautasso, M.** The Botanist effect revisited: Plant Species Richeness, County Area, and Human Population Size in the United States [Текст] / M. Pautasso, M.L. McKinney // Conservation Biology.— 2007. Vol. 21, № 5.— P. 1333–1340.

43. **Pautasso, M.** Are the living collections of the world«s botanical gardens following species-richness patterns observed in natural ecosystems? [Текст] / M. Pautasso, I. Parmentier // Bot. Helv.— 2007. Vol. 117.— P. 15–28.

44. **Sachs, J.** Tropical Underdevelopment [Текст] / J. Sachs // NBER Working.— Paper No. 8119 / NBER, Cambridge, MA.

45. **Wyse Jackson, P.S.** Experimentation on a Large Scale — An Analysis of the Holdings and Resources of Botanic Gardens [Текст] / W. P. Jackson // Bot. Gard. Cons. News / Richmond, UK: Botanic Gardens Conservation International.— 1999. Vol. 3, № 3. P. 53–72. [Электронный ресурс // http://www.bgci.org/resources/article/0080]

46. **Wyse Jackson, P.S.** Growing an international movement for plant conservation and plant resource management: the development of the international botanic garden community [Текст] / P.S. Wyse Jackson // Buletin Kebun Raya Indonesia.— 2009. Vol. 12, № 2.— P. 41–48.

47. [Электрон. ресурс] // http://ru.wikipedia.org/wiki

УДК 574.91(075)

В.Н. Уманец

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖКХ: ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Подготовку данной статьи предопределили необходимость и актуальность конкретизации научных и практических задач геоэкологических исследований в строительной отрасли, которые связаны с новыми подходами к отраслевой классификации геоэкологии как науки и научной специальности, утвержденной приказом Минобрнауки России № 294 от 11 августа 2009 г. Геоэкология в строительстве и ЖКХ ранее практически нигде не упоминалась. В основном выполнялись исследования по геоэкологии в области наук о Земле, разработки полезных ископаемых, геологии, нефтегазового дела, географии ландшафтов, утилизации и захоронения промышленных и бытовых отходов. Поэтому новый паспорт этой научной специальности

и первый опыт проведения защит научно-квалификационных работ выявил много вопросов, которые требуют дополнительного осмысливания и выделения собственной ниши в направлении исследований, в отличие от смежных специальностей, например такой, как «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства».

В работе [1] при участии автора проведен анализ геоэкологических проблем на примере города Санкт-Петербурга, позволивший построить обобщенную схему взаимовлияния природных и антропогенных факторов, ведущего к возникновению геоэкологических проблем в строительстве и ЖКХ.

Одна из главных задач геоэкологии — оценка взаимовлияния природных и антропогенных факторов на геосферы Земли как среды обитания человека, в первую очередь — на литосферу. Исходя из специфики городской среды и строительной деятельности человека выделим среди ресурсной функции литосферы роль минеральных ресурсов как сырья для строительной индустрии и ресурсов поверхностных и подземных вод, используемых для жилищно-коммунального комплекса. Геодинамическая составляющая экологической функции литосферы определяет влияние ее динамики вследствие природных и антропогенных геологических процессов и явлений на условия жизнеобитания и дискомфортность проживания человечества. Влияние геофизических и геохимических полей литосферы природного и техногенного происхождения и их аномалий на состояние здоровья человека определяет геофизико-геохимическую, или медико-санитарную, составляющую экологической функции.

В этой связи целесообразно детализировать вопросы геоэкологических исследований в отрасли строительства и ЖКХ.

Антропогенная деятельность в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства, представленная промышленным, транспортным, жилищно-гражданским, гидротехническим и гидромелиоративным строительством, а также обращением с коммунально-бытовыми отходами, оказывает существенное влияние на экологические функции геосфер.

Воздействие на гидросферу вызывает истощение запасов поверхностных и подземных вод, изменение их качества, термическое загрязнение и обмеление водоемов, часто возникают возбужденная сейсмическая активность в районах возведения водохранилищ, истощение биологической продуктивности водоемов, происходят антропогенные изменения рек. Снижение этих негативных воздействий — задача геоэкологии. Но в то же время существует научная специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», в паспорте которой также присутствуют задачи решения некоторых из перечисленных проблем.

Воздействие на атмосферу вызывает ее загрязнение пылью, химическими элементами и соединениями (возникновение аэрозолей, смога и кислотных дождей, парниковый эффект). Антропогенное воздействие на геологическую среду обусловливает техногенное разрушение (дезинтеграция) пород; перемещение дезинтегрированного материала; накопление и создание новых горных пород, активизацию естественных геологических процессов, создание антропогенного рельефа и антропогенных (в т. ч. селитебных) ландшафтов; изъятие и загрязнение земель свалками строительных и коммунальных отходов. Часть этих геоэкологических проблем рассматривает и специальность 06.01.02 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель».

Такое взаимопроникновение отдельных научных исследований по геоэкологии в области исследований других смежных наук подтверждает комплексный, даже синтетический характер этой науки и действительно отводит ей роль междисциплинарного научного направления. В то же время сравнительная молодость геоэкологии как науки (чуть более трех десятилетий) еще не позволила большинству ученых перейти на формулировку значительного числа решаемых задач в терминах геоэкологии. Это в первую очередь относится к проведению геоэкологических исследований в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства, где они традиционно называются инженерно-геологическими или инженерно-экологическими исследованиями и изысканиями [2]. Поэтому главная задача геоэкологических исследований в строительстве, во-первых, дать оценку отмеченных выше негативных антропогенных изменений экологических функций геосфер Земли, обусловленных каждым конкретным действием строителей и коммунальщиков, а во-вторых, разра-

ботать меры по предотвращению или ликвидации таких негативных воздействий.

Весьма интересна история становления и развития геоэкологических исследований, которые изначально носили инженерно-геологическую и геохимическую направленность.

В 1972 году был издан ряд карт ландшафтно-геохимического районирования СССР для целей прогноза влияния техногенеза. В 1979 году подготовлена к изданию карта ландшафтно-геохимического районирования нечерноземной зоны.

С 1964-го по 1988 год под методическим руководством и при участии ВСЕГИНГЕО была составлена серия гидрогеологических карт европейской части территории СССР масштаба 1:1500000, в которую входили две карты геоэкологического содержания: техногенных изменений гидросферы; защищенности и загрязнения подземных вод. Кроме того, геоэкологические параметры отражались и на карте гидрогеолого-мелиоративного районирования. Наибольший интерес представляли карты изменений геологической среды с выделением ее типов по строению четвертичного покрова и подстилающих древних пород. Основным объектом картирования были природно-техногенные системы, выделенные с учетом типов геологической среды и видов техногенных систем.

Первые отечественные публикации геоэкологического содержания, освещающие результаты применения методов прикладной геохимии для исследования процессов загрязнения окружающей среды горнорудных предприятий токсичными элементами, появились в начале 80-х. С этого времени целенаправленную разработку научно-методических основ эколого-геохимического картирования начинают МГУ, Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) и другие организации.

До начала 90-х годов отсутствовал единый методологический подход к геоэкологическому картированию. Лишь в 1990 году ИМГРЭ, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) и Дальневосточный научно-исследовательский институт минерального сырья (ДВИМС, г. Хабаровск) разработали концепцию многоцелевого геохимического картирования территории СССР масштабов 1:1000000, 1:200000 и 1:50000, включающего также эколого-геохимическое картирование. В начале 90-х годов предполагалось, что геоэкологические работы должны осуществляться по единой государственной программе, координирующей и интегрирующей мониторинговые исследования по всем природным средам. В 1991 году такая геоэкологическая программа была разработана ВСЕГИНГЕО для всей территории СНГ и отдельно для Российской Федерации. Помимо геоэкологических программ общегосударственного значения, ранее разработаны и частично осуществлялись программы «Чернобыль», «Арал», «Арктика», «Сибирь» и др.

По мнению профессора М.К. Бахтеева (1997, 2001), геоэкологические исследования должны выявлять следующие ареалы и зоны:

загрязнения верхней части геологического разреза (почвы, донные отложения рек и водоемов, шельфовые зоны внутренних и окраинных морей, подземные воды хозяйственно-питьевого назначения и минерально-лечебные воды);

истощения запасов подземных вод (подтопление территорий городов, сельскохозяйственных земель, заболачивание, засоление и переосушение почв);

активизации экзогенных геологических процессов (оползни, сели, карстовые провалы, эрозия почв и другие формы изменения поверхности земли);

активизации эндогенных геодинамических процессов и геокриологических деформационных процессов (пучение, термокарст, солифлюкция и др.);

техногенного нарушения геофизических полей (электрические, магнитные, гравитационные, сейсмические, тепловые, радиационные).

Общая схема геоэкологических работ и картографирования, последовательность их проведения обычно включает четыре этапа.

На *первом этапе* выполняют рекогносцировочные мелкомасштабные работы для определения регионального геохимического фона, оценки его отличий от глобальных геохимических параметров, выявления рудогенных или антропогенных аномалий в регионе или отдельных его частях. Цель этапа — перспективное планирование природоохранной деятельности на крупных территориях различного хозяйственного освоения, ранжирование площадей по степени

экологической опасности, выявление площадей, пострадавших от воздействия мощных источников загрязнения.

На первом этапе определяют региональные геохимические фоны, выделяют крупные зоны (техногеохимические аномальные области или зоны размером 10^4–10^5 км^2) с различной степенью воздействия техногенных процессов, с разной тенденцией в развитии экологической опасности, намечают районы первоочередных работ более крупного масштаба.

На *втором этапе* среднемасштабных (1:200000–1:100000) геоэкологических работ выделяют природные и антропогенные геохимические аномалии (районы или узлы размером 10^2–10^4 км^2) в местах расположения крупных объектов хозяйственно-бытовой деятельности (промышленные зоны, крупные предприятия, сельскохозяйственные территории и т. д.).

Основной вид работ — картирование загрязнения территорий урбанизированных районов. Предварительно составляют графическую основу для геоэкологического картирования с использованием материалов предшествующих работ. В дальнейшем изучают химический состав почв и почвообразующих пород, донных отложений, пылевых выпадений; в северных районах — снеговой покров; в аридных районах для оценки техногенного загрязнения атмосферы применяют пылевые ловушки.

На *третьем этапе* работ (1:50000 — 1:25000) выявляют очаги загрязнения размером 10–100 км^2 (территории городов, населенных пунктов, рекреационные зоны) и определяют уровень концентраций химических элементов.

Цель работ — определение эколого-геохимической обстановки на участках высокой социальной значимости и заведомо высокой техногенной нагрузки. На этом этапе известны наиболее опасные ингредиенты загрязнения, и предпочтительным является использование количественных анализов на ограниченное число элементов (соединений), особенно по жизнеобеспечивающим средам.

Работы крупного масштаба служат основой размещения пунктов и площадок для проведения *геоэкологического мониторинга*. Разрабатывают конкретные природоохранные рекомендации, определяют круг промышленных объектов, на которых необходимы детальные работы для локализации очагов загрязнения, выявления групп населения повышенного риска.

На *четвертом* этапе (1:10000–1:5000 и крупнее) выявляют техногенно-геохимические ореолы размером менее 2–10 км^2, проводят углубленное изучение причинно-следственных связей в системе «источник загрязнения — окружающая среда, живые организмы» в пределах опасных аномалий.

Работы детального масштаба аналогичны экологической экспертизе — это разработка санитарного паспорта и выявление участков производственного процесса, требующих улучшения экологической обстановки. На этом этапе нужны нестандартные подходы к объектам при общих принципах исследования состава твердых отходов, жидких стоков и атмосферных выбросов с учетом технологических параметров производства.

ВСЕГИНГЕО в 1990–1991 годах были разработаны требования [3, 4] к среднемасштабным геолого-экологическим исследованиям, в которых отмечается, что результаты таких исследований отражают на эколого-геологических картах и схемах, которые имеют рекомендательный характер. К числу таких итоговых карт относятся карта геоэкологических условий и карта оценки геоэкологической опасности.

По данным полевых исследований в камеральный период составляются карты:

концентраций тяжелых металлов, радионуклидов, органических соединений, пестицидов и других веществ, способных отрицательно воздействовать на экостистему и среду обитания человека;

основных площадей загрязнения почв, пород зоны аэрации, подземных и поверхностных вод, участков с превышением фоновых концентраций лимитирующих веществ на ПДК;

содержания загрязняющих веществ в растительном покрове, приземной атмосфере, снежном покрове, возможных участках скоплений радиоактивных элементов (U, Ra, Rn, Th, ^{40}K);

торфяников, карстовых полостей и др.

При геоэкологическом картографировании проводят дешифрирование аэрофото- и космоснимков (АФКС) в сочетании с наземными маршрутными наблюдениями (геологические, геофизические, горно-буровые, геохимические, инженерно-геологические, геокриологические, гидро-

геологические) с обязательным опробованием пораженных и «экологически чистых» участков. Помимо АФКС в пределах городских агломераций и крупных горно-промышленных комплексов эффективно применение ИК-тепловых и радиотепловых снимков. В районах с интенсивным атмосферным переносом загрязняющих веществ проводят аэрозольную съемку.

Указанные методические издания были созданы геологами применительно к задачам мелко-, средне- и крупномасштабных геоэкологических исследований и геоэкологического картирования на значительных по площади территориях; что касается детальных исследований, в частности для задач проектирования и строительства конкретных объектов, то методика их проведения была узаконена только в 1996 году Строительными нормами и правилами (раздел «Инженерно-экологические изыскания») [2]. В последующие годы работы по методическому обеспечению геоэкологических исследований, кроме повторения уже известных положений [5], не проводились.

Возможно, это связано с тем, что методы геоэкологического изучения и исследования антропогенного воздействия на различные геосферы Земли ничем не отличаются от традиционных методов конкретных наук, исторически давно изучающих эти геосферы. Так, антропогенные причины нарушения экологических функций литосферы (геологическая среда) изучаются методами геологических наук (геохимия, инженерная геология, петрография и др.), геохимические и геофизические аномалии — методами геохимии и геофизики, вредное воздействие на поверхностную и подземную гидросферы — методами гидрологии и гидрогеологии, деградация и загрязнение почв — методами инженерной геологии, почвоведения и геохимии и т. д.

Не претендуя на полный охват всех последствий, обусловленных негативным влиянием различных видов строительства на геосферы Земли, в приведенной ниже таблице осуществлена попытка их систематизации и выделения основных видов геоэкологических исследований (испытания, опробование и анализ) с целью оценки этих последствий и дальнейшей разработки инженерных решений по защите экологических функций геосфер.

Таким образом, объем, характер и методика геоэкологических исследований для строительства и коммунального хозяйства должны быть обусловлены природно-климатическими условиями в районе и на площадке строительства, характером возможного влияния намечаемой хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды (геосферы Земли), определяемого по данным ОВОС технологическими процессами строительства и функционирования хозяйственного объекта.

Основные задачи геоэкологических исследований при оценке влияния строительной деятельности на окружающую среду

Тип строительства	Основные последствия негативного влияния на геосферы	Виды исследований, испытаний, опробования и анализов для количественной оценки воздействия и проектирования геоэкозащитных мероприятий
Промышленное (заводы, фабрики и пр.)	Изменение ландшафта, загрязнение почв, атмосферы, поверхностных и подземных вод; различные физические и геохимические воздействия	Газогеохимические исследования; почвенные исследования; опробование почво-грунтов, поверхностных и подземных вод и определение в них комплексов загрязнителей; исследование и оценка радиационной обстановки; оценка физических воздействий (шум, вибрации, электрические и магнитные поля, ионизирующие излучения от природных и техногенных источников); оценка возможности рециклинга строительных отходов

Окончание табл.

Тип строительства	Основные последствия негативного влияния на геосферы	Виды исследований, испытаний, опробования и анализов для количественной оценки воздействия и проектирования геоэкозащитных мероприятий
Транспортное (дороги, мосты, тоннели, портовые сооружения и пр.)	Линейные загрязнения прилегающих почв, вибрация, уплотнение пород, загрязнение грунтовых вод, пород и атмосферы, блуждающие токи, нарушение гидрологического и гидрогеологического режима, загрязнение морских и речных акваторий, влияние на биоту	Оценка физических воздействий (шум, вибрации, электрические и магнитные поля, ионизирующие излучения от природных и техногенных источников); эколого-гидрогеологические исследования (оценка влияния техногенных факторов на изменение гидрогеологических условий); оценка загрязнения атмосферы и влияния на биоту
Жилищно-гражданское (жилые дома, общественные здания)	Техноденудация, техноседиментация, уплотнение грунтов, нарушение гидрогеологического режима и изменение уровня грунтовых вод, изменение температурного режима грунтов и воздуха, загрязнение атмосферы, изменение ветрового режима; тепловое загрязнение, карст, термокарст, суффозия, проседание земной поверхности; электростатическое поле, блуждающие токи	Опробование почво-грунтов, поверхностных и подземных вод и определение в них комплексов загрязнителей; оценка физических воздействий (шум, вибрация, электрические и магнитные поля, ионизирующие излучения от природных и техногенных источников); оценка возможности рециклинга строительных отходов
Гидротехническое (плотины, дамбы, каналы, берегоукрепительные сооружения и устройства, водохранилища)	Техногенное разрушение (дезинтеграция) пород; перемещение дезинтегрированного материала; изменение конфигурации берегов, изменение ландшафта; истощение запасов поверхностных вод, изменение их качества, нарушение гидрлогического и гидрогеологического режимов (осушение, обводнение, затопление)	Эколого-гидрологические исследования, оценка фильтрационных и прочностных свойств оснований и дамб, берегоукрепительных сооружений; оценка степени абразии и эрозии берегов, оценка загрязнения поверхностных и подземных вод
Гидромелиоративное (системы орошения, осушения)	Подтопление и осушение территорий, нарушение гидрологического и гидрогеологического режима, заболачивание территорий, засоление почв, усиление миграции загрязняющих веществ	Эколого-гидрогеологические и гидрологические исследования (оценка влияния техногенных факторов на изменение гидрогеологических и гидрологических условий); оценка загрязнения почв, грунтовых и подземных вод
Эксплуатация ЖКХ (коммунально-бытовые отходы, свалки, поля орошения, канализационная сеть, сточные воды)	Изъятие и загрязнение земель свалками строительных и коммунальных отходов, химическое и биологическое загрязнение почв, грунтовых и подземных вод, загрязнение атмосферы выделяющимися газами	Газогеохимические исследования; почвенные исследования; санитарно-эпидемиологические и медико-биологические исследования; оценка загрязнения грунтовых и подземных вод

В соответствии с этим повторим основные укрупненные научно-практические задачи, сформулированные ранее [1], которые целесообразно решать в области строительной геоэкологии, а именно:

1) изучение изменений литосферы (геологической среды) при активизации природных эндо- и экзогенных процессов в результате строительной деятельности;

2) оценка устойчивости урбанизированных территорий к природным и техногенным воздействиям;

3) обоснование инженерной защиты городских агломераций от антропогенных и активизированных в результате строительных работ природных геологических процессов;

4) обоснование инженерной защиты застраиваемых территорий от опасных катастрофических природных процессов;

5) исследование природных геохимических и геофизических аномалий, геопатогенных зон и их воздействия на здоровье человека и комфортность проживания;

6) определение характера и интенсивности геохимического воздействия на литосферу различными видами строительства и закономерностей техногенной миграции химических элементов;

7) оценка изменения химического состава (качества) поверхностных и подземных вод и их истощения в результате промышленного, транспортного, жилищно-гражданского, гидротехнического и гидромелиоративного строительства и функционирования ЖКХ;

8) оценка защищенности вод от техногенного загрязнения коммунально-бытовыми отходами;

9) обоснование захоронений (изоляции в литосфере) токсичных строительных и коммунальных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров, М.П.** Анализ геоэкологических проблем при строительстве городов на примере Санкт-Петербурга [Текст] / М.П. Федоров, В.Н. Уманец // Научно-техн. ведомости СПбГПУ.— 2010. №2. Т. 2 (100).— С. 196–201.

2. **СНиП 11-02–96.** Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Раздел 8 — Инженерно-экологические изыскания [Текст]. — М., 1996.

3. Требования к геолого-экологическим исследованиям и картографированию [Текст] // В кн.: Временные положения по организации и проведению ГДП-200 / Отв. ред. А.И. Бурде. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1991.

4. Требования к геолого-экологическим исследованиям масштаба 1:50 000-1:25 000 [Текст]. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1990.

5. **Андросова, Н.К.** Геолого-экологические исследования и картографирование (Геоэкологическое картирование) [Текст]: Учеб. пособие / Н.К. Андросова. — М.: Изд-во РУДН, 2000. — 98 с.

УДК 628.336:628.472:504.06

В.И. Масликов, А.Н. Чусов,
Д.В. Молодцов, М.Г. Рыжакова

ЗОНАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИЙ БИОГАЗА НА ПОЛИГОНЕ ТБО ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОТХОДОВ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

Проблема утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) в России продолжает оставаться достаточно острой. Из 50 млн т ТБО, ежегодно образующихся в РФ, более 90 % захоранивается на свалках и полигонах. В настоящее время в России эксплуатируется более 1000 полигонов ТБО, из которых примерно 8 % соответствуют санитарно-гигиеническим и экологическим тре-

бованиям. Значительные масштабы необходимых работ и их высокая стоимость определяет актуальность задачи разработки эффективных и относительно дешевых технологий рекультивации полигонов ТБО.

Обычно мероприятия по рекультивации включают в себя комплекс работ по созданию: защитного изолирующего покрытия тела полигона; системы дегазации (сбор, очистка газовых эмиссий и их использование); системы аэрации захороненных отходов; системы сбора и очистки фильтрата; системы мониторинга состояния окружающей среды.

Конкретные мероприятия выполняются в зависимости от состояния полигона или его участков (в случае крупного полигона).

В качестве примера рассмотрим один из крупных полигонов ТБО, расположенный на территории Санкт-Петербурга, предполагаемый к закрытию в виду исчерпания проектного объема. В последние годы на полигоне ежегодно захоранивается около 2 млн м^3 ТБО и небольшой объем промышленных отходов 3–4 класса опасности. Полигон эксплуатируется с начала 70-х годов прошлого века и является одним из крупнейших в Северо-Западном регионе страны. Площадь, занимаемая полигоном, составляет около 80 га, объем захороненных отходов на данный момент времени превышает 50 млн м^3.

На полигоне имеются участки с различными сроками эксплуатации (рис. 1), отличающиеся количеством захороненных отходов, их морфологическим составом, интенсивностью процессов биоразложения, степенью минерализации свалочных масс и т. д., а следовательно, уровнем и характером воздействия на окружающую среду.

Очевидна необходимость в дифференцированном подходе при выборе технологий рекультивации полигона, обеспечивающих надежную защиту окружающей среды с учетом состояний конкретных участков.

Для оценки состояния полигона ТБО необходимо проведение трудоемких натурных и лабораторных исследований. Предлагается использовать сравнительно простой метод оценки состояния полигона в зависимости от эмиссии биогаза, которая во многом отражает степень разложения отходов на текущий момент времени и может определяться расчетным путем [1].

Для каждого участка полигона был проведен расчет эмиссии биогаза с использованием моде-

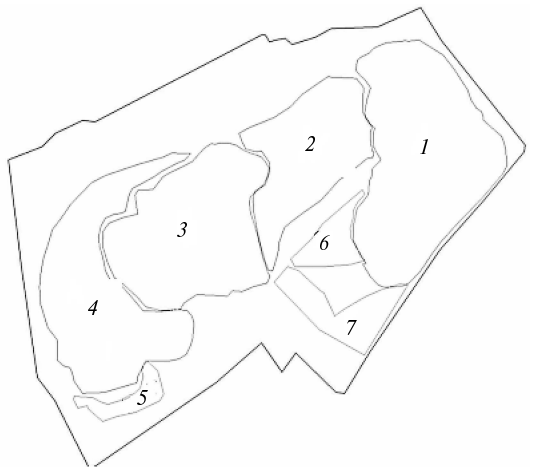


Рис. 1. Схема участков полигона ТБО:
1, *3* — эксплуатируемые участки захоронения отходов; *2*, *4* — участки, сравнительно недавно закрытые для приема отходов; *5*, *6*, *7* — участки, давно закрытые для приема отходов

лей Табасарана — Реттенбергера и LandGEM, применяемых для оценки потенциала биогаза на полигонах ТБО в странах Европы и США. Сопоставление полученных результатов показало, что более низкую оценку эмиссии биогаза дает использование модели Табасарана — Реттенбергера. Если рассматривать возможность в дальнейшем практического использования биогаза, то целесообразно ориентироваться на заниженные оценки, чем обеспечивается надежность принятия решений. [2] На рис. 2 приведены графики эмиссии биогаза на каждом из участков полигона.

Анализ полученных результатов показывает существенную зональность эмиссии биогаза. На эксплуатируемых участках (*1*, *3*) процессы биоразложения находятся в активной фазе, при этом в течение 15–20 лет после их закрытия будет интенсивно выделяться биогаз (от 20 до 7 млн м^3/год), содержащий до 50–60 % метана. На этих участках целесообразно создать систему сбора и использования биогаза. В последующий период примерно в течение 25 лет будет происходить заметное снижение его эмиссии (до 1 млн м^3/год), что делает нецелесообразным использование энергетического потенциала. При этом будет наблюдаться постоянное загрязнение атмосферного воздуха, существовать риск возникновения пожаров, а также возможной миграции свалочного метана в толщу грунтов земельных участков, расположенных в окрестностях полигона.

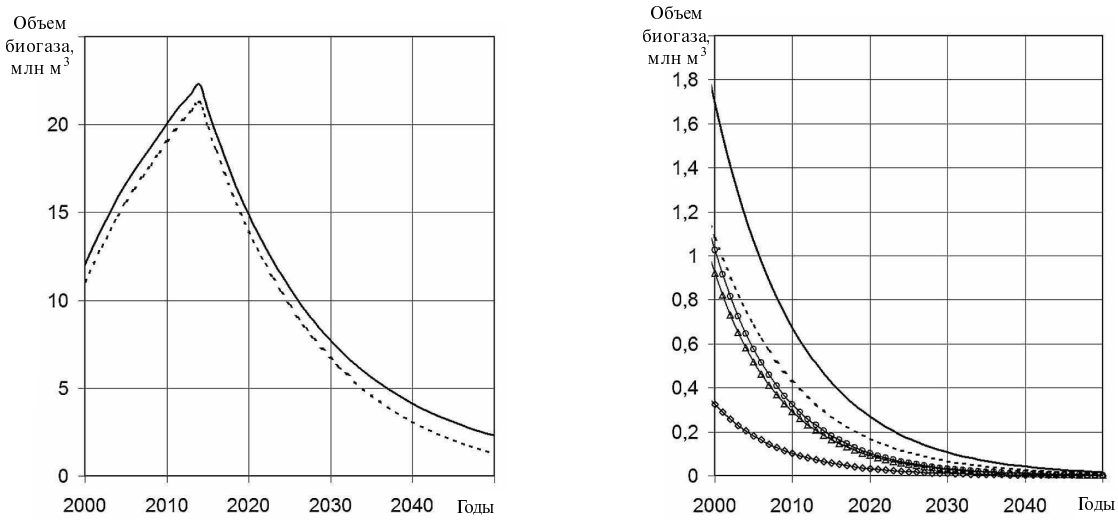


Рис. 2. Эмиссия биогаза на участках полигона ТБО:
а — участки *1* (——) и *3* (- - - -);
б — участки *2* (——), *4* (- - - -), *5* (—◇—), *6* (—○—), *7* (—△—)

На давно закрытых участках захоронения (*5*, *6*, *7*) в течение длительного периода будет наблюдаться остаточная эмиссия биогаза (от 0,2 млн $м^3$/год и менее), пока процессы биохимического разложения отходов не затухнут. Очевидно, на этих участках необходимо ускорить минерализацию отходов.

На сравнительно недавно закрытых участках (*2*, *4*) наблюдается относительно небольшая эмиссия биогаза (менее 0,5 млн $м^3$/год), что делает их неперспективными для использования биогаза. На этих участках целесообразно создать систему пассивной дегазации с отводом биогаза в атмосферный воздух.

Возникает задача зонального управления процессами разложения отходов на полигоне ТБО для более полного использования биогазового потенциала участков с активной эмиссией, а так же перевода в кратчайший срок участков с остаточной эмиссией биогаза в безопасное для окружающей среды инертное состояние. Вопросу интенсификации процессов разложения отходов уделяется большое внимание в развитых зарубежных странах, так как поставлена цель повторного полезного использования на урбанизированных территориях значительных площадей дорогостоящих земель, ранее выделенных под захоронение отходов.

Интенсификацию процессов разложения отходов на полигонах ТБО проводят путем аэрации свалочных масс на участках с остаточной газовой эмиссией и орошения отходов «свежей водой» или очищенным фильтратом на участках с активной эмиссией биогаза [3].

В случае аэрации отходов (рис. 3, *а*) ускорение процессов их биоразложения (по органическому углероду) увеличивается в 6–8 раз, практически прекращается эмиссия метана вследствие его окисления, резко снижается содержание в фильтрате органических веществ. Продолжительность аэрации полигона определяется остаточным содержанием органического углерода и может длиться несколько лет. Недостатком технологии аэрации являются высокие затраты, связанные с подачей воздуха в тело полигона, а также с откачкой и очисткой отходящих газов, при этом в основном будет наблюдаться эмиссия углекислого газа, энергетический потенциал отходов не используется.

При подаче очищенного фильтрата в тело полигона (рис. 3, *б*) процессы биоразложения ускоряются, срок разложения отходов с 80–100 лет может сократиться до 10–15 лет. В этом случае основной объем биогаза выделяется за короткий промежуток времени, что повышает эффективность его использования [4].

С целью определения необходимого объема воздуха для аэрации участков *5*, *6*, *7* с остаточной эмиссией биогаза была использована методика, рассмотренная в работе [5]. Основой для расчетов является предположение, что в случае 25–30-летних захоронений потребность кислорода для

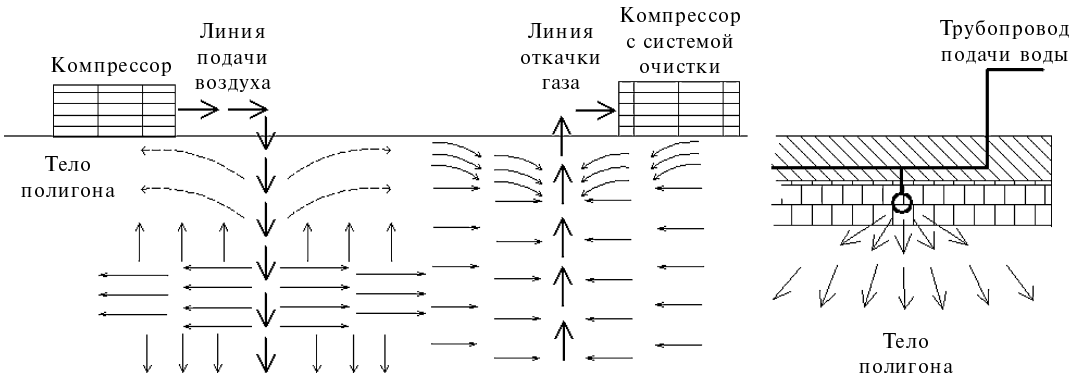


Рис. 3. Схема устройства аэрации полигона ТБО (*а*) и система орошения отходов (*б*)

разложения остаточного органического вещества составит от 10 до 25 мг O_2/г органического углерода. Это соответствует объему воздуха от 30 до 80 м^3, необходимого для разложения 1 т отходов. Аэрация участков будет продолжаться около года.

На участках *1*, *3*, где предполагается сбор биогаза, необходимо создание изолирующего покрытия, предотвращающего его утечку в атмосферу. При этом практически прекратится проникновение осадков в тело полигона, содержание влаги в отходах будет быстро уменьшаться, так как она используется в процессах биохимического разложения, а следовательно, будет сокращаться эмиссия биогаза. При содержании влаги в отходах в пределах 30–50 % ее увеличение на 1 % повышает выход биогаза примерно на 3,5 %. Для поддержания оптимального влажностного режима отходов необходимо обеспечить промывной режим за счет орошения свалочных масс очищенным фильтратом с последующим отводом загрязненных вод [6].

Рекомендуется подача воды в количестве не менее 0,15–0,2 л/м^3 отходов в день, что примерно соответствует естественному поступлению воды с осадками. Для ускорения процесса разложения отходов необходимо примерно в три раза увеличить этот объем воды.

На рис. 4 приведена схема размещения систем дегазации участков полигона ТБО в зависимости от зональной эмиссии биогаза.

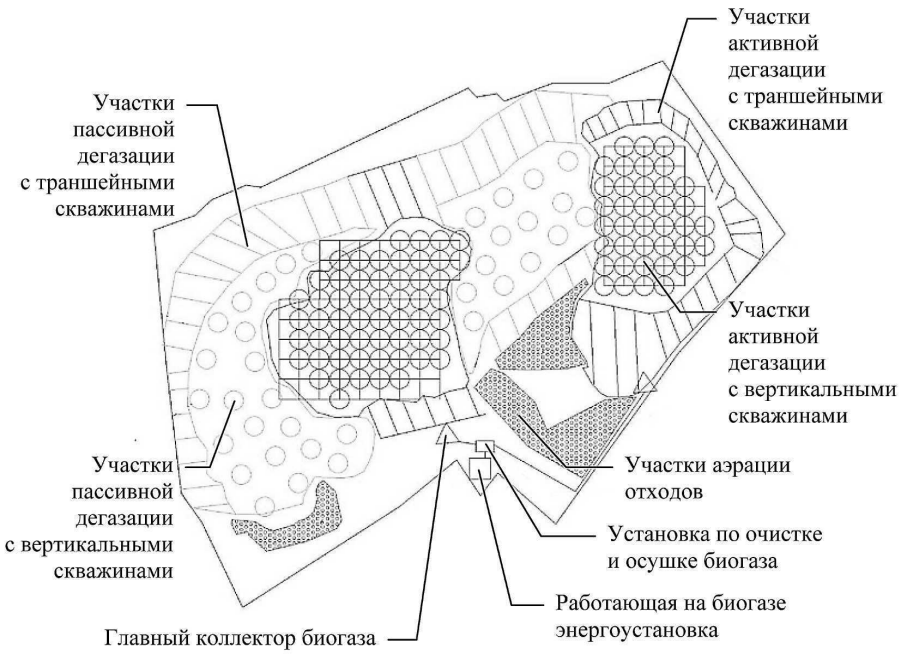


Рис. 4. Схема размещения систем дегазации участков полигона ТБО

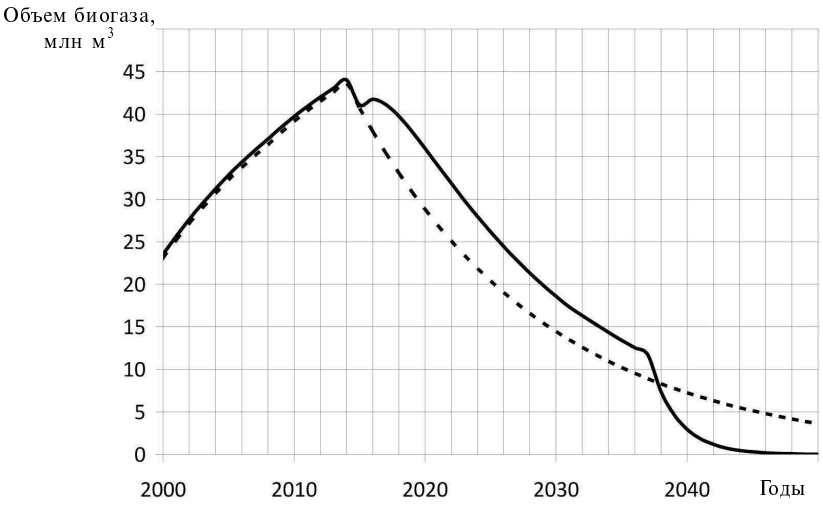


Рис. 5. Эмиссия биогаза на полигоне ТБО (теоретический потенциал)
– – – естественный режим; ——— управляемый режим

На рис. 5 приведен суммарный прогнозный график эмиссии биогаза на эксплуатируемых участках *1* и *3* полигона ТБО для вариантов естественного и управляемого режимов разложения отходов.

В случае реализации управляемого режима (промывка отходов очищенным фильтратом) в период 2016–2036 годов ежегодная эмиссия биогаза в среднем увеличится на 20–25 %, что позволит более полно использовать биогазовый потенциал. После этого эмиссия биогаза практически прекратится, и участки будут переведены в режим аэрации на короткий период с последующим их использованием для хозяйственных нужд.

На рис. 6 приведен прогнозный график технического биогазового потенциала (с учетом возможных потерь) участков *1* и *3*.

Утилизация метана осуществляется в дизельных электростанциях (ДЭС), наиболее подходящих для данного типа энергоносителя. Мощность и количество блоков ДЭС, величина выработки электроэнергии определяются объемом метана, доступным для использования в рассматриваемый период времени. На период 2016–2020 годов возможна эксплуатация шести блоков ДЭС, об-

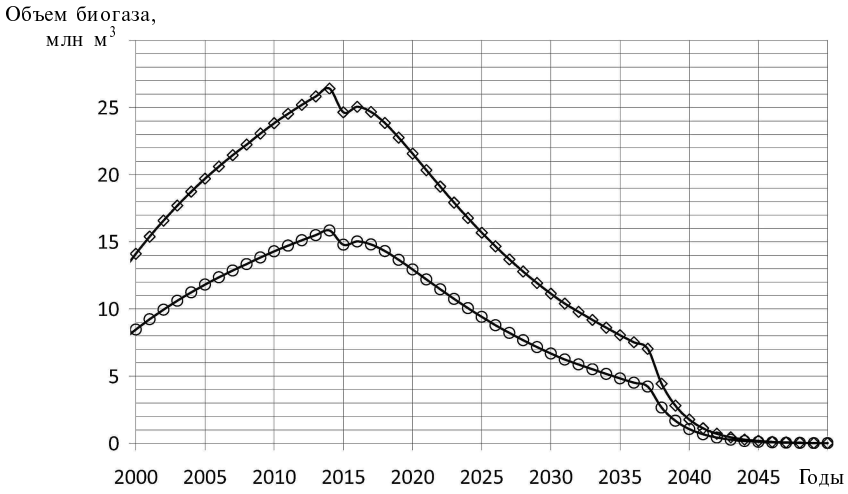


Рис. 6. Технически возможный для использования биогазовый потенциал полигона ТБО (управляемый режим):
—◇— экмиссия биогаза; —○— эмиссия метана

щей мощностью 6 МВт; соответственно в период 2020–2024 годов — 5 блоков общей мощностью 5 МВт; 2024–2028 годы — 4 блоков, общей мощностью 4 МВт; 2028–2032 гг. — 3 блоков общей мощностью 3 МВт; 2032–2037 гг. — 2 блоков общей мощностью 2 МВт; 2037–2040 гг. — 1 блок мощностью 1 МВт. С течением времени часть блоков выводится из эксплуатации с дальнейшим использованием на других полигонах.

В целом суммарное количество электроэнергии за период работы ДЭС (2016–2040 гг.) составит более 700 млн кВт·ч, из которых около 15 % будет использовано на собственные нужды (аэрация участков с остаточной эмиссией, сбор и транспорт биогаза и т. д.)

Энергетическое использование биогаза позволит не только обеспечить собственные нужды, но и получить дополнительный доход от поставок избыточной части электроэнергии для нужд местных потребителей. Возможно также получение дополнительного дохода от продажи квот на сокращение эмиссии парникового газа, что позволит компенсировать существенную долю затрат на рекультивацию полигона.

Реализация режима управляемого полигона позволит ввести в оборот для хозяйственного использования значительные его территории. Целесообразно на период проведения работ по дегазации использовать участки, переведенные в инертное состояние, для производственных нужд (выращивание посадочного материала для городского садово-паркового хозяйства, размещение складов, стоянок для автомобилей развивающейся промышленной зоны и др.). В дальнейшем, после завершения работ по дегазации, возможно и рекреационное использование всей территории полигона.

Таким образом, зональное определение эмиссии биогаза расчетным методом позволяет создать рациональную схему использования участков полигона, а так же обосновать возможный режим управления процессами разложения отходов с целью наиболее полного использования биогазового потенциала, снижения воздействия на окружающую среду.

В выполненных исследованиях активное участие принимала дипломница А.С. Якимова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Федоров, М.П.** Энергетическое использование эмиссий метана на полигоне твердых бытовых отходов Санкт-Петербурга для сокращения парниковых выбросов и привлечения инвестиций в рекультивацию [Текст] / М.П. Федоров, А.В. Зинченко, В.В. Кораблев [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2008. № 6 (70).— С. 135–142.

3. **Hupe, K.** Gezielte Befeuchtung/Bewdsserung von Altdeponien zur Beschleunigung der biologischen Umsetzungsprozesse [Текст] / K. Hupe, K.-U. Heyer, R. Stegmann // In: Deponietechnik.— 2002.— Hamburger Berichte 18 (Hrsg.: R. Stegmann, G. Rettenberger, W. Bidlingmaier, H.-J. Ehrig).— Stuttgart:Verlag Abfall aktuell, 2002.— S. 237–264.

4. **Henken-Mellies, U.** Steigerung der Deponiegasmenge durch Reinfiltration von Sickerwasser— Auswertung von Daten bayerischer Deponien / 19 [Текст] / U. Henken-Mellies, P. Schwab.— Nьrnberger Deponieseminar.— 2008.— S. 117–128.

5. **Rettenberger, G.** Stabilisierung einer Altlast durch Einblasen von Luft am Beispiel der Altablagerung Lorenkamp [Текст] / G. Rettenberger // in: Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft— Deponiegas. (Hrsg.: Rettenberger, Stegmann).— Stuttgart:Verlag Abfall aktuell, 2001.— 12 s.

6. **Rettenberger, G.** Anforderungen an eine sichere Deponie — mцgliche Nachsorgestrategien am Beispiel der Deponie Halle-Lochau [Текст] / G. Rettenberger // Die Zukunft der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung.— Potsdamer Abfalltage, 22–23. Mai 2000— Heft 6.—

УДК 658.382:331.8(075.8)+004.032.26+519.63:517.951

Д.А. Тархов, А.Н. Васильев, Д. И. Идрисова

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Быстрый рост загрязненности окружающей среды создает острую проблему сохранения экологических систем и здоровья человека. Важной задачей науки в настоящее время является прогноз изменения экосистем под влиянием естественных и антропогенных факторов. Назрела необходимость создания иерархической системы экологического мониторинга, включающего локальный уровень, на котором отслеживаются загрязнения атмосферы промышленными выбросами в масштабе предприятия (района), и глобальный — от региона до масштаба всей планеты. Такая система, в частности, позволит отслеживать и фиксировать количество выбросов от предприятий, идентифицировать среди последних наиболее загрязняющие, а также оценивать реальный вклад отдельных источников в загрязнение воздуха.

Локальный уровень поставленной задачи предполагает, что будут рассматриваться несколько промышленных предприятий, выбрасывающих в атмосферу определенное количество вредных аэрозолей в выбранном районе. Пусть в заданном регионе G с полной границей S расположены n промышленных объектов, ежесекундно выбрасывающих Q_i аэрозолей, $i = 1, 2, ..., n$, состав которых будем считать одинаковым. В области G выделим m экологических зон G_k, $k = 1, 2, ..., m$, для которых заданы предельно допустимые концентрации выпадающего за интервал времени $[0,\ T]$ аэрозоля. Тогда математическая постановка задачи [1–3] будет такова:

Дано уравнение диффузии для интенсивности $\varphi(x, y, z, t)$ аэрозольной субстанции от n индустриальных объектов

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathrm{div}(u\varphi) + \sigma\varphi = \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \mu\Delta\varphi + \sum_{i=1}^{n} Q_i \delta_i \quad (1)$$

при условии

$$\varphi = f_s \ \text{ на } \Sigma; \ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \alpha\varphi \ \text{ на } \Sigma_0; \ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \ \text{ на } \Sigma_H.$$

Здесь u — скорость воздушного потока; Δ — оператор Лапласа по переменным (x, y); для цилиндрической области G с полной границей $S = \Sigma \cup \Sigma_0 \cup \Sigma_H$ боковая поверхность цилиндра Σ — граница рассматриваемого региона, Σ_0 — подстилающая поверхность, Σ_H — верхняя граница рассматриваемой области; σ — коэффициент, описывающий скорость распадения (поглощения) аэрозоля; μ и ν — горизонтальный и вертикальный коэффициенты диффузии; $\delta_i(x, y, z; x_i, y_i, z_i)$ — дельтаобразная функция, которая локализована в малой окрестности i-го предприятия (при вычислениях заменяется, например, быстроубывающим гауссианом).

На решениях φ задачи (1) строится функционал

$$Y_k = \int_0^T dt \int_{G_k} P_c \varphi \, dG, \quad (2)$$

который характеризует санитарную дозу аэрозоля, выпавшего в области экологической зоны G_k.

Особенность реальной постановки задачи (1) состоит в том, что входящие в нее параметры не являются константами и известны с некоторой погрешностью. Для многоуровневой системы такие параметры часто определяются решением задачи на другом уровне иерархии. Вычисления при

большом числе наборов параметров требуют нерационально больших затрат вычислительных ресурсов.

В реальных ситуациях наряду с дифференциальными уравнениями и соотношениями, которые описывают в виде формул дополнительную информацию о системе, возможно задание дополнительной неформализуемой информации, например в виде приближенно известных данных наблюдений (измерения φ с помощью датчиков, размещенных в некотором наборе точек G).

Предлагаемый нами подход [4, 5] позволяет объединить разнородную информацию о системе в нейросетевой модели. Данный подход может быть эффективно применен для решения обратных задач и задач, поставленных некорректно или в неклассической постановке. Подобная постановка возникает в случае, когда определяющие моделируемую систему характеристики известны не точно, а заданы значениями, распределенными в некоторых интервалах, или необходимо, например, исследовать поведение решения в зависимости от некоторого параметра, или идентифицировать значение параметра по данным измерений. К таким задачам, в частности, относятся задачи определения Q_i по данным наблюдений. Требуется лишь незначительная естественная модификация подхода, который уже был успешно использован при моделировании процесса тепломассопереноса в гранулах пористого катализатора [5].

Наш подход [4,5] к решению подобной проблемы состоит в следующем.

Пусть в постановку задачи

$$A(u,\mathbf{r}) = g(\mathbf{r});\quad u = u(\mathrm{x},\mathbf{r});\quad \mathrm{x}\in\Omega(\mathbf{r})\subset R^p;$$

$$B(u,\mathbf{r})\Big|_{\Gamma(\mathbf{r})} = f(\mathbf{r}) \qquad (3)$$

(здесь оператор A определяет уравнение, оператор B задает начально-краевые условия) входят параметры $\mathbf{r} = (r_1,\ldots,r_k)$, меняющиеся на некоторых интервалах: $r_i \in (r_i^-; r_i^+), i = 1,\ldots,k$. Ищем приближенное решение задачи (3) в виде выхода искусственной нейронной сети заданной архитектуры

$$u(\mathbf{x},\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{N} c_i h_i(\mathbf{x},\mathbf{r},\mathbf{a}_i), \qquad (4)$$

веса которой — линейно входящие параметры c_i и нелинейно входящие параметры $\mathbf{a}_i$ — определяются в процессе поэтапного обучения сети на основе минимизации функционала ошибки вида

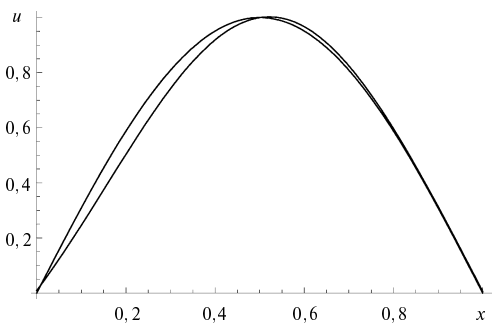


Рис. 1. Восстановление начальных условий

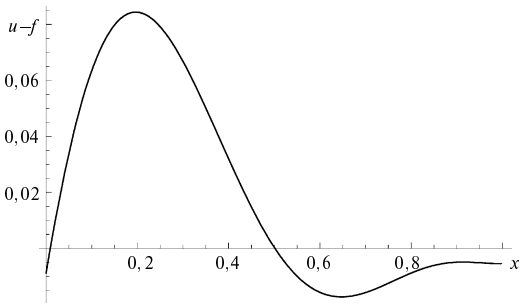


Рис. 2. Ошибка восстановления начальных условий

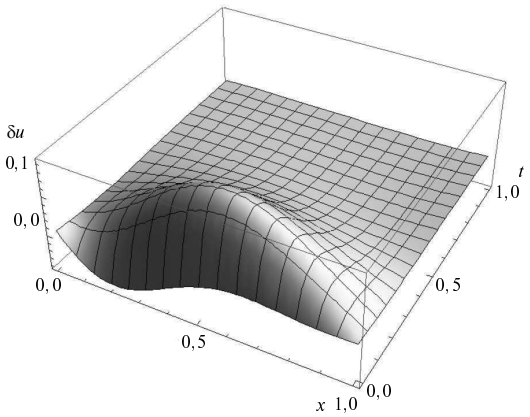


Рис. 3. Ошибка восстановления решения

$$J(u) = \sum_{j=1}^{M}\left|A(u(\mathbf{x}_j,\mathbf{r}_j)) - g(\mathbf{x}_j,\mathbf{r}_j)\right|^2 +$$

$$+\lambda\sum_{j=1}^{M'}\left|B(u(\mathbf{x}'_j,\mathbf{r}'_j)) - f(\mathbf{x}'_j,\mathbf{r}'_j)\right|^2. \qquad (5)$$

Здесь $\{\mathbf{x}_j,\mathbf{r}_j\}_{j=1}^{M}$ — периодически перегенерируемые пробные точки в области $\Omega(\mathbf{r}_j)\times\prod_{i=1}^{k}(r_i^-; r_i^+)$;

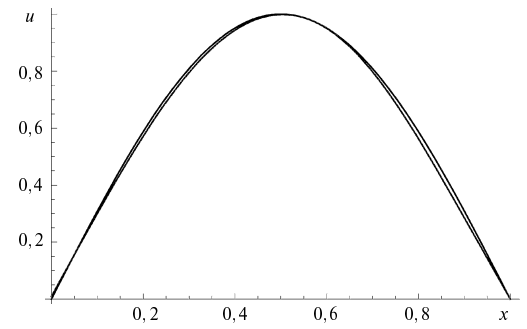


Рис. 4. Восстановление начальных условий

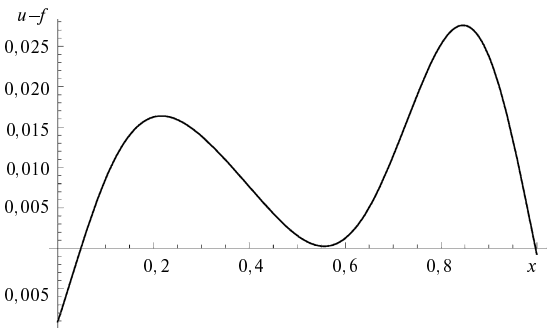


Рис. 5. Ошибка восстановления начальных условий

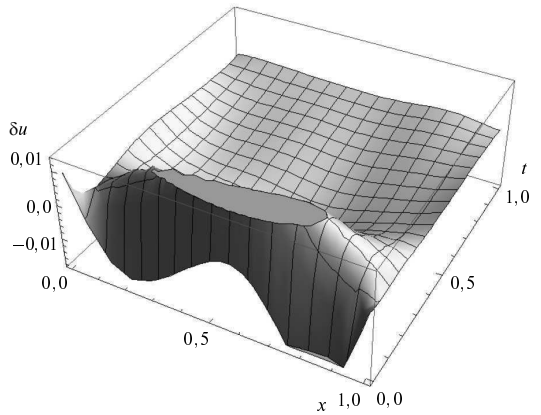


Рис. 6. Ошибка восстановления решения

$\{\mathbf{x}'_j, \mathbf{r}'_j\}_{j=1}^{M'}$ — пробные точки на ее границе $\Gamma(\mathrm{r}'_j)$;

$\lambda > 0$ — штрафной параметр.

Нейронная сеть (4), задающая приближенное решение задачи в этом случае, может включать однотипные нейроэлементы $h_i = h$, порожденные одной и той же активационной функцией (например, гауссиана), но может иметь и более сложную гетерогенную структуру — см. [5].

Предлагаемый подход не приводит к «кризису размерности», позволяет рассматривать случаи неточно заданных коэффициентов, задачи со сложной геометрией, при этом соответствующие алгоритмы допускают естественное распараллеливание.

Вышеописанный подход применим также для решения задач охраны труда в строительстве. Существующие методики оценки условий труда ориентированы, главным образом, на стационарные рабочие места, тогда как в строительной отрасли мобильность рабочих мест, многообразие строительных объектов, а также работа на открытом воздухе затрудняют оценку безопасности рабочих мест [7].

Необходима методика, позволяющая проводить постоянный и непрерывный мониторинг уровней вредных производственных факторов. В частности, такие параметры, как микроклимат на рабочем месте, концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны, химический и биологический факторы, могут быть оценены с использованием системы мониторинга, подобной вышеописанной.

Конкретный перечень вредных веществ, поступающих в воздух рабочей зоны, зависит от вида технологического процесса и конкретного вида оборудования.

Производственная пыль на предприятиях строительной отрасли образуется при производстве земляных, погрузочно-разгрузочных, отделочных работ, при дроблении и сортировке камня, бурении, приготовлении штукатурных растворов из сухих смесей и др.

В строительных отделочных материалах могут содержаться токсичные вещества, такие, как фенол, формальдегид, фосген, пенополиуретан и др.

Ниже приведены вредные вещества, воздействующие на представителей различных профессий строительной отрасли.

Род занятий	*Вредные факторы*
Каменщик	Цементная пыль
Плиточник	Испарения в местах сцепления плитки с бетоном
Плотники	Древесная пыль
Штукатуры	Пыль от штукатурки
Электротехники	Выделение тяжелых металлов при работе паяльника

Маляры	Испарения растворителей, выделения токсичных металлов пигментами и лакокрасочными добавками
Обойщики	Пары клея
Сварщики	Токсические выбросы в ходе сварочных работ
Паяльщики	Выбросы паров металла, свинца, кадмия

Распределение концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны подчиняется уравнению параболического типа, которое в линейном приближении имеет вид уравнения диффузии. Поэтому рассмотренный нейросетевой подход к построению устойчивых математических моделей для интенсивностей аэрозольных субстанций применим и в этих случаях. Особо следует подчеркнуть, что он весьма эффективен при обработке вновь поступающей при мониторинге уточняемой гетерогенной информации (к примеру, наблюдения, поступающие от системы датчиков), часть которой может содержать неформализуемые данные.

При построении приближенных моделей для задач охраны труда и техники безопасности можно столкнуться с ситуацией, когда такие задачи некорректны или плохо поставлены. В этом случае предлагаемый нами нейросетевой подход [4] позволяет проводить регуляризации решений этих задач.

Приведем в качестве примера модельную задачу.

Задача с обращением времени. Постановка: начальное распределение концентрации вредного вещества в момент времени $t = 0$ в воздухе рабочей зоны восстанавливается по ее конечному распределению в момент времени $t = T$, причем конечная концентрация может отличаться от начальной на несколько порядков. Как это обычно делается при построении и исследовании математических моделей, переходим в уравнении и краевых условиях к безразмерным величинам, рассматривая в качестве искомой функции и ее аргументов отношения соответствующих величин к характерным для задачи константам.

Прямая задача. Ищется функция $u(x,t)$, $x \in [0;1], t \in [0;T]$, удовлетворяющая условиям

$$u_t = u_{xx}, (x;t) \in (0;1) \times (0;T);$$

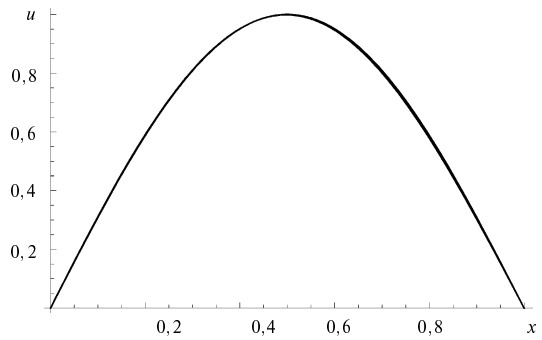


Рис. 7. Восстановление начальных условий

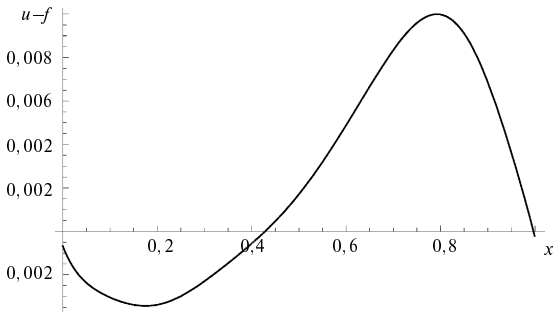


Рис. 8. Ошибка восстановления начальных условий

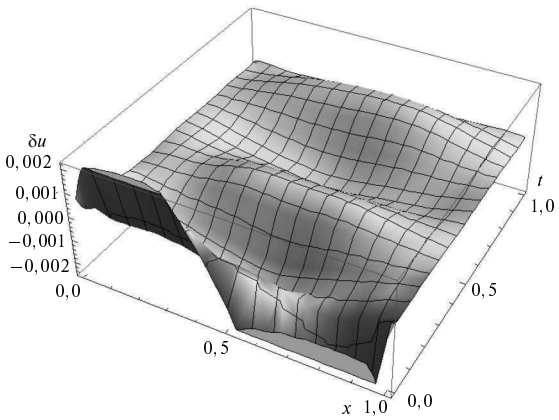


Рис. 9. Ошибка восстановления решения

$$u(x;0) = \varphi(x), x \in (0;1);$$
$$u(0;t) = 0, t \in [0;T];$$
$$u(1;t) = 0, t \in [0;T].$$

Обратная задача:

$$u_t = u_{xx}, (x;t) \in (0;1) \times (0;T);$$
$$u(x;T) = f(x), x \in (0;1);$$
$$u(0;t) = 0, t \in [0;T];$$
$$u(1;t) = 0, t \in [0;T].$$

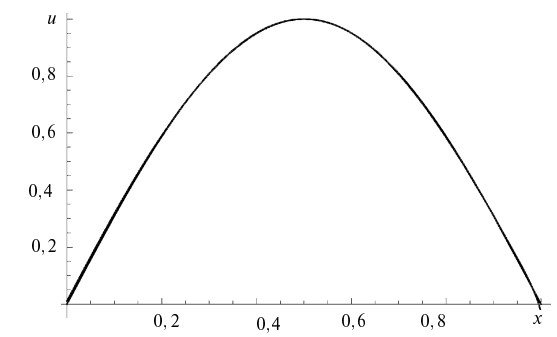


Рис. 10. Восстановление начальных условий

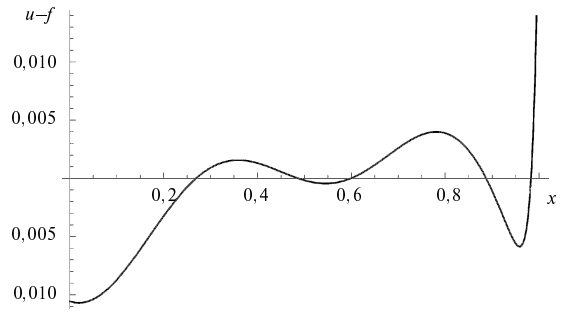


Рис. 11. Ошибка восстановления начальных условий

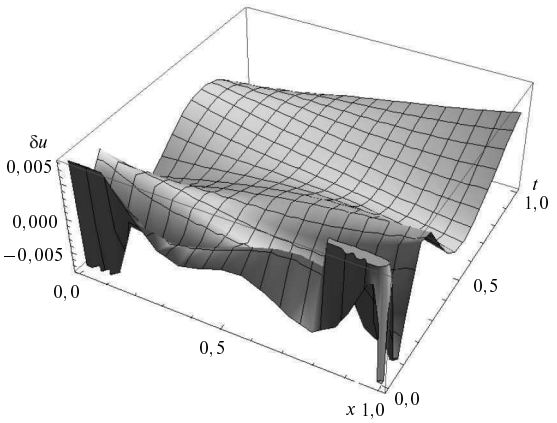


Рис. 12 Ошибка восстановления решения

Функция $\varphi(x) = u(x,0)$ в этой постановке задачи неизвестна и подлежит нахождению.

Возможна следующая эквивалентная модификация постановки: требуется найти $u(x,t)$, в частности $u(x,T)$, как решение задачи

$$u_t = -u_{xx}, (x;t) \in (0;1)\times(0;T);$$

$$u(x;0) = f(x),\ x \in (0;1);$$

$$u(0;t) = 0, t \in [0;T];$$

$$u(1;t) = 0, t \in [0;T].$$

Будем искать решение задачи в виде нейросетевого приближения

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{n_e} c_i e^{-a_i(x-x_i)^2 - b_i(x-x_i)(t-t_i) - d_i(t-t_i)^2}. \quad (6)$$

Здесь веса (параметры) нейросети вводятся следующим образом:

$$w_i = (c_i, a_i, b_i, d_i, x_i, t_i),\ i = 1, \ldots, n_e.$$

Подбор весов осуществлялся через минимизацию функционала ошибки, который в данной задаче имел вид

$$J_1(\mathbf{w}) + \delta_b J_b(\mathbf{w}) + \delta_d J_d(\mathbf{w}),$$

где $\mathbf{w} = (w_1, \ldots, w_{n_e})$ — вектор весов сети;

$$J_1(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^{N} \left\{ u_t(\xi_j, \tau_j) - u_{xx}(\xi_j, \tau_j) \right\}^2$$

– слагаемое, отвечающее дифференциальному уравнению;

$$J_b(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^{N_b} \left\{ u^2(0, \tau_j) + u^2(1, \tau_j) \right\}$$

– слагаемое, отвечающее граничным условиям;

$$J_d(\mathbf{w}) = \sum_{j=1}^{N_d} \left\{ u(x_j, T) - f(x_j) \right\}^2$$

— слагаемое, отвечающее значениям температуры в конечный момент времени;

$\delta_b, \delta_d > 0$ – «штрафные» множители.

Здесь в слагаемых $J_1(\mathbf{w})$ и $J_b(\mathbf{w})$ используются периодически перегенерируемые пробные точки: $\left\{ \left(\xi_j, \tau_j \right) \right\}_{j=1}^{N}$ — в области Ω, $\left\{ \left(0, \tau_j \right), \left(1, \tau_j \right) \right\}_{j=1}^{N_b}$ — на частях границы.

Устойчивого приближения u без привлечения дополнительной информации о решении в такой постановке получить не удается. Приведем результаты двух способов привлечения подобной информации.

Первый способ состоит в замене нескольких слагаемых в $J_d(\mathbf{w})$ слагаемыми, соответствующими начальному условию. Вычислительный эксперимент показал, что достаточно использовать одно значение, т. е. предполагается, что мы знаем начальное условие в одной точке.

Приведем некоторые результаты вычислений для случая $N = 200$, $N_b = 50$, $N_d = 50$. Нейроны добавляются по одному с отбраковкой.

В первом эксперименте число попыток добавить нейрон — 10, число нейронов 11 (отбраковки нет).

Во втором эксперименте число попыток добавить нейрон — 20, число нейронов — 21 (отбраковки нет).

В третьем эксперименте число попыток добавить нейрон — 50, число нейронов — 48 (отбраковано 3 нейрона).

Рис. 1–3 показывают, что уже сеть из 11 нейронов дает приближенное решение задачи с точностью, достаточной для большинства инженерных приложений (обычно в подобных задачах точность модели в виде краевой задачи не выше). Такую сеть можно использовать в качестве аналитического приближенного решения. Если подобная точность недостаточна, ее можно легко повысить, что показывают рис. 4–9. В приведенных численных экспериментах и далее использовался эволюционный алгоритм настройки структуры растущей сети на основе добавления нейронов по одному с дальнейшей отбраковкой этого нейрона. Такой алгоритм позволяет добиться почти линейной зависимости времени обучения сети от числа нейронов, что важно для задач, в которых требуется получить высокую точность.

Второй способ состоит в использовании вместо известной точки в начальном условии одной или нескольких случайных точек внутри области (измерения в промежуточные моменты времени). Ниже использовались 5 таких точек, число попыток добавить нейрон — 1559, число нейронов — 51.

Предложенный метод построения устойчивых нейросетевых моделей весьма эффективен для задач большой размерности, со сложной геометрией, с неточно заданными параметрами, с разнородной обновлямой информацией об объекте или процессе, для плохо поставленных или некорректных задач. Именно такие задачи встречаются при мониторинге, анализе и прогнозе атмосферных загрязнений, обеспечении экологической безопасности и сбережения здоровья людей. Используемые технологии — основа для построения иерархических информационно-аналитических систем поддержки принятия решений в строительстве, в обеспечении безопасных условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марчук, Г.И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г.И. Марчук — М.: Наука, 1982. — 320 с.

2. **Бахвалов Н. С.** Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования [Текст] / Н.С. Бахвалов, В.В. Воеводин — М.: Наука, 2005. — 405 с.

3. **Белов П.Н.** Антропогенное загрязнение природной среды и оценка его уровня методом математического моделирования [Текст] / П.Н. Белов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 1990. № 5. — С.16–24.

4. **Васильев А.Н.** Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов — СПб.: Издательство Политехнического университета, 2009. — 528 с.

5. **Васильев, А.Н.** Нейросетевое решение задачи о пористом катализаторе [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2008. №6 (67). — С. 110–113.

6. **МДС 12-28.2006.** Методическое руководство по проведению экспертной оценки безопасности нестационарных рабочих мест на строительных объектах [Текст]/ Госстрой России. — М., 2007. — 74 с.

7. **СанПиН 2.2.3.1384–03**. Гигиенические требования к организации строительного производства и строительных работ [Текст]/ Минздрав России. — М., 2003. — 42с.

УДК 658.382:331.8(075.8)+004.032.26+519.63:517.951

А.Н. Васильев, Д.А.Тархов,
В.Н. Тарабанов, Д.И. Идрисова

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Климатические условия Крайнего Севера сказываются на особенностях организации и технологии строительного производства, что в свою очередь обусловливает особенности безопасной эксплуатации строительной техники [1].

Строительная техника применяется для производства следующих основных видов работ, связанных с вечномерзлыми грунтами:

вертикальной планировки строительных площадей, заключающейся в срезке верхних слоев грунта или подсыпке их;

рытья траншей под коллекторы санитарно-технических коммуникаций;

рытья котлованов различных сечений под столбчатые фундаменты промышленных зданий и сооружений для установки опор линий электропередачи и связи (применение грузоподъемных машин для удаления мерзлого грунта осуществляется только при значительных объемах котлованов);

бурения скважин в вечномерзлых грунтах под свайные фундаменты зданий;

земляных работ при строительстве магистральных и промысловых трубопроводов;

подготовительных земляных работ при строительстве автомобильных дорог и др. [1–3].

При проведении работ, связанных с вечномерзлыми грунтами рабочие строительной отрасли подвергаются прежде всего воздействию климатического фактора. Следовательно, при производстве вышеперечисленных работ необходимо уделять большое внимание вопросу создания благоприятных микроклиматических условий на рабочих местах операторов строительных машин.

Наиболее важной частью условий работы землеройных машин являются характеристики разрабатываемого грунта. При оценке энергоемкости разработки грунта конкретного вида он рассматривается как среда, на разработку единицы которой затрачивается известное количество энергии [4].

Резкие колебания температуры внутри кабин строительных машин могут быть связаны в числе прочего с тем, что работа системы отопления кабины зависит от энергоемкости разработки мерзлых и вечномерзлых грунтов, которая в свою очередь тесно связана с их температурой. Поэтому возникает потребность прогнозирования изменения температуры грунта в течении года.

В книге [8] опубликованы результаты работ по определению ряда климатических характеристик Западной Сибири с помощью нейросетевого моделирования на основе пакета Essence, созданного под научным руководством Д.А. Тархова, в котором использованы алгоритмы, опубликованные в [6]. Такими характеристиками являются: минимальная температура воздуха $T_{в\ min}$, температура $T_{в\ 1}$ самых холодных суток, температура $T_{в\ 5}$ самой холодной пятидневки и продолжительность периода зимней эксплуатации машин при $T_в \le 5$ °С. В качестве исходной информации использовались данные 149 пунктов метеонаблюдений. Эта информация интерполировалась на весь регион Западной Сибири с помощью персептрона [6].

Исследованы статистические характеристики распределения температур воздуха в пределах определенных месяцев в конкретных местах региона, в том числе: среднее значение температуры M_t (среднемесячная температура воздуха); среднеквадратичное отклонение температуры G_t; коэффициент асимметрии функции распределения A_t.

Часть характеристик ($T_{в\ min}$, $T_{в\ 1}$, $T_{в\ 5}$ и продолжительность периода зимней эксплуатации машин при $T_в \le 5$ °С) используется в расчетной практике непосредственно, и информация о них

может быть получена при использовании соответствующей обученной нейронной сети путем введения в заранее разработанную программу сведений о географических координатах (градусы северной широты и восточной долготы) расположения пункта в пределах Западной Сибири, для которого эти сведения потребовались.

Остальные характеристики в основном несут промежуточную информацию, нуждающуюся в дальнейшем развитии и обобщении.

В частности, при конструировании, расчетах и оценках эффективности систем тепловой подготовки приводов землеройных машин большое значение имеет частота появления низких температур воздуха разного уровня. Для этого путем введения в соответствующую программу сведений о координатах любого пункта на территории Западной Сибири и месяце получают сведения о численных значениях M_t, G_t и A_t для любого месяца года.

Западная Сибирь — огромный регион, условия в котором меняются в широких пределах. В полной мере это касается и характеристик климата, в частности температуры воздуха. По этой причине без ущерба для описания общей картины огромные пространства региона целесообразно представить совокупностью ограниченных территорий, для каждой из которых статистические характеристики условий эксплуатации с достаточной для инженерных приложений точностью можно считать постоянными, в том числе характеристики среднесуточных температур и их годового хода. Под руководством И.О. Вашуркина и Н.Н. Карнаухова [9] на основе пакета Essence создано соответствующее программное обеспечение, позволяющее выделять зоны со сходными температурными характеристиками, например количеством дней со среднесуточной температурой ниже -5 °С. Можно, задавая произвольный диапазон количества суток, производить такое группирование.

Для обеспечения безопасности проведения строительных работ в связи с прогрессивным оттаиванием мерзлых пород, что может обернуться катастрофическими последствиями, необходимо производить постоянный мониторинг температуры грунта на заданной глубине.

Оттаивание льдонасыщенных пород будет сопровождаться просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных (криогенных) геологических процессов (термокарст, термоэрозия, солифлюкция и др.). Возникнет угроза разрушения зданий и инженерных сооружений, возведенных с сохранением мерзлого основания [5].

В первом приближении температура на поверхности и в глубине верхнего слоя грунта за год меняется по периодическому закону, следуя за изменением температуры воздуха. С глубиной амплитуда колебаний температуры уменьшается [4]. Однако к периодической составляющей, вызванной изменением времен года, добавляется случайная компонента, связанная с погодными явлениями, и ее влияние может быть существенным.

Задача определения температуры грунта на заданной глубине

Постановка задачи. Рассматривается задача определения закона изменения температуры грунта на заданной глубине, если известна температура на поверхности. В первом приближении пренебрегаем изменениями распределения температуры по горизонтали и теплообменом с воздухом. Уточнения могут быть внесены без принципиальных изменений в применяемом методе. Также, как и в предыдущей статье, переходим в уравнении и краевых условиях к безразмерным величинам, рассматривая в качестве искомой функции и ее аргументов отношения соответствующих величин к характерным для задачи константам.

Прямая задача. Ищется функция $u(x,t)$, $x \in [0;1], t \in [0;T]$, удовлетворяющая условиям

$$u_t = u_{xx}, (x;t) \in (0;1) \times (0;T);$$

$$u(x;0) = \varphi(x),\ x \in (0;1);$$

$$u_x(0;t) = 0, t \in [0;T];$$

$$u(1;t) = q(t),\ t \in [0;T].$$

Обратная задача:

$$u_t = u_{xx}, (x;t) \in (0;1) \times (0;T);$$

$$u(x;0) = \varphi(x),\ x \in (0;1);$$

$$u_x(0;t) = 0,\ t \in [0;T];$$

$$u(0;t) = f(t),\ t \in [0;T].$$

Функция $q(t)$ в этой постановке неизвестна и подлежит нахождению.

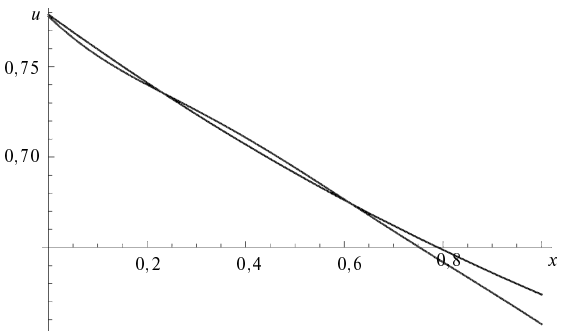


Рис. 1. Восстановление граничного условия

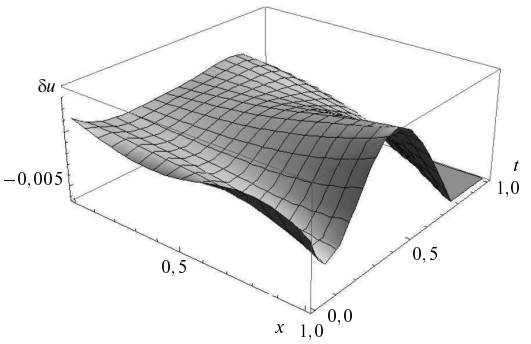


Рис. 2. Ошибка восстановления решения

В качестве модельного решения используется функция

$$R(x,t)=\exp\left(-k^2x^2/\left(t-t_0\right)\right)/\sqrt{t-t_0}. \qquad (1)$$

Приняты следующие параметры $k = 0,5$; $t_0 = -1$.

Будем искать решение задачи в виде нейросетевого приближения.

$$u(x,t)=\sum_{i=1}^{n_e}c_i e^{-a_i(x-x_i)^2-b_i(x-x_i)(t-t_i)-d_i(t-t_i)^2}. \qquad (2)$$

Подбор весов осуществлялся через минимизацию функционала ошибки, который в данной задаче имел вид

$$J_1(\mathbf{w})+\delta_b J_b(\mathbf{w})+\delta_d J_d(\mathbf{w}),$$

где $\mathbf{w}=\left(w_1,\ldots,w_{n_e}\right)$ — вектор весов сети;

$$J_1(\mathbf{w})=\sum_{j=1}^{N}\left\{u_t(\xi_j,\tau_j)-u_{xx}(\xi_j,\tau_j)\right\}^2$$

— слагаемое, отвечающее дифференциальному уравнению;

$$J_b(\mathbf{w})=\sum_{j=1}^{N_b}\left\{u_x^2(0,\tau_j)-u\left(u\left(x_j,0\right)-\varphi\left(x_j\right)\right)^2\right\}$$

— слагаемое, отвечающее граничным и начальным условиям;

$$J_d(\mathbf{w})=\sum_{j=1}^{N_d}\left\{u(0,\tau_j)-f(\tau_j)\right\}^2$$

— слагаемое, отвечающее требуемым граничным условиям; $\delta_b,\delta_d>0$ — «штрафные» множители.

Некоторые результаты вычислений для случая $N = 200$, $N_b = 20$, $N_d = 50$ при ошибке в задании начальных данных от $-0,001$ до $0,001$, числе попыток добавить нейрон 50, числе нейронов 31 приведены на рис. 1, 2

Если так же, как в предыдущей статье, взять точку на правой границе, число попыток добавить нейрон 50 и число нейронов 41, то получим результаты, отраженные на рис. 3 и 4.

Из данных графиков видно, что даже такая незначительная дополнительная информация об искомом решении позволяет существенно повысить точность его определения.

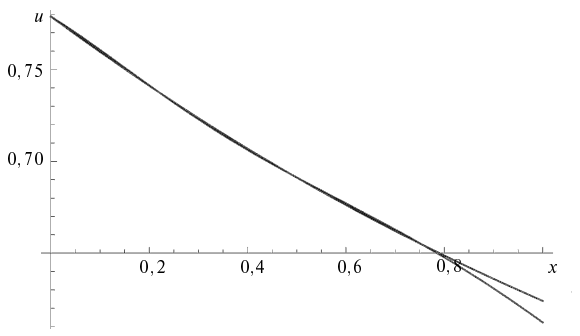


Рис. 3. Восстановление граничного условия

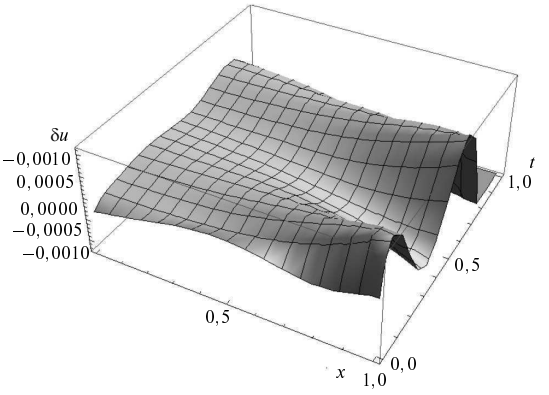


Рис. 4. Ошибка восстановления решения

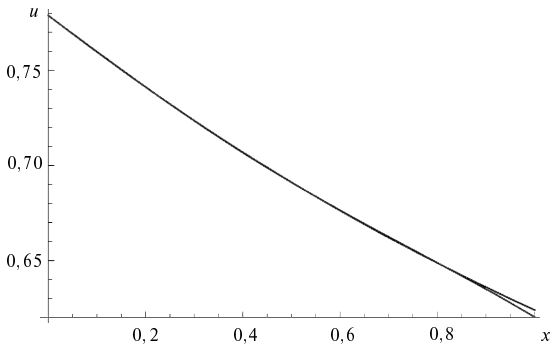


Рис. 5. Восстановление граничного условия

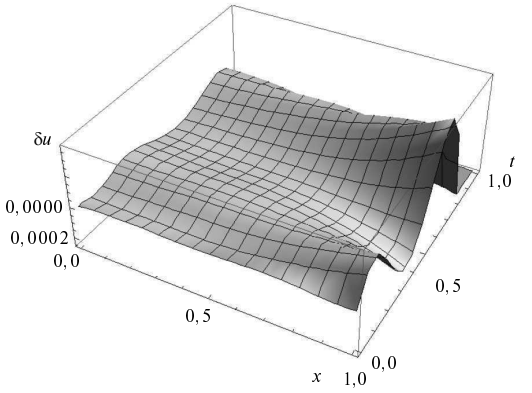


Рис. 6. Ошибка восстановления решения

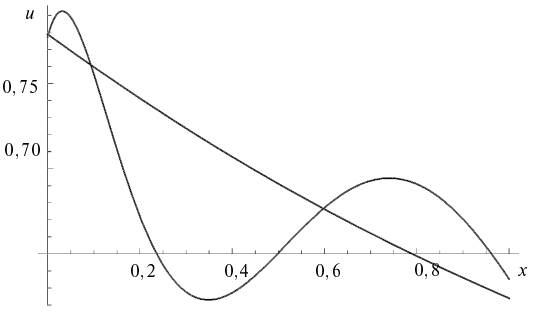


Рис. 7. Восстановление граничного условия

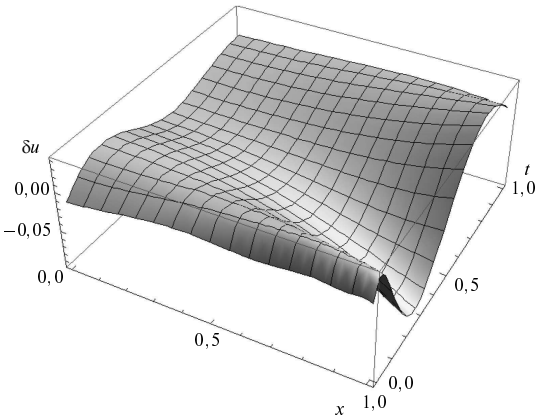


Рис. 8. Ошибка восстановления решения

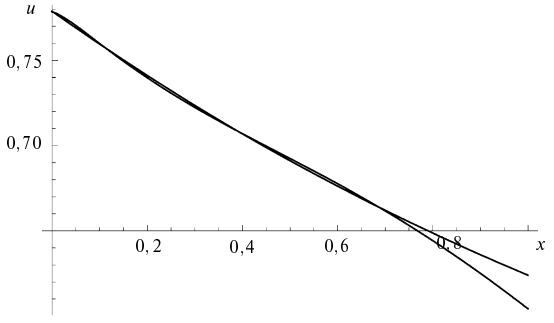


Рис. 9. Восстановление граничного условия

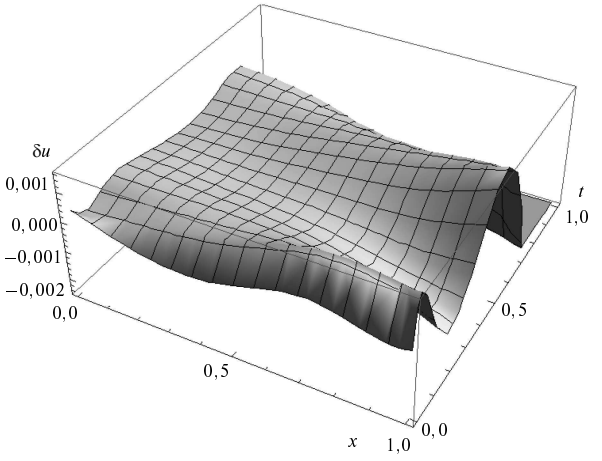


Рис. 10. Ошибка восстановления решения

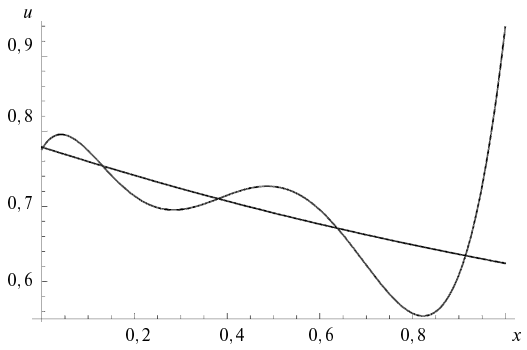


Рис. 11. Восстановление граничного условия

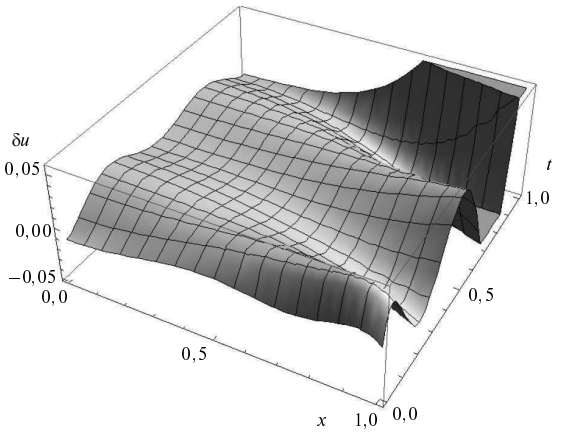


Рис. 12. Ошибка восстановления решения

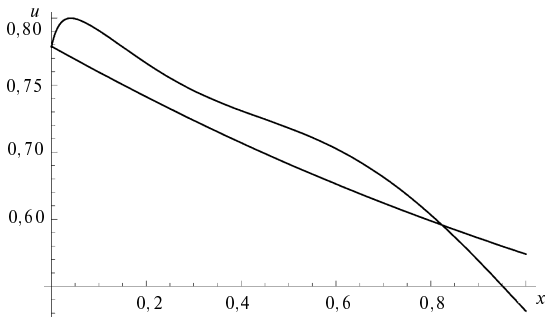


Рис. 13. Восстановление граничного условия

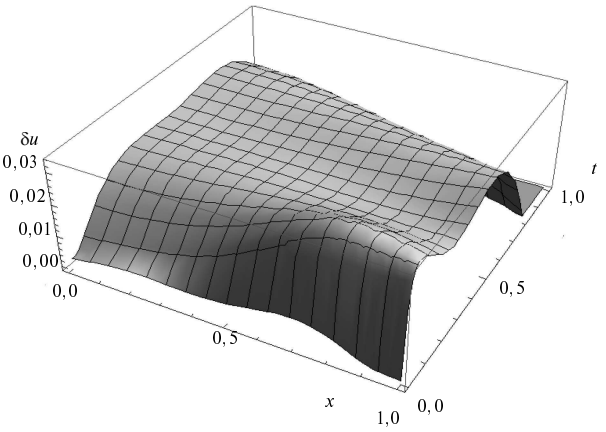


Рис. 14. Ошибка восстановления решения

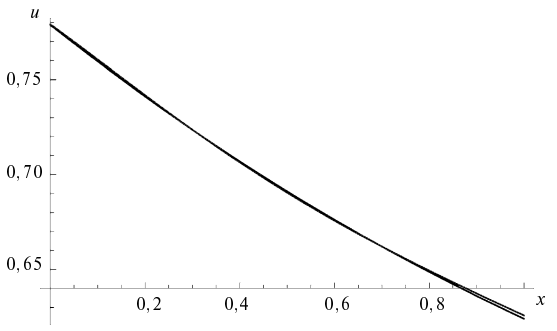


Рис. 15. Восстановление граничного условия

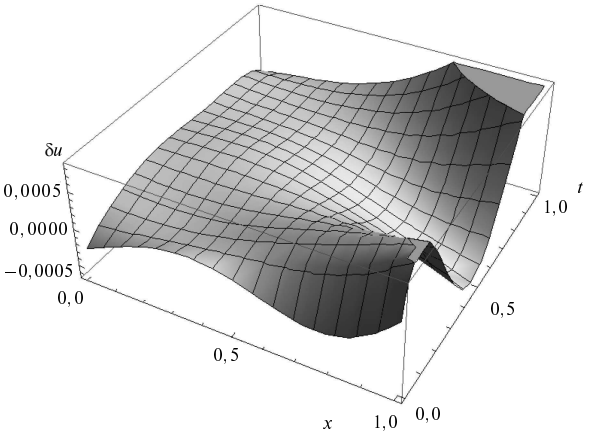


Рис. 16. Ошибка восстановления решения

Если взять три точки на правой границе, то при нулевой ошибке, числе попыток добавить нейрон 50 и числе нейронов 41 получим результаты, показанные на рис. 5 и 6.

Ошибка существенно уменьшилась. Данный результат показывает, что нейронные сети эффективно используют всю имеющуюся информацию.

Если для условий предыдущего варианта требуемую температуру задавать со случайной ошибкой от $-0,1$ до $0,1$, то получаются результаты с ошибкой, которую отражают рис. 7 и 8.

Также, как и в предыдущей статье, вместо точек на границе, на которой ищется решение, можно задать решение в случайных точках внутри области. Пусть задается пять таких точек, причем ошибка нулевая, число попыток добавить нейрон — 50, число нейронов — 37. Тогда получаем результаты, которые приведены на рис. 9, 10.

Величина ошибки примерно соответствует варианту с одной точкой на границе, т. е. менее информативных данных требуется существенно больше.

Если для условий предыдущего варианта взять 10 точек, а требуемую температуру задавать со случайной ошибкой от $-0,1$ до $0,1$, то получаются результаты с ошибкой, которую демонстрируют рис. 11 и 12.

Возможна следующая модификация постановки:

$$u_t = u_{xx}, (x;t) \in (0;1) \times (0;T);$$

$$u(x;0) = \varphi(x),\ x \in (0;1);$$

$$u_x(0;t) = 0, t \in [0;T];$$

$$u(x_0;t) = f(t), t \in [0;T],\ x_0 \in (0;1).$$

Для такой задачи требуемые модификации программы минимальны, а результаты получаются аналогичными рассмотренным. Некоторые результаты вычислений для случая, когда $x_0 = 0,5$, ошибка в задании экспериментальных данных составляет от $-0,1$ до $0,1$, число попыток добавить нейрон — 50, число нейронов — 38, приведены на рис. 13, 14.

Если взять точку на правой границе, ошибку в пределах от $-0,001$ до $0,001$, число попыток добавить нейрон — 50, число нейронов — 22, то получим результаты, приведенные на рис. 15, 16.

Полученные результаты показывают, что нейронные сети являются гибким инструментом, позволяющим учитывать особенности задачи и всю имеющуюся информацию, при этом точность результатов соответствует точности исходной информации, дополнительная информация может быть эффективно использована для уточнения искомого решения.

Изложенный в [6] и данной работе подход рекомендуется применить к созданию системы мониторинга климатических явлений и обеспечения безопасных условий строительных работ на территории Западной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карасёв М.Н.** Охрана труда в строительстве на севере [Текст] / М.Н. Карасев.— Л.: Стройиздат, 1985.— 208 с.

2. **ВСН 013–88** Строительство магистральных и промысловых трубопроводов в условиях вечной мерзлоты [Текст] / Миннефтегазстрой.— М., 1990.— 25 с.

3. **Методические рекомендации** По улучшению условий труда и предупреждению травматизма на строительстве автомобильных дорог в условиях крайнего севера [Текст] / Минтрансстрой.— М., 1982.— 13 с.

4. **Карнаухов, Н.Н.** Приспособление строительных машин к условиям Российского Севера и Сибири [Текст] / Н.Н. Карнаухов М.: Недра, 1994.— 351 с.

5. **Павлов А.В.** Вечная мерзлота и современный климат [Текст] / А. В. Павлов, Г.Ф. Гравис // Природа. География.— 2000. №4.— С. 10–18.

6. **Васильев А.Н.** Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов.— СПб.: Издательство Политехнического университета, 2009.— 528 с.

7. **Васильев А.Н.** Нейросетевое решение задачи о пористом катализаторе [Текст] / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Физико-математические науки.— 2008. №6 (67).— С. 110–113.

8. **Вашуркин И.О., Карнаухов Н.Н.** Условия работы землеройных машин [Текст] / И.О. Вашуркин, Н.Н. Карнаухов— Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2000.— 152 с.

УДК 621.92

Н.В. Никитков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРЕН АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

В литературе [1–4, 7, 8, 11] описаны виды разрушения контактных поверхностей алмазных зерен при резании металлов, стеклопластиков, хрупких материалов: тепловое, графитизация, эвтектоидное оплавление, химическое, окислительное, диффузионное, абразивное, механическое разрушение и др. В конкретных условиях шлифования один вид износа может преобладать над другим. При упругопластическом разрушении поверхности заготовок зерна круга оставляют риски-борозды с гладкими берегами и дном. При квазихрупком и хрупком — дно и берега покрыты выколами, ямками. Ямки заполнены диспергированным материалом, по которому скользят площадки износа зерен с контактным давлением, равным $\sigma_з$ (рис. 1). Плотность теплового потока на контактной поверхности равна $\omega = f\sigma_з V$, где f — коэффициент трения. У алмазов коэффициенты тепло- и температуропроводности равны соответственно $\lambda = 147$, $\alpha = 83 \cdot 10^{-6}$, у керамик — $\lambda = 1–20$ Вт/м·К, $\alpha = (1–10) \cdot 10–6$ м^2/с. Доля b_a тепла, идущего в алмаз, равна 0,52–0,85, а в керамику — $b_k = (1 - b_a)$. При любом давлении $\sigma_з$ и скорости V алмазного круга оплавления керамики по дну борозды не может произойти, так как температура плавления исследуемых заготовок равна 2023–2323 К, а снижение микротвердости поверхности алмаза со 100 до 20 ГПа происходит [2] при 1570 К, эвтектоидное оплавление [9] контактной поверхности — при 1370–1590 К, графитизация алмазной поверхности — при 1320 К [10]. Прежде, вероятно, произойдет образование площадки износа на зернах, нежели оплавление поверхности заготовок. Каждая точка поверхности заготовок, относительно которой со скоростью V перемещается площадка износа, испытывает при шлифовании или доводке локальный нагрев [12, 14]. При установившемся процессе шлифования зерна круга перерезают выступы между рисками-бороздами от предшествующих проходов. В зависимости от глубины внедрения зерна в материал и его относительной скорости длительность непрерывного контакта площадки износа с материалом варьирует от 10^{-5} до 10^{-2} с. На поверхности площадок зерен, имеющих наибольшую глубину внедрения, устанавливается в пределах контакта с одним шероховатым выступом стационарное тепловое состояние [14]. Это состояние прерывается во впадинах борозд и промежутках между заготовками. Качественную картину возникновения высокой температуры на контактных поверхностях зерен наблюдали в следующих опытах. Находясь в темной комнате и чиркая со скоростью $V \approx 1$ м/с алмазным зерном по шлифованным поверхностям заготовок из керамик — титаносодержащей и 22ХС, наблюдали свечение подвижной зоны контакта от красного до белого цвета в зависимости от силы прижима. На свечение не оказывает влияния мокрое или сухое состояние поверхности заготовки. Многократное чирканье по заготовке шириной 60 мм не вызвало образования заметной площадки износа. Видимо, требуется достаточный пройденный путь по поверхности заготовки. При шлифовании керамики 22ХС с хорошей теплопроводностью острым кругом с расходом смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), равным 6 дм^3/мин, при скорости 90 м/с и силе 120–250 Н наблюдали интенсивное свечение зоны контакта круга с заготовками в течении 10–60 с. Затем свечение прекращалось. Этот

момент соответствует зоне $И_н^{II}$ перегиба начального и нормального участков на кривых износа зерен кругов (рис. 1, *в*). Прямое измерение температуры поверхности площадки износа алмазных зерен кругов зернистостью 125/100–40/28 практически невозможно. Однако целесообразно получение зависимости температуры на контактной поверхности алмазных зерен с целью оценки значений давления σ_3 на задней поверхности, приводящих к их изнашиванию.

Анализ литературных источников [6, 7, 11, 13, 14 и др.] показал, что в них отсутствуют математические модели для вычисления износа вершин алмазных зерен в кругах при шлифовании твердых хрупких материалов, пригодные для определения критических, вызывающих интенсивный износ вершин алмазных зерен давлений и плотностей теплового потока на площадках контакта этих зерен с заготовкой.

Стационарная температура алмазных зерен, аппроксимированных эквивалентными цилиндрами радиусом ρ_0, боковая поверхность которых охлаждается потоком СОЖ — воды с температурой 373,15 K, а торцовая поверхность, контактирует с заготовкой, получена при следующих граничных условиях:

$T|_{r\ 0}$ — ограничена;

$$\frac{\partial T}{\partial n}+\frac{\alpha_*}{\lambda_\alpha}T\Big|_{r=r_0}=0;$$

$T|_{z\ +}$ — ограничена;

$$\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0}=\frac{\omega_p\alpha}{\lambda_\alpha}.$$

При этих условиях температурное поле зерна [12] описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{r}\ \frac{\partial T}{\partial r}\ \ r\frac{\partial T}{\partial r}\ +\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0.$$

Уравнение имеет известное [12] решение в виде суммы

$$T=\sum_{n=1}^{\infty}C_n\exp\left[-\frac{\gamma_n z}{r_0}\right]I_0\left(\frac{\gamma_n r}{r_0}\right),$$

где γ_n — положительные корни трансцендентного уравнения $\left(\alpha_*\frac{r_0}{\lambda_\alpha}\right)I_0(\gamma'_n)=\gamma'_n I_1(\gamma'_n)$; γ'_n —

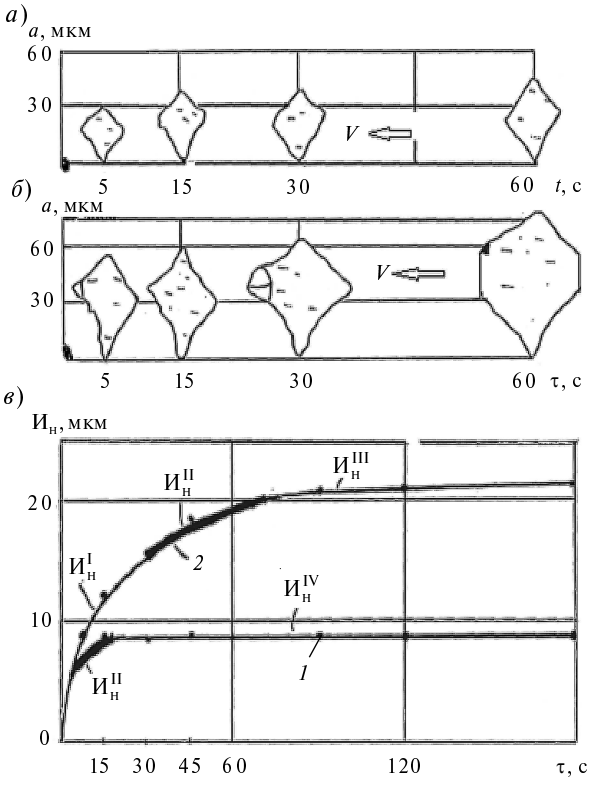


Рис. 1. Износ зерен алмаза А10 в зависимости от времени скольжения по поверхности керамики 22ХС (состав керамики 22ХС, %: Al_2O_3 — 94,4, SiO_2 — 2,76, Cr_2O_3 — 0,49, MgO — 2,35):

а — режим P_y = 20 сН (сила резания), СОЖ — вода; *б* — режим P_y = 34 сН (сила резания), СОЖ — вода; *в* — графики износа, соответствующие режимам *а* (*1*) и *б* (*2*)

приближенное значение корней уравнения, вычисляемое по асимптотикам первого $\left(\ _n=\frac{\pi}{4}\quad n\right)$ и второго $\left(\gamma'_n+\Delta\gamma'_n=\frac{\pi}{4}+\left(\alpha_*\frac{r_0}{\lambda}-\frac{3}{8}\right)\Big/\left(\frac{\pi}{4}+\pi n\right)\right)$ приближений.

Принимая n = 1, вычисляли второй корень трансцендентного уравнения. При вычислении корней ошибка равна $_{\ n\ 1}\ \mathrm{O}\left(n^{\ 2}\right)$ или $\mathrm{O}\left(n^{\ 3}\right)$ если $n>\infty$. Например, при n = 10 ошибка $\mathrm{O}=\frac{1}{n^2}=0{,}01$, то есть 1 %. $I_0(\gamma_n)$ и $I_1(\gamma_n)$ — функции Бесселя нулевого и первого порядка. Удов-

летворяя условию третьего рода, получим следующее уравнение:

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\gamma_n / r_0\right) I_0 \left(\gamma_n r / r_0\right) = \omega_{p\alpha} / \lambda_\alpha .$$

Его решением согласно [12] является

$$C_n = \left(2\omega_{p\alpha} r_0 / \lambda_\alpha\right) I_1 \left(\gamma_n\right) \Big/ \left(\gamma_n^2 \left[I_0^2 \left(\gamma_n\right) + I_1^2 \left(\gamma_n\right)\right]\right).$$

Подставляя в уравнение температуры выражение C_n, получили

$$T\left(r, z\right) = \left(2\omega_{p\alpha} r_0 / \lambda_\alpha\right) \sum_{n=1}^{\infty} I_1 \left(\gamma_n\right) I_0 \left(\gamma_n r / r_0\right) \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{\gamma_n z}{r_0} \right] \Big/ \left(\gamma_n^2 \left[I_0^2 \left(\gamma_n\right) + I_1^2 \left(\gamma_n\right)\right]\right).$$

Интегрируя это уравнение от 0 до r_0, получили значение средней температуры на контактной поверхности — торце — и внутри по оси z цилиндра

$$T_{\text{ср}} 2\pi \int_0^{r_0} T_n \left(r\right) r dr \Big/ \left(\pi r_0^2\right) =$$

$$= \left(2 / r_0^2\right) \int_0^{r_0} T_n \left(r\right) r dr,$$

где функция $T_n \left(r\right) = I_0 \left(\gamma_n r / r_0\right)$, а остальные члены в выражении $T\left(r, z\right)$, не зависящие от r, постоянны. Принимая во внимание, что

$$\int_0^{r_0} r I_0 \left(\gamma_n r / r_0\right) = \left(r_0 r / \gamma_n\right) I_1 \left(\gamma_n r / r_0\right),$$

после интегрирования функции $T_n \left(r\right)$ получим

$$T_{\text{ср}} = \left(2 / r_0^2\right) \int_0^{r_0} I_0 \left(\gamma_n r / r_0\right) r dr =$$

$$= \left(2 / r_0^2\right) \left(r_0 r / \gamma_n\right) I_1 \left(\gamma_n r / r_0\right) \Big|_0^{T_0} = \left(2 / \gamma_n\right) I_1 \left(\gamma_n\right).$$

Уравнение средней температуры после подстановки $T_{\text{ср}}$ в формулу $T\left(r, z\right)$ равно

$$T\left(r, z\right) = \left(4\omega_{p\alpha} r \ / \lambda_\alpha\right) \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} I_1^2 \left(\gamma_n\right) \exp\left[-\frac{\gamma_n z}{r_0} \right] \Big/ \left(\gamma_n^3 \left[I_0^2 \left(\gamma_n\right) + I_1^2 \left(\gamma_n\right)\right]\right).$$

Преобразовав трансцендентное уравнение к виду $I_0 \left(\gamma_n\right) / I_1 \left(\gamma_n\right) = \gamma_n \lambda_\alpha / \left(\alpha_* r_0\right)$ и подставив в уравнение $T\left(z\right)_{\text{ср}}$, получили окончательно

$$T\left(z\right)_{\text{ср}} = \left(4\omega_{p\alpha} r_0 / \lambda_\alpha\right) \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{\gamma_n z}{r_0} \right] \Big/ \left(\gamma_n^3 \left[1 + \left(\gamma_n \lambda_\alpha / \alpha_* r_0\right)^2 \right]\right).$$

Анализ полученного выражения $T\left(z\right)_{\text{ср}}$ показывает, что при коэффициентах теплопроводности алмазов = 147 Вт/(м·К), теплообмена $\alpha_* = 10^4 - 10^5$ Вт/(м^2·К) в зависимости от скорости омывания зерен СОЖ, радиуса $r_0 = 10^{-4} - 10^{-6}$ м выражение $_* r_0 /$ изменяет свое значение от 0 до 1. При r 0 будет $\frac{\alpha_* r_0}{\lambda_\alpha} \to 0$. Из [14, табл. 9.7], где приведены нули некоторых выражений, содержащих функции Бесселя) при $_* r_0 /$ = 0–1 первые пять корней имеют значения в интервалах: γ_1 = 0–1,2558; γ_2 = 3,817–– 4,0795; γ_3= 7,0156–7,1558; γ_4 = 10,1735–10,271; γ_5 = 13,3237–13,3984. При n = 1 на поверхности контакта (торец цилиндра, z = 0) с заготовкой сумма $\sum_{n=1}^{1} \exp\left[-\frac{\gamma_n 0}{r_0} \right] \Big/ \left(\gamma_n^3 \left[1 + \left(\gamma_1 \lambda_\alpha / \left(\alpha_* r_0\right)\right)^2 \right]\right)$ равна примерно 0,4; при n 0 сумма стремится к единице, причем члены при n >100 имеют значащую цифру в четвертом знаке после запятой. Следовательно, достаточно вычислять сумму при n = 100. Наибольшее значение температуры на поверхности контакта равно

$$T\left(0\right)_{\text{ср}} = 4\omega_{p\alpha} r_0 / \lambda_\alpha . \qquad (1)$$

Значение радиуса r_0 цилиндра, аппроксимирующего зерно, вычисляли из соображений равенства длин и объемов цилиндра и параболоида-зерна: $r_0 = \left(r_{\text{н}} \left(\overline{l} + 3\sigma_l\right)\right)^{1/2}$, где $r_{\text{н}}$ — начальный радиус вершины зерна, $\overline{l}$ и $3\sigma_l$ — средняя длина зерна и среднеквадратическая ошибка. Износ зерен на величину $И_{\text{н}}$ незначительно изменяет значение r_0 (менее 6 %).

Произведена опытная проверка адекватности зависимости (1) реальным условиям контак-

тирования алмазных зерен на установке резания единичными зернами. На рис. 2, *б* указан диапазон 0,05–1,6 ГПа давлений $\sigma_з^{II}$ в зоне $И_н^{II}$ износа зерен, разрушавших материалы при условиях по рис. 1 и 2. Вычисленный r_0 для испытанных заточенных зерен равен $71 \cdot 10^{-6}$ м. Температуру на поверхности площадок износа определяли по формуле $T(0)_{ср} = 4b_a f \sigma_з V r_0 / \lambda_\alpha$ и получили: для случаев изнашивания алмазов по сталям — в диапазоне 900–1100, по керамикам — 1300–1500 К, а в среднем соответственно 1000 и 1400 К. В этих интервалах находятся указанные выше температуры графитизации, эвтектоидного оплавления, уменьшения микротвердости (рис. 1, *в* — зона $И_н^{I}$) площадок износа вершин зерен. Контактная поверхность (площадка) зерен является изнашиваемой границей. Х.Г. Ландау [6], исследуя теплофизические задачи трения с подвижной границей, т. е. абляцией (оплавлением и удалением оплавленного слоя), установил, что при давлениях больше критического температура контактной границы постоянна из-за непрерывного удаления тонкого слоя с ее поверхности. От давления изменяется лишь скорость движения фронта оплавления. Анало-

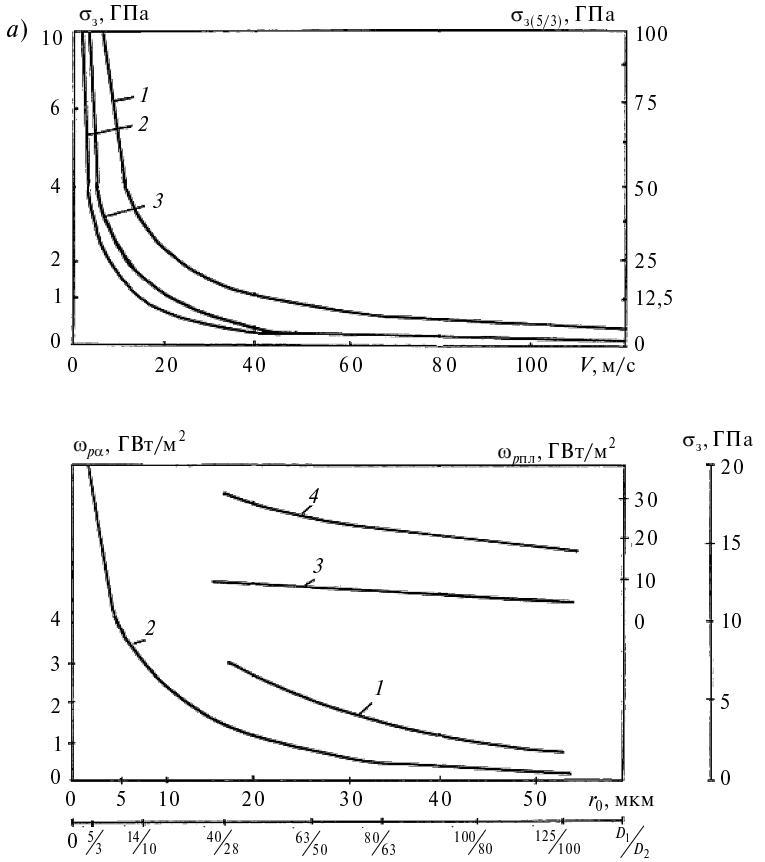


Рис. 2. Зависимости критического давления $\sigma_з$ (*а*) и плотности потока $\omega_{p\alpha}$ (*б*), соответствующих снижению микротвердости алмаза на площадке износа примерно в 5 раз, а также плотности потока $\omega_{p\,пл}$ (*б*), необходимой для оплавления керамики 22ХС под зерном, от скорости шлифования (*а*) и зернистости кругов (*б*) (r_0 — радиус эквивалентного цилиндра, соответствующий зернистости $D1/D2$; $\sigma_з$ (5/3) — давление на поверхности контакта зерна размером 5/3):

а — $\sigma_з(V)$ при r_0 = 17 мкм (*1*) и r_0 = 54 мкм (*2*); $\sigma_{з\,5/3}(V)$ при r_0 = 3 мкм (*3*); *б* — $\sigma_з(r_0)$ при V = 15 мкм (*1*); $\omega_{p\alpha}(r_0)$ (*2*); $\omega_{пл}(r_0)$ при 5 мкм (*3*)

гично описанному в [6, 8] можно предположить, что в зоне $И_н^I$ износа зерен из-за давления, которое больше критического, происходит постоянное высокотемпературное изменение твердости тонкого поверхностного слоя на площадке износа и истирание его о поверхность керамических заготовок. В зоне $И_н^{II}$ давление снижается до критического и скорость изнашивания замедляется; в зоне $И_н^{III}$ давление становится меньше критического и изнашивание почти прекращается (рис. 1, *в*). Видимо, можно считать, что при шлифовании сталей средняя критическая температура, при которой происходит перемещение фронта (площадки) изнашивания зерен, равна 1000 К, а керамики — 1400 К. В работах [11, 14] показано, что адгезионное взаимодействие углеродистых сталей с алмазом начинается при температуре $(0{,}4–0{,}5)\,T_{пл} = 710–1000$ К, а керамик — $0{,}7\,T_{пл} = 1500–1700$ К. В зоне $И_н^{III}$ нормального износа зерен расчетная температура на площадке износа в зависимости от давления и скорости равна 400–900 К. Значения критического давления $\sigma_з$ (рис. 2, *а*) и плотности потока $_p$ (рис. 2, *б*), вызывающие снижение твердости алмаза примерно в пять раз и продвижение контактной поверхности зерен вдоль координаты износа, вычислены по формулам

$$\sigma_з = T(0)_{ср}\frac{\lambda_\alpha}{4}b_a f \quad \text{и} \quad \omega_{p\alpha} = T(0)_{ср}\,\lambda_\alpha/(4r_0). \quad (2)$$

Исходя из условия движения плоского источника по адиабатической поверхности [13] заготовки оценивали плотность потока $\omega_{p\,пл}$, необходимую для начала оплавления тончайшего поверхностного слоя материала под зерном, по формуле $\omega_{p\,пл} = 133T_{пл}\lambda_к/\sqrt{\alpha\tau}$, где $T(0)_{ср}$ — средняя температура движения фронта — контактной поверхности — вдоль координаты износа; $T_{пл}$ — температура плавления керамики; $\tau = 2r_0/V$ — время действия источника. На ось абсцисс (см. рис. 2, *б*) нанесены значения радиусов r_0 цилиндров, эквивалентных зернам основной фракции алмазных кругов. Все кривые на графиках имеют вид обратно экспоненциальных зависимостей. Чем меньше зернистость алмазов в кругах, тем большие требуются давление и плотность потоков для возникновения описанных процессов. При шлифовании керамики 22ХС со скоростями 30–80 м/с критическое давление $\sigma_з$ для кругов зернистостью 5/3 равно 10–2,5; 40/28 — 1,5–0,8; 125/100 — 0,5–0,2 ГПа. Чем меньше размеры зерен, тем лучше они охлаждаются, следовательно, при более высоком значении давления возникает $T(0)_{ср}$. Чем больше скорость шлифования, тем больше требуется плотность потока $\omega_{p\,пл}$ для начала оплавления поверхности заготовки под зерном (рис. 2,*б*). Плотность потока $\omega_{p\,пл}$ в 3,3–20 раз больше плотности $\omega_{p□}$ для условий по рис. 2, *б*, следовательно, оплавление поверхности заготовки при шлифовании невозможно. Величины $\omega_{p\,пл}$ и $\omega_{p□}$ становятся равными при скорости шлифования меньше 0,1 м/с.

Полученные зависимости (1) и (2) критического давления $\sigma_з$, плотности теплового потока $\omega_{p□}$ и температуры $T(0)_{ср}$ на поверхности контакта алмазного зерна с поверхностью заготовки позволяют управлять режимными параметрами процесса алмазного шлифования хрупких твердых материалов по критерию величины износа вершин зерен в круге.

Формулы (1), (2) включают в себя параметры круга — зернистость r_0 и марку алмаза, технологические условия шлифования — вид смазки (*f*), скорость шлифования (*V*), силы резания, площадь контакта, плотность зерен ($P_у$, $S_н$, $N_{(0-t)}$) и др.

В работе [11] приведены зависимости для вычисления в пакете MatCad плотности (шт/см^2) зерен для кругов зернистости (160/125)–(50/40) и числа зерен на площади $S_к$, см^2, контакта круга с заготовкой. Износ вершин зерен алмазных кругов существенно влияет на глубину поверхностных трещин и размеры сколов краев у заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова.— М.: Машиностроение, 1977.— 391 с.

2. Алмаз [Текст]: Справочник / Под ред. Н.В. Новикова.— Киев: Наукова думка, 1981. 121 с.

3. **Ваксер, Д.Б.** Алмазная обработка технической керамики / Д.Б. Ваксер, Н.В.Никитков [и др.].— Л.: Машиностроение, 1976.— 160 с.

4. **Балакин, В.А.** Трение и износ при высоких скоростях скольжения [Текст] / В.А. Балакин.—

М.: Машиностроение, 1980.— 136 с.

5. **Безруков, Г.Н.** Оценка термостойкости синтетических алмазов по термографическим данным [Текст] / Г.Н. Безруков, Г.О. Пилоян, Л.А. Санжарлинская // Синтетические алмазы.— 1976.— № 6.— С. 7–11.

6. **Алешин, В.Г.** / В.Г. Алешин, Г.П. Богатырева [и др.] // Сверхтвердые материалы.— 1987. № 2.— С. 12–14.

7. **Гаргин, В.Г.** Влияние условий нагрева на прочность синтетических алмазов [Текст] / В.Г. Гаргин // Сверхтвердые материалы.— 1981.— № 4. С. 9–11.

8. **Гукасян, М.А.** Метод снятия с поверхности алмаза тонких слоев контролируемой толщины [Текст] / М.А. Гукасян, Е.А. Конорова // Алмазы.— 1973. № 1.— С. 1–5.

9. **Лоладзе, Г.Н.** Износ алмазов и алмазных кругов [Текст] / Г.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава.— М.: Машиностроение, 1967.— С. 112–116.

10. **Лыков, А.В.** Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков.— М.: Машиностроение, 1967.— 268 с.

11. **Никитков, Н.В.** Математическое моделирование процессов алмазной абразивной обработки хрупких керамических материалов [Текст] / Никитков Н.В. // Сб.: Математическое моделирование в машиностроении. Труды СПбГПУ.— №466. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1997.— 40 с.

12. **Резников, А.Н.** Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников.— М.: Машиностроение, 1981.— 279 с.

13. **Рыжик, И.М.** Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений [Текст] / И.М. Рыжик, И.С. Грандштейн .— М.: Наука, 1971. 1108 с.

14. **Сипайлов, В.А.** Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов.— М.: Машиностроение, 1978.— 167 с.

УДК 621.318:621.313

А.С. Адалев, В.Г. Кучинский, Е.Н. Попков, А.И. Фильчков, В.М.Чайка

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ШЕСТИФАЗНОЙ ВЕНТИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Поскольку вентильная машина всегда работает вместе с преобразователями, то ее модель следует разработать в фазных координатах. Значительный вклад в разработку теоретических основ математического моделирования вращающихся машин переменного тока в фазных координатах внес А.И. Важнов [1]. Применительно к цифровому моделированию машинно-вентильных систем эта теория получила дальнейшее развитие в работах [2–4] и др. Были получены математические модели идеализированных машин переменного тока различного конструктивного исполнения для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в ряде электроэнергетических систем. Многолетний успешный опыт использования полученных цифровых моделей машин переменного тока подтвердил высокую степень их достоверности.

Представляется, что разработанная и достаточно хорошо себя зарекомендовавшая теория моделирования вращающихся машин переменного тока, позволяющая получить эквиваленты машин относительно внешних соединений как силовой электрической, так и механической подсистем, может найти свое дальнейшее развитие в направлении моделирования вентильных машин с возбуждением от постоянных магнитов.

Магнитное поле вентильной машины, возбуждаемое постоянными магнитами, весьма неоднородно вследствие сложной конфигурации границ сердечников, своеобразного расположения проводников с токами и нелинейности магнитной характеристики магнитопровода. В этих условиях строгое определение поля представляет собой сложную задачу. Поэтому в зависимости от характера исследуемых явлений задача расчета поля решается с различными исходными допущениями [5–7].

Моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов основано на решении алгебро-дифференциальных уравнений, описывающих вращающиеся машины

и другие элементы исследуемой электроэнергетической системы [2]. При их получении используется определенная идеализация элементов расчетной схемы.

Применительно к вентильной машине известная идеализация магнитного поля электрической машины, которая позволяет получить достаточно простые электромагнитные связи при правильном отражении основного электромагнитного процесса в машине, может быть сведена к следующему:

1. Магнитная проницаемость сердечников машины принимается равной бесконечности. Это предположение позволяет использовать принцип наложения для определения результирующего поля в зазоре при совокупном действии токов всех обмоток и возбуждения от постоянных магнитов.

2. Возбуждение машины от постоянных магнитов учитывается составляющей в выражениях для потокосцеплений. При этом полагают, что эта составляющая является результатом протекания по виртуальной обмотке возбуждения постоянного тока такой величины, которая в режиме холостого хода обеспечивает номинальное напряжение на статорных обмотках.

3. Аппроксимация взаимной индуктивности между виртуальной обмоткой возбуждения и статорными обмотками ограничивается учетом первой, третьей и пятой гармоник от угла, характеризующего положение ротора.

4. Магнитопровод вентильной машины симметричен. Это означает, что магнитопровод имеет одинаковые очертания на всех полюсных делениях, а в пределах полюсного деления он симметричен относительно продольной и поперечной осей.

5. Статорные обмотки машины симметричны, т. е. имеют одинаковые числа витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитный осей.

6. Аппроксимация собственной и взаимной индуктивностей катушек ограничивается учетом постоянной составляющей, второй и четвертой гармоник от угла, характеризующего положение ротора.

7. Демпферные обмотки и эквивалентные демпферные контуры отсутствуют.

8. Ротор машины идеально жесткий.

Далее, в статье для принятой идеализации вентильной машины предлагается математическая модель машины с двумя трехфазными обмотками на статоре.

Математическое описание вентильной машины получим для интервала, соответствующего полюсному делению. Будем полагать, что вентильная машина имеет две идентичные трехфазные обмотки на статоре, магнитные оси которых смещены на 30 эл. градусов.

Возбуждение от постоянных магнитов будем учитывать составляющей в потокосцеплениях, которая является результатом протекания постоянного тока по виртуальной обмотке возбуждения. Наличие других роторных контуров учитывать не будем.

Условимся для любой обмотки обозначать: L и M — соответственно собственную индуктивность обмотки и ее взаимоиндуктивность с другими обмотками; R — активное сопротивление обмоток; i, Ψ и u — мгновенные ток, потокосцепление и напряжение на зажимах обмотки.

Принадлежность величины к фазной обмотке будем отмечать буквенными индексами a, b и c. Цифровой индекс у буквенного индекса обмотки будет означать принадлежность к трехфазной системе. Принадлежность некоторой величины к виртуальной обмотке возбуждения будем указывать индексом r.

Положение статорных обмоток будем задавать указанием смещений $\Delta\gamma_1$ и $\Delta\gamma_2$ магнитных осей фаз a, принадлежащих различным трехфазным системам, относительно принятой оси отсчета. В качестве оси отсчета используем ось, которая совпадает с магнитной осью фазы a_1. В этом случае $\Delta\gamma_1 = 0$, а $\Delta\gamma_2 = 30$ эл. град. Положение ротора будем задавать электрическим углом γ, который отсчитывается от принятой оси отсчета до продольной оси ротора d. Положительное направление вращения ротора — против часовой стрелки.

Принятая система описания расположения статорных обмоток и положения ротора поясняется диаграммой на рис. 1.

С учетом введенных обозначений описание статорных цепей вентильной машины может быть представлено в виде

$$-u_{a_1} = \frac{d\Psi_{a_1}}{dt} + Ri_{a_1}; \qquad -u_{a_2} = \frac{d\Psi_{a_2}}{dt} + Ri_{a_2};$$

$$-u_{b_1} = \frac{d\Psi_{b_1}}{dt} + Ri_{b_1}; \qquad -u_{b_2} = \frac{d\Psi_{b_2}}{dt} + Ri_{b_2}; \quad (1)$$

$$-u_{c_1} = \frac{d\Psi_{c_1}}{dt} + Ri_{c_1}; \qquad -u_{c_2} = \frac{d\Psi_{c_2}}{dt} + Ri_{c_2},$$

где

$$\Psi_{a_1} = L_{a_1} i_{a_1} + M_{a_1 b_1} i_{b_1} + M_{a_1 c_1} i_{c_1} + M_{a_1 a_2} i_{a_2} + \\ + M_{a_1 b_2} i_{b_2} + M_{a_1 c_2} i_{c_2} + M_{a_1 r} J_r;$$

$$\Psi_{b_1} = M_{b_1 a_1} i_{a_1} + L_{b_1} i_{b_1} + M_{b_1 c_1} i_{c_1} + M_{b_1 a_2} i_{a_2} + \\ + M_{b_1 b_2} i_{b_2} + M_{b_1 c_2} i_{c_2} + M_{b_1 r} J_r;$$

$$\Psi_{c_1} = M_{c_1 a_1} i_{a_1} + M_{c_1 b_1} i_{b_1} + L_{c_1} i_{c_1} + M_{c_1 a_2} i_{a_2} + \\ + M_{c_1 b_2} i_{b_2} + M_{c_1 c_2} i_{c_2} + M_{c_1 r} J_r;$$

$$\Psi_{a_2} = M_{a_2 a_1} i_{a_1} + M_{a_2 b_1} i_{b_1} + M_{a_2 c_1} i_{c_1} + L_{a_2} i_{a_2} + \\ + M_{a_2 b_2} i_{b_2} + M_{a_2 c_2} i_{c_2} + M_{a_2 r} J_r;$$

$$\Psi_{b_2} = M_{b_2 a_1} i_{a_1} + M_{b_2 b_1} i_{b_1} + M_{b_2 c_1} i_{c_1} + M_{b_2 a_2} i_{a_2} + \\ + L_{b_2} i_{b_2} + M_{b_2 c_2} i_{c_2} + M_{b_2 r} J_r;$$

$$\Psi_{c_2} = M_{c_2 a_1} i_{a_1} + M_{c_2 b_1} i_{b_1} + M_{c_2 c_1} i_{c_1} + M_{c_2 a_2} i_{a_2} + \\ + M_{c_2 b_2} i_{b_2} + L_{c_2} i_{c_2} + M_{c_2 r} J_r.$$

Согласно принципу взаимности коэффициенты взаимной индуктивности с переставленными подстрочными индексами равны, т. е. $M_{a_1 b_1} = M_{b_1 a_1}$ и т. д.

В соответствии с принятой идеализацией вентильной машины для аппроксимации изменения собственных и взаимных индуктивностей обмоток вентильной машины в функции угла γ, характеризующего положение ротора, используются выражения

$$L_{x_j} = l^{(0)} + l^{(2)} \sin\left(2\gamma + \varphi_{x_j}^{s(2)}\right) + \\ + l^{(4)} \sin\left(4\gamma + \varphi_{x_j}^{s(4)}\right); \qquad (3)$$

$$M_{x_j y_k} = m_{x_j y_k}^{(0)} + m_{x_j y_k}^{(2)} \sin\left(2\gamma + \varphi_{x_j y_k}^{s(2)}\right) + \\ + m_{x_j y_k}^{(4)} \sin\left(4\gamma + \varphi_{x_j y_k}^{s(4)}\right), \qquad (4)$$

где $x, y \in \{a, b, c\}$ — индексы фазной обмотки; $j \in \{1, 2\}$ — индекс трехфазной системы; γ — электрический угол между продольной осью d и принятой осью отсчета; $l^{(0)}$ — постоянная составляющая аппроксимации собственной индуктивности фазной обмотки; $l^{(2)}$ и $l^{(4)}$ — амплитуды гармонических составляющих аппроксимации собственной индуктивности фазной обмотки; $\varphi_{x_j}^{s(2)}$ и $\varphi_{x_j}^{s(4)}$ — начальные фазы гармонических составляющих синусоидальной аппроксимации собственной индуктивности фазной обмотки; $m_{x_j y_k}^{(0)}$ — постоянная составляющая аппроксимации взаимной индуктивности $M_{x_j y_k}$; $m_{x_j y_k}^{(2)}$ и $m_{x_j y_k}^{(4)}$ — амплитуды гармонических составляющих аппроксимации взаимной индуктивности $M_{x_j y_k}$; $\varphi_{x_j y_k}^{s(2)}$ и $\varphi_{x_j y_k}^{s(4)}$ — начальные фазы гармонических составляющих синусоидальной аппроксимации взаимной индуктивности $M_{x_j y_k}$.

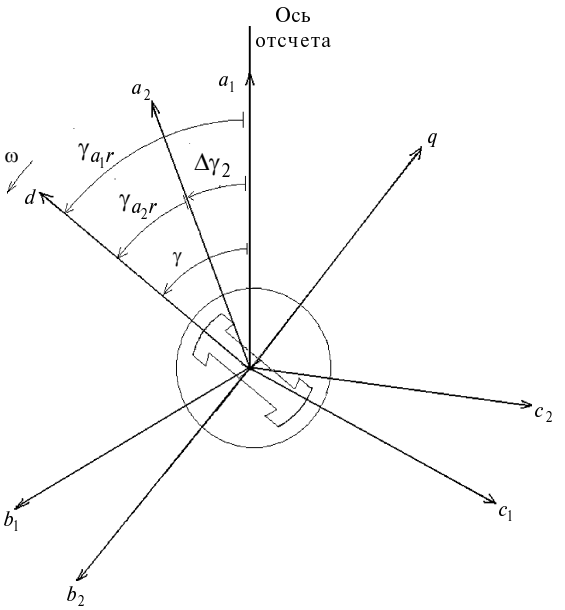


Рис. 1. Диаграмма описания положения ротора и статорных обмоток

В соответствии с принятой идеализацией вентильной машины для аппроксимации взаимной индуктивности между виртуальной обмоткой возбуждения и статорными обмотками используем выражение

$$M_{x_j r} = m_r^{(1)} \cos\left(\gamma + \varphi_{x_j r}^{(1)}\right) + m_r^{(3)} \cos\left(3\gamma + \varphi_{x_j r}^{(3)}\right) +$$

$$+ m_r^{(5)} \cos\left(5\gamma + \varphi_{x_j r}^{(5)}\right), \qquad (5)$$

где γ — электрический угол между продольной осью d ротора и магнитной осью фазной обмотки a_1; $m_r^{(1)}$, $m_r^{(3)}$ и $m_r^{(5)}$ — амплитуды гармонических составляющих аппроксимации взаимной индуктивности $M_{x_j r}$; $\varphi_{x_j r}^{(1)}$, $\varphi_{x_j r}^{(3)}$ и $\varphi_{x_j r}^{(5)}$ — начальные фазы гармонических составляющих аппроксимации взаимной индуктивности $M_{x_j r}$.

Приведенное описание динамических процессов вентильной машины является неполным. Уравнения (1)–(5) необходимо дополнить уравнениями, которые описывают движение ротора. Поскольку в дальнейшем предполагается объединение механических элементов по валу и возможное построение системы регулирования, обрабатывающей сигналы с датчика положения ротора, то используем для этой цели уравнения относительно реальной скорости вращения вала и фактического угла поворота ротора:

$$J \frac{d}{dt} = M_{\text{мех}} \quad M_{\text{тр}} \quad M_{\text{э}}; \qquad (6)$$

$$\frac{d}{dt} = \quad , \qquad (7)$$

где $M_{\text{мех}}$ — момент механических сил, приложенных со стороны вала; $M_{\text{тр}}$ — момент механических сил, имеющих характер трения; $M_{\text{э}}$ — электромагнитный момент; J — момент инерции вращающихся масс; Ω — угловая скорость вращения вала; Υ — геометрический угол поворота ротора.

Электромагнитный момент $M_{\text{э}}$ будем определять в виде алгебраической суммы электромагнитных моментов от отдельных трехфазных обмоток:

$$M_{\text{э}} = \frac{p_n \sqrt{3}}{3} \times \sum_j \left[\left(\Psi_{b_j} - \Psi_{c_j} \right) i_{a_j} + \right.$$

$$\left. + \left(\Psi_{c_j} - \Psi_{a_j} \right) i_{b_j} + \left(\Psi_{a_j} - \Psi_{b_j} \right) i_{c_j} \right]. \qquad (8)$$

Здесь p_n — число пар полюсов.

Необходимая величина электрического угла поворота ротора γ всегда может быть определена по Υ и значению числа пар полюсов ротора p_n:

$$\gamma = p_n \Upsilon. \qquad (9)$$

При этом заметим, что

$$\frac{d\gamma}{dt} = p_n \frac{d\Upsilon}{dt} = p_n \Omega = \omega. \qquad (10)$$

Получим модель вентильной машины, которая является эквивалентом уравнений (1)–(5) относительно внешних полюсов статорных обмоток.

Перейдем к матричной форме представления уравнения (1) и (2):

$$-\mathbf{U} = p\Psi + \mathbf{RI}; \qquad (11)$$

$$\Psi = \mathbf{M}_{xy}\mathbf{I} + \mathbf{M}_{xr}\mathbf{J}, \qquad (12)$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{a_1} \\ u_{b_1} \\ u_{c_1} \\ u_{a_2} \\ u_{b_2} \\ u_{c_2} \end{bmatrix}; \qquad \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{a_1} \\ \Psi_{b_1} \\ \Psi_{c_1} \\ \Psi_{a_2} \\ \Psi_{b_2} \\ \Psi_{c_2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix}; \quad \mathrm{I} = \begin{bmatrix} i_{a_1} \\ i_{b_1} \\ i_{c_1} \\ i_{a_2} \\ i_{b_2} \\ i_{c_2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{xy} = \begin{bmatrix} L_{a_1} & M_{a_1 b_1} & M_{a_1 c_1} & M_{a_1 a_2} & M_{a_1 b_2} & M_{a_1 c_1} \\ M_{b_1 a_1} & L_{b_1} & M_{b_1 c_1} & M_{b_1 a_2} & M_{b_1 b_2} & M_{b_1 c_2} \\ M_{c_1 a_1} & M_{c_1 b_1} & L_{c_1} & M_{c_1 a_2} & M_{c_1 b_2} & M_{c_1 c_2} \\ M_{a_2 a_1} & M_{a_2 b_1} & M_{a_2 c_1} & L_{a_2} & M_{a_2 b_2} & M_{a_2 c_2} \\ M_{b_2 a_1} & M_{b_2 b_1} & M_{b_2 c_1} & M_{b_2 a_2} & L_{b_2} & M_{b_2 c_2} \\ M_{c_2 a_1} & M_{c_2 b_1} & M_{c_2 c_1} & M_{c_2 a_2} & M_{c_2 b_2} & L_{c_2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{xr} = \begin{bmatrix} M_{a_1 r} \\ M_{b_1 r} \\ M_{c_1 r} \\ M_{a_2 r} \\ M_{b_2 r} \\ M_{c_2 r} \end{bmatrix}; \qquad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_r \end{bmatrix};$$

p — символ дифференцирования.

Перейдем от принятой аппроксимации описания собственных и взаимных индуктивностей фазных обмоток (3)–(5) к традиционным выражениям [1], которые используют только четные функции угла, определяющего положение ротора:

$$L_{x_j} = l^{(0)} + l^{(2)}\cos\left(2\gamma + \varphi^{c(2)}_{x_j}\right) + l^{(4)}\cos\left(4\gamma + \varphi^{c(4)}_{x_j}\right);$$

$$M_{x_j y_k} = m^{(0)}_{x_j y_k} + m^{(2)}_{x_j y_k}\cos\left(2\gamma + \varphi^{c(2)}_{x_j y_k}\right) + m^{(4)}_{x_j y_k}\cos\left(4\gamma + \varphi^{c(4)}_{x_j y_k}\right); \quad (13)$$

$$M_{x_j r} = m^{(1)}_r\cos\left(\gamma + \varphi^{(1)}_{x_j r}\right) + m^{(3)}_r\cos\left(3\gamma + \varphi^{(3)}_{x_j r}\right) + m^{(5)}_r\cos\left(5\gamma + \varphi^{(5)}_{x_j r}\right),$$

где

$$\varphi^{c(2)}_{x_j} = \varphi^{s(2)}_{x_j} \quad \frac{\pi}{2}; \qquad \varphi^{c(4)}_{x_j} = \varphi^{s(4)}_{x_j} \quad \frac{\pi}{2};$$

$$\varphi^{c(2)}_{x_j y_k} = \varphi^{s(2)}_{x_j y_k} \quad \frac{\pi}{2}; \qquad \varphi^{c(4)}_{x_j y_k} = \varphi^{s(4)}_{x_j y_k} \quad \frac{\pi}{2}.$$

Структура первых двух уравнений из (13) идентична. Это позволяет перейти к использованию общего выражения для всех элементов матрицы $\mathbf{M}_{xy}$:

$$M_{x_j y_k} = \overline{m}^{(0)}_{x_j y_k} + \overline{m}^{(2)}_{x_j y_k}\cos\left(2\gamma + \overline{\varphi}^{c(2)}_{x_j y_k}\right) + \overline{m}^{(4)}_{x_j y_k}\cos\left(4\gamma + \overline{\varphi}^{c(4)}_{x_j y_k}\right), \quad (14)$$

где при $x_j = y_k$ должны использоваться параметры аппроксимации для индуктивности фазной обмотки.

С учетом (14) получим и общее выражение для элементов Ψ_{xj} вектора-столбца потокосцеплений Ψ:

$$\Psi_{x_j} = \sum_k \left\{ \sum_y \left[\overline{m}^{(0)}_{x_j y_k} + \overline{m}^{(2)}_{x_j y_k}\cos\left(2\gamma + \overline{\varphi}^{c(2)}_{x_j y_k}\right) + \overline{m}^{(4)}_{x_j y_k}\cos\left(4\gamma + \overline{\varphi}^{c(4)}_{x_j y_k}\right) \right] i_{y_k} \right\} +$$

$$+ \left[m^{(1)}_r\cos\left(\gamma + \varphi^{(1)}_{x_j r}\right) + m^{(3)}_r\cos\left(3\gamma + \varphi^{(3)}_{x_j r}\right) + m^{(5)}_r\cos\left(5\gamma + \varphi^{(5)}_{x_j r}\right) \right] J_r. \quad (15)$$

На первом этапе, используя (12), получим выражения для производных потокосцеплений. В общем виде будет

$$p\Psi = \mathbf{M}_{xy} \quad p\mathbf{I} + p\mathbf{M}_{xy} \quad \mathbf{I} + p(\mathbf{M}_{xr} \quad \mathbf{J}). \quad (16)$$

С учетом (10) и принятой аппроксимации для собственной и взаимной индуктивности (14) получим

$$p\mathbf{M}_{xy} \times \mathbf{I} = -\omega\mathbf{A}_{xy}.$$

Поскольку для принятого способа учета возбуждения от постоянных магнитов по виртуальной обмотке возбуждения протекает постоянный ток, то

$$p(\mathbf{M}_{xr} \times \mathbf{J}) = p\mathbf{M}_{xr} \times \mathbf{J}.$$

При этом

$$p\mathbf{M}_{xr} = -\omega\mathbf{A}_{xr}. \quad (17)$$

В итоге с учетом (16) и (17) будет

$$p\Psi = M_{xy} \times p\mathbf{I} - \omega\mathbf{A}_{xy} \times \mathbf{I} - \omega\mathbf{A}_{xr} \times \mathbf{J}. \quad (18)$$

Элементы матриц $\mathbf{A}_{xy}$ и $\mathbf{A}_{xr}$ имеют те же размерности, что и элементы матрицы $\mathbf{M}_{xy}$ и $\mathbf{M}_{xr}$, однако определяются уже выражениями

$$A_{x_j y_k} = 2\overline{m}^{(2)}_{x_j y_k}\sin\left(2\gamma + \overline{\varphi}^{c(2)}_{x_j y_k}\right) + \overline{4m}^{(4)}_{x_j y_k}\sin\left(4\gamma + \overline{\varphi}^{c(4)}_{x_j y_k}\right);$$

$$A_{x_j r} = m^{(1)}_r\sin\left(\gamma + \varphi^{(1)}_{x_j r}\right) + 3m^{(3)}_r\sin\left(3\gamma + \varphi^{(3)}_{x_j r}\right) + 5m^{(5)}_r\sin\left(5\gamma + \varphi^{(5)}_{x_j r}\right). \quad (19)$$

Подставляя (18) в (11), описание процессов в статорных контурах получим в виде

$$-\mathbf{U} = \mathbf{M}_{xy} \times p\mathbf{I} - \omega\mathbf{A}_{xy} \times \mathbf{I} - \omega\mathbf{A}_{xr} \times \mathbf{J} + \mathbf{R} \times \mathbf{I},$$

или

$$-\mathbf{U} = \mathbf{M}_{xy} \times p\mathbf{I} - \mathbf{E}_x, \quad (20)$$

где

$$\mathbf{E}_x = \omega\mathbf{A}_{xy} \times I + \omega\mathbf{A}_{xr} \times \mathbf{J} - \mathbf{R} \times \mathbf{I} \equiv \left[e_{x_j} \right]. \quad (21)$$

Уравнения (20), (21), (19), (13) с учетом (14), а также (6) и (7) с учетом (8) описывают процессы в вентильной машине. По этому описанию может быть построена эквивалентная схема замещения относительно внешних выводов фазных обмоток, которая обеспечивает необходимое сопряжение вентильной машины с другими элементами, образующими расчетную схему имитационной модели исследуемой электроэнергетической системы [2, 3, 8].

Схема замещения статорных цепей шестифазной вентильной машины со взаимными связями приведена на рис. 2. На схеме изображены источники ЭДС и индуктивности фазных обмоток. Наличие взаимной индукции обозначено дугами. На схеме также выделены узлы 0_{a_j}, 0_{b_j} и 0_{c_j}, относительно которых отсчитываются мгновенные значения фазных напряжений u_{a_j}, u_{b_j} и u_{c_j}, и обозначены узлы a_j^*, b_j^*, c_j^* сопряжения источников ЭДС и части схемы с собственными и взаимными индуктивностями обмоток.

Использование эквивалента вентильной машины, в состав которого входит схема замещения со взаимными индуктивностями, требует реализации более сложных алгоритмов формирования уравнений описания процессов [9, 10]. По этой причине целесообразен переход к схеме замещения без взаимной индукции между элементами.

Методика такого перехода известна [11, 12]. Суть ее заключается в том, что для части расчетной схемы, образованной элементами со взаимными связями, получают матрицу узловых проводимостей

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \times \mathbf{Z}^{-1} \times \mathbf{W}^{T}, \qquad (22)$$

где $\mathbf{W}$ — матрица инцидентности [11] эквивалентируемой части схемы; $\mathbf{Z}^{-1}$ — матрица сопротивлений ее ветвей; -1 и Т — символы обращения и транспонирования матриц.

По матрице $\mathbf{Y}$ может быть построена схема замещения без взаимных связей между элементами. В схеме должен быть общий (нулевой) узел и столько других узлов, сколько строк (или столбцов) в матрице $\mathbf{Y}$. Между каждым таким узлом и нулевым следует включить ветвь, проводимость которой равна сумме элементов соответствующей строки матрицы $\mathbf{Y}$, а между парами узлов, ни один из которых не является нулевым,

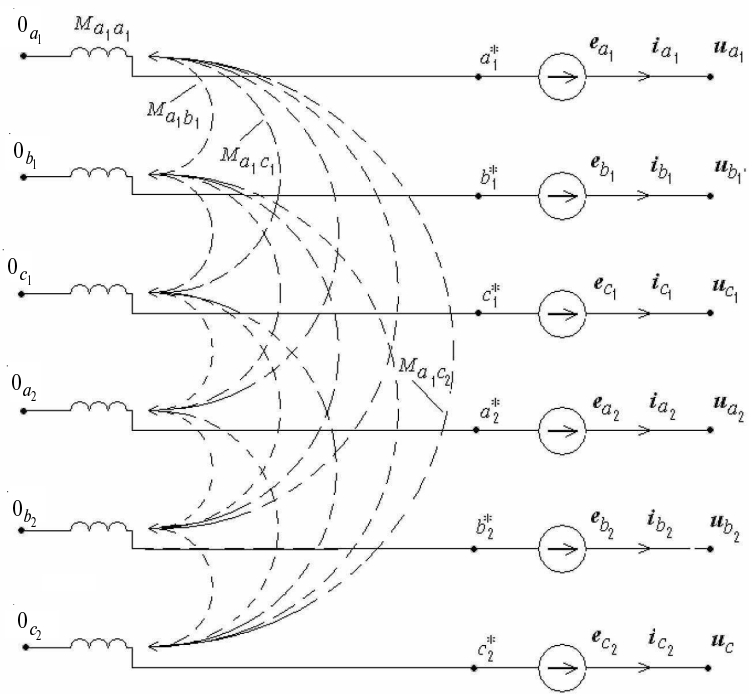


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения статорных цепей вентильной машины со взаимными связями

должна быть включена ветвь с проводимостью, равной взятому с противоположным знаком значению элемента матрицы **Y**, расположенному на пересечении строки и столбца, соответствующих паре узлов.

Применим эту методику к индуктивной части схемы замещения, изображенной на рис. 2. Матрица соединений для этой части схемы представляет собой единичную матрицу, порядок которой определяется числом фазных обмоток вентильной машины. Коэффициенты собственной и взаимной индуктивности $M_{x_j y_k}$, указанные на схеме рис. 2, — это элементы матрицы $\mathbf{M}_{xy}$, которые вычисляются с использованием выражений (14).

Матрице **Y** соответствует схема замещения, приведенная на рис. 3. Схема имеет нулевой узел и необходимое число узлов a_j^*, b_j^*, c_j^* для ее сопряжения с частью схемы, приведенной на рис. 2, которая образована источниками ЭДС. Между каждым узлом x_j^* полученной схемы и нулевым узлом содержится ветвь с индуктивностью $L_{ox_j^*}$, а между узлами x_j^* и y_k^* ($x_j^* \neq y_k^*$) — ветвь с индуктивностью $L_{x_j^* y_k^*}$. Числовые значения индуктивностей определяются следующим образом:

$$L_{ox_j^*} = \frac{1}{\omega_0 \sum\limits_k \left(\sum\limits_y Y_{x_j^* y_k^*} \right)}; \quad L_{x_j^* y_k^*} = -\frac{1}{\omega_0 Y_{x_j^* y_k^*}}. \quad (23)$$

Выполняя сопряжение схемы, соответствующей матрице **Y**, с частью схемы, приведенной на рис. 2 и образованной источниками ЭДС, получим некоторую схему замещения. Эта схема не эквивалентна исходной, представленной на рис. 2, по причине гальванических связей между обмотками машины и несоответствия числа внешних зажимов. Для достижения эквивалентности используем разделительные идеальные трансформаторы с единичным коэффициентом трансформации [2, 13]. С учетом сказанного искомая эквивалентная схема замещения статорных цепей вентильной машины без взаимных связей между элементами примет вид, который показан на рис. 4.

Описание вентильной машины задается в виде таблиц изменения ЭДС возбуждения от постоянных магнитов, собственной и взаимных индуктивностей фазы в функции угла γ, определяющего положение ротора.

Для нахождения этих величин проводится решение серии полевых задач, которые позволяют учесть реальное состояние магнитной системы вентильной машины, определяемое величинами рабочего тока обмотки и угла, задающего положение вектора 1-й гармоники тока относительно оси *q*. При этом величины магнитной проницаемости участков магнитопровода вычисляются по реальным зависимостям $B(H)$ для данной стали. После обработки результатов решения полевых задач выдаются описание ЭДС возбуждения, аппроксимированное 1-й, 3-й и 5-й гармониками, и описание собственной и взаимных индуктивностей фазы с аппроксимацией постоянной составляющей, 2-й и 4-й гармониками. Полученные данные используются в описанной модели вентильной машины.

Разработана имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов, эквивалентирующая машину относительно внешних зажимов статорных обмоток и позволяющая выполнять моделирова-

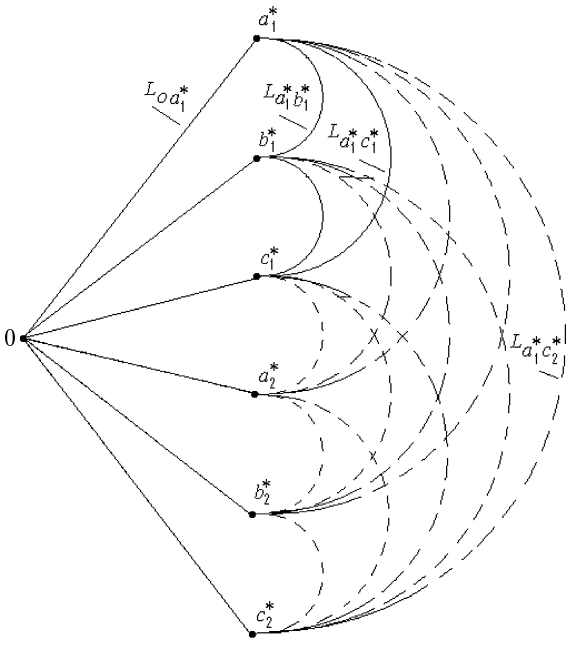


Рис. 3. Схема замещения, соответствующая матрице **Y**

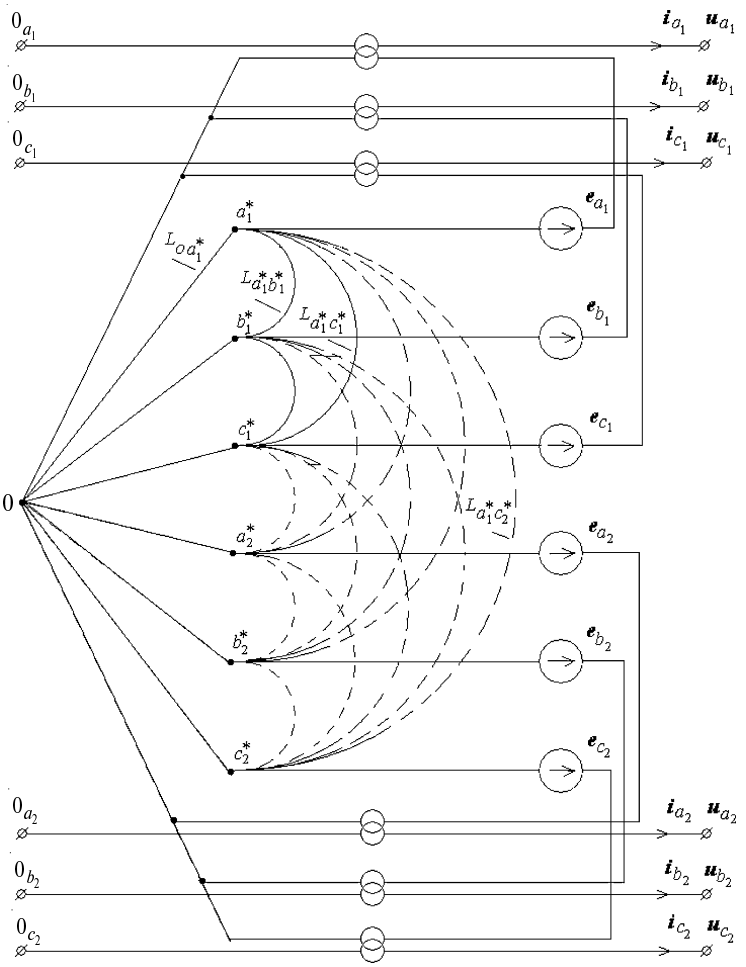


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения статорных цепей вентильной машины без взаимных связей

ние электромагнитных процессов с учетом состояния магнитной системы машины.

Исходными данными для модели служат конструктивные параметры машины и описания поведения ЭДС возбуждения от постоянных магнитов, а также собственная и взаимные индуктивности обмотки, полученные из решения серии полевых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Важнов, А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А.И. Важнов.— Л.: Энергия, 1980.— 256 с.

2. **Коротков, Б.А.** Имитационное моделирование переходных процессов в электрических системах [Текст]: Учебное пособие / Б.А. Коротков, Е.Н. Попков.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1987.— 280 с.

3. **Попков, Е.Н.** Теория и алгоритмы имитационного моделирования машинно-вентильных систем методом структурных ориентированных чисел [Текст]: Дисс. ... доктора техн. наук / Е.Н. Попков / СПбГПУ.— 2004.— 354 с.

4. **Пронин, М.В.** Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей [Текст]: Автореферат дисс. ... доктора техн. наук / М.В. Пронин / СПбГГИ.— 2006.— 40 с.

5. **Адалев, А.С.** Современные вентильные электродвигатели с постоянными магнитами для привода нефтеперекачивающих насосов и перспективы их использования на объектах ТЭК [Текст] / А.С. Адалев, С.А. Булгаков, А.С. Кибардин [и др.] // Трубопроводный транспорт.— 2008. № 1 (11).— С. 64–67.

6. **Belov, A.V.** 3DField Simulation of Complex Systems With Permanent Magnets and Excitation Coils / A.V. Belov, T.F. Belyakova, I.V. Gornikel [и др.] // IEEE Transaction on applied superconductivity.— 2008. Vol. 18, № 2.— P. 1609–1612.

7. **Амосков, В.М.** Моделирование и оптимизация магнитных систем электродвигателей / В.М. Амосков, А.В. Белов, Т.Ф. Белякова[и др.] // Электричество.— 2010. № 4. — С. 21–32.

8. **Ерохин, А.М.** Уравнения и схемы замещения многообмоточной электрической машины в фазных координатах [Текст] / А.М. Ерохин, Б.А. Коротков, Е.Н. Попков // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина.— 1986. № 421.— С. 68–76.

9. **Альбертинский, А.Б.** Применение структурных ориентированных чисел для анализа переходных процессов в электрических сетях [Текст] / А.Б. Альбертинский, Б.А. Коротков, Е.Н. Попков // Труды ЛПИ.— 1980. № 369.— С. 32–36.

10. **Альбертинский, А.Б.** Определение начальных значений токов индуктивностей в электрических цепях переменной структуры [Текст] / А.Б. Альбертинский, Е.Н. Попков // Сб.: Электромеханические и электромагнитные элементы систем управления.— Уфа, 1983.— С. 116–119.

11. **Мельников, Н.А.** Матричный метод анализа электрических цепей [Текст] / Н.А. Мельников.— М.: Энергия, 1972,.— 232 с.

12. **Вайнштейн, Л.М.** О возможности замены схем со взаимной индукцией эквивалентными без взаимной индукции [Текст] / Л.М. Вайнштейн, Н.А. Мельников // Электричество.— 1965. №5— С.16–18.

13. **Беляков, Н.Н.** Учет насыщения силовых трансформаторов при расчетах перенапряжений [Текст] / Н.Н. Беляков, М.Х. Зихерман // Труды ВНИИЭ.— 1969. Вып. 36.

УДК 519.7:681.51

Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин

ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ: ГЕНЕРАЦИЯ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ

Природные, общественные (гуманитарные) и антропогенные (техносферные) системы необходимо рассматривать как открытые. Ключевой вопрос — производство научного знания об открытых системах.

В качестве исходных представлений открытых систем используются их эмпирические описания. Полное представительное эмпирическое описание системы — единственный источник объективной информации об ее естественных масштабах и реальной сложности. Теоретическое знание о системах не может быть получено из эмпирических описаний чисто логическим путем. Для производства системного знания на основе эмпирических данных нужна научная теория. Такой теорией является *физика открытых систем* (*ФС*).

ФС — парадигма системологии, предложившая новый подход к решению проблем познания, научного понимания и рационального объяснения сложности систем [1]. ФС рассматривает системы в их естественных масштабах и реальной сложности. Ее идеи, подходы и методы реализованы в информационных технологиях, обеспечивающих автоматическую генерацию достоверного теоретического знания об открытых системах.

Системологическая концепция и главные научные положения ФС были разработаны в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1992–2003 годах [2–4]. В 2003 году сформировался проект «Физика систем». Работы по проекту ведут консорциум «Институт стратегических разработок» и научная лаборатория системологии факультета инноватики СПбГПУ (*http://www.isd-consortium.ru*).

Апробация подходов, методов и технологий ФС проводится в следующих направлениях: вычислительная токсикология, геномика, системная биология; теоретическая медицина; солнечно-земная физика; безопасность; технологии генерации знания.

В статье дан общий обзор системологической концепции ФС. В рамках этой концепции в фокусе проблем производства научного знания об открытых системах по их эмпирическим описаниям рассмотрены технологии ФС. В опоре на

когнитивные и информационные технологии ФС описан процесс автоматической генерации полного завершенного достоверного теоретического системного знания на уровнях системной и предметной онтологий [5–7].

Системологическая концепция ФС

ФС имеет четыре уровня организации (рис. 1). *Методологические основания* определяют концепцию парадигмы познания открытых систем как логически завершенную систему понятий, раскрывающих смыслы системогенеза. *Метатехнология* воплотила концепцию парадигмы познания открытых систем в нормативном языке конструктивного выражения их смыслов. *Конструктивная теория* предложила методы порождения понятий нормативного языка систем как формальных объектов. *Информационная технология* воплотилась в алгоритмизированную системологию, а ее формальные объекты получили адекватные вычислимые представления.

Методологические основания. ФС представлена в методологических моделях, определяющих систему на уровнях видения, познания, понимания и объяснения ее смыслов [2, 8]. ФС, целиком опираясь на мир опыта, строит философскую систему доктрин и основополагающих понятий о смыслах и связях между смыслами системы.

Доктринальная модель определяет понятие системы через ее представления в завершенных смысловых формообразах. *Диалектическая модель* определяет доктрины познания системы через базовые понятия, связанные диалектическими триадами, организованными в единую целостную иерархически устроенную понятийную систему.

Конструктивно-методологическая модель задает последовательность ступеней постижения смыслов системы на базе категории меры и всеобщего принципа симметризации — дисимметризации, создает структурные образы системы.



Рис. 1. Уровни организации ФС

Символическая модель вводит совокупность смысловых отношений, передающих характерные внутрисистемные закономерности через порождающие и выражающие моменты.

Коммуникация создает понятийное пространство системы, в котором научное знание о ней выражено словами языка систем. Содержание слов языка систем раскрывают триады понятий, утверждающие диалектические отношения, отражающие смысловое устроение системы.

Пространство качествований представляет полное смысловое пространство системы, объясняет все возможные актуальные и потенциальные формы проявления ее феномена. Конфигурацию пространства качествований устанавливают механизмы системогенеза, формирующие идеалы качественных определенностей системы и ее состояния.

Метатехнология. Главная цель метатехнологии — воплощение идей и принципов ФС в адекватном научном аппарате, организованном в единую схему познания, понимания и объяснения общих механизмов системогенеза [3].

В метатехнологии онтологического моделирования чистый внепредметный смысл системы, представленной ее символической моделью, переходит в знаковые образы, средствами выражения которых служат формализованные понятия, выражающие разные аспекты сущности системы. Смысловое значение знака переходит на его предметное значение, воплощенное в формальных объектах портретов системы. *В метатехнологии коммуникативного моделирования* язык систем превращается в целостную теоретическую систему научного знания, получает статус кодирующей системы, задающей все множество смысловых связей между словами и понятиями языка систем, введенными на уровне коммуникации. Лексический состав языка обогащается качествами понятий и их содержательными оценками, порождающими конструктивные определения понятий через отношения с объектами портретных образов системы.

В метатехнологии моделирования состояний вводятся модели состояний системы как организованного целого; строятся модели рационального объяснения свойств, обусловленных системой в целом; создаются модели механизмов, ответственных за формирование глобальных свойств системы; определяются модели свойств каждого показателя в каждом конкретном актуальном состоянии.

Конструктивная теория. ФС имеет три раздела теории.

Теория онтологического моделирования создает формальные модели, определяющие систему в ее качественных особенностях, свойствах и устроении пространства ее состояний [2, 3, 8]. В основе этой теории лежат аксиомы систем и принципы системообразования, порождающие идеальные объекты, обладающие характерными симметриями форм системной организации. Задачей теории является установление закономерностей, раскрывающих отношения идеальных объектов. Идеальные объекты и установленные закономерности опосредованно применяются к описанию эмпирической реальности конкретных систем.

Теория коммуникативного моделирования разрабатывает язык систем путем введения мер в смысловом пространстве системы [8]. Язык обретает способность различать и объяснять свойства конкретной системы, выражать научное знание о системе, оценивать его ценность и полезность.

Теория моделирования состояний исследует модели состояний системы, механизмы сборки состояний, классы состояний, эмерджентные свойства системы, механизмы, формирующие изменчивость свойств и значений показателей состояний, атрибуты элементов системной организации [5, 7]. В целях измерения объектов теории моделирования состояний создаются меры, устанавливающие правила их отображения на специальные качественные и количественные шкалы. Конструктивность теории обеспечивает вычислимость всех объектов, элементов, понятий, качеств, свойств, введенных метатехнологией, доказывает корректность и непротиворечивость процедур их вычисления.

Информационная технология. Процессы постижения, понимания и объяснения сущности конкретных систем реализованы в информационной технологии [4].

Алгоритмизованная системология обеспечивает вычислимость всех объектов метатехнологии и формального языка системы. На ее основе создана информационная технология, в которой разработаны специальные математические ме-

тоды, эффективные вычислительные процедуры, аппарат технологических индикаторов.

Технологический цикл производства знания организует применение процедур информационной технологии по универсальному сценарию генерации системного знания. Этапы и шаги сценария порождают формальные объекты технологии, которые отображаются в нормативных форматах. Технология устанавливает регламенты представления полученного знания в документированных отчетах. Конечный результат технологического цикла — это ресурсы решений прикладных задач на основе системного знания.

Инструментальная среда осуществляет в автоматическом режиме решение всех задач производства, оформления, представления знания, создания и предоставления ресурсов решений пользователям. Информационная технология производит *информационные и программные продукты*. Она генерирует полное завершенное системное знание по прикладным проблемам, формирует и предоставляет *базы знаний*, *модели и методики* решения системных проблем на основе знания. Для автоматического решения типовых системных задач технология создает программные средства — *решатели задач*.

Технологии ФС

Технологии ФС представлены аналитическим ядром, дескриптивным, конструктивным и проективным компонентами (рис. 2). Основой технологий ФС является *аналитическое ядро*. В нем воплощены идеи, подходы и методы онтологического моделирования, коммуникативного моделирования, моделирования состояний. Окружение аналитического ядра берет на себя решение двух задач: описание системных проблем в эмпирических данных и понятиях предметной области (*дескриптивный компонент*); представление системного знания для решения этих проблем в приемлемых для пользователей форматах (*конструктивный компонент*); применение полученного знания для проектирования и оценивания вариантов решения прикладных проблем (*проективный компонент*).

Аналитическое ядро. Технологии аналитического ядра выступают в качестве «интеллектуальной машины» генерации системного знания [5–7]. В его состав входят технология системных реконструкций, технология системной экспертизы, технология системного дизайна.

Технология системных реконструкций генерирует, организует, оформляет и представляет интеллектуальный ресурс системного знания.

Технология системной экспертизы осуществляет смысловой анализ интеллектуального ресурса (оценивает научное системное знание с позиций его достоверности, полноты, завершенности, применимости, значимости, актуальности) и формирует когнитивный ресурс системного знания.

Технология системного дизайна синтезирует адекватные модели состояний системы, исследует эмерджентные свойства системы, генерирует, организует, оформляет технологический ресурс системного знания.

Дескриптивный компонент. Технологии дескриптивного компонента связаны с аналитиче-

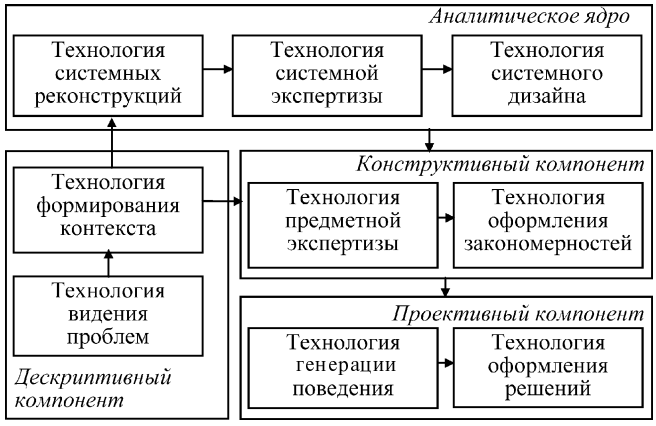


Рис. 2. Компоненты технологии ФС

ским ядром каналом абстрагирования, в котором общее предметное представление о системе в ее естественных масштабах и реальной сложности передается на системный уровень [5–7].

Технология видения проблем обеспечивает создание и применение интерфейсов при описании проблем предметной области как системных проектов. Представление проблемы как системного проекта связано с обоснованием целесообразности применения системного подхода для решения проблемы, оценкой масштаба и сложности проблемы, определением объема эмпирических данных, которые могут быть предоставлены для решения проблемы, регламентацией поставки данных.

Технология формирования контекстов отвечает за трансформацию описания проблемы в системном проекте в исходное интерпретированное нормативное представление системы как объекта исследования, выбор и описание мер ее измерения, формирование банка данных о системе.

Конструктивный компонент. Технологии конструктивного компонента связаны с аналитическим ядром каналом конкретизации, в котором системное знание передается на предметный уровень. Конструктивный компонент преобразует системное знание, сгенерированное технологиями аналитического ядра, в информационный, интеллектуальный, когнитивный и технологический ресурсы решений прикладных проблем [5–7].

Информационный ресурс решений — знание, являющееся продуктом системного анализа и осмысления эмпирического факта (дефекты и оценки качества эмпирического описания, уровень существенности показателей, релевантность показателей и объектов наблюдения решаемым задачам).

Интеллектуальный ресурс решений — семейства формальных моделей, создающих когнитивный потенциал для исследовательской деятельности (системные модели, модели взаимодействия, оценки полноты и завершенности системного знания).

Когнитивный ресурс решений — знание, предназначенное для мышления и действия, обладающее трансляционным потенциалом, обеспечивающее создание универсально-понятийных способов научной коммуникации (модели, объекты, схемы, язык систем).

Технологический ресурс решений — объективное знание о системе в целом и ее частях, обеспечивающее рациональное объяснение состояний системы и механизмов ее изменчивости (состояния, пространство состояний).

Технология предметной экспертизы реализует процесс преобразования знаний о состояниях и механизмах системы, выраженных на языке систем, в унифицированные схемы предметной онтологии системы. Знание о состояниях и механизмах системы, сгенерированное технологиями аналитического ядра, является знанием о внутреннем мире системы, не имеющим предметного формата. Перевод этого знания в предметные форматы требует применения средств выражения, способных связать системное понимание механизмов и состояний с понятиями и представлениями о них в предметной области.

Технология оформления закономерностей применяет ресурсы знания для выбора элементов знания, необходимых для решения прикладных задач, приводит элементы знания к форматам, учитывающим специфику предметного описания проблемы на уровне данных и условий их получения, предлагает формализованные методы решения проблем и шаблоны графоаналитического оформления результатов.

Проективный компонент. Технологии проективного компонента применяют ресурсы решений в целях создания предметного интерфейса [7].

Технология генерации поведения ответственна за построение объективной когнитивной модели проблемы на базе ее предметной онтологии и количественных форм системных решений, ее применение для генерации поведенческих портретов, раскрывающих свойства системы через демонстрацию ее изменчивости в событиях, состояниях, пространстве, времени.

Технология оформления решений формирует библиотеки типовых схем решения прикладных задач, разрабатывает и применяет сервисориентированные решатели классов прикладных проблем.

Производство системного знания

Системное знание генерируют технологии аналитического ядра и конструктивного компонента. Образами технологий аналитического ядра служат Технокубы, имеющие три измере-

ния. Первое измерение задает представления системы (в целом, в частях, в элементах). Второе измерение определяет задачи технологий (познание, понимание, объяснение) и предметы технологий (показатели, структуры отношений, состояния и механизмы). Третье измерение раскрывает шаги и ключевые моменты решения задач технологий. Пространства Технокубов наполнены *элементами знания*, для которых установлены нормативные форматы представления.

Технокуб системных реконструкций. Измерения Технокуба системных реконструкций заданы координатами «Представление», «Познание», «Выражение» (рис. 3).

В моменте «Схема» система представлена на уровне эмпирического факта и структур бинарных отношений. В моменте «Тип» система дана в смысловых формах всех ее качественных определенностей. В моменте «Образ» раскрыт потенциал переноса смысловых форм качественных определенностей системы на эмпирический факт.

Технология системных реконструкций автоматически производит системное знание на основе эмпирического описания системы. Эмпирическое описание преобразуется в абстрактное представление системы в виде знакового графа связей. Дисбаланс знакового графа проявляет неоднородность системы, свидетельствует об ее сложности (многокачественности). Граф связей со знаковым дисбалансом служит базой для автоматической генерации полных семейств *системных моделей* и *моделей взаимодействий*. Каждая системная модель определяет всю систему в какой-то одной ее качественной определенности, сформированной особым системообразующим механизмом. Вся система как целое во всех ее качествах выражена через полное семейство системных моделей, совокупность которых раскрывает присущую системе *сложность*. Модели взаимодействия определяют все типы структурных и поведенческих инвариантов, объясняющих единство многокачественной системы. Через модели взаимодействия проявляются высшие симметрии многофакторных внутрисистемных взаимодействий.

Результат технологии — знание о пространстве качествований системы как формообразе семейства абстрактных системных моделей. Каждой системной модели в этом пространстве отвечает область, в которой системе приписан тип ее качественной определенности. Каждая область охватывает все множество проявлений приписанного к ней типа качественной определенности. Структуру области определяют смысловые границы, в которых этот тип проявляется в разных формах с разной степенью интенсивности.

Технология системных реконструкций представляет элементы полученного системного знания в шести нормативных форматах (*эмпирический*, *статистический*, *структурный*, *системные*, *реалистичный портреты*).

Технокуб системной экспертизы. Измерения Технокуба системной экспертизы заданы координатами «Представление», «Понимание», «Общение» (рис. 4). Момент «Информация» характеризует эмпирический факт в его способности порождать полное достоверное знание о системе. Момент «Равновесие» объясняет системные

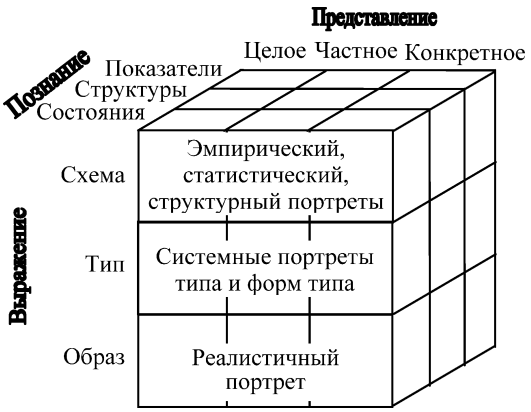


Рис. 3. Технокуб системных реконструкций

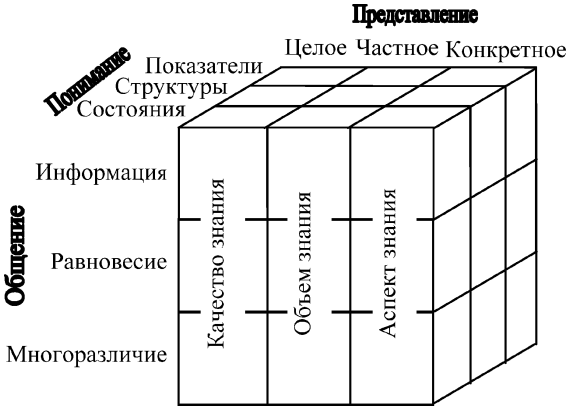


Рис. 4. Технокуб системной экспертизы

модели с позиций их оформленности, завершенности, однородности, контрастности выражения идеи системного целого в каждом его качестве. Момент «Многоразличие» оценивает полноту актуализации всех типов и форм качественных определенностей системы.

Технология системной экспертизы оценивает сгенерированное системное знание, строит на базе системных моделей полное *семейство моделей эталонных состояний*, отображает каждую область пространства качествований системы в ее признаковое пространство, определяет множество реальных объектов, являющихся носителями качества, характерного для этой области. Технология оперирует словами, понятиями и оценками *языка систем*. Через них она выражает свойства любых конкретных систем, используя для этого системное знание об этих системах.

Технология использует разные формы представления системы: эмпирическое описание; полное семейство системных моделей; системную модель одной конкретной качественной определенности; приведенный треугольник. Основная задача технологии системной экспертизы — преобразование семейства системных моделей во множество моделей эталонных состояний системы (модели эталонов). Полное множество моделей эталонных состояний определяет систему как одно целое во всех ее возможных качествах и всех вариантах проявления этих качеств в реальности.

Прямое отображение областей пространства качествований системы в ее признаковое пространство осуществляется путем отображения множества моделей эталонных состояний на эмпирическое описание системы. Это отображение осуществляется посредством применения приведенных треугольников и специальных шкал числовых форм уровней значений показателей. Технология строит шкалы для каждого показателя в каждой модели эталона. Совокупность всех количественных оценок показателей выделяет в признаковом пространстве *область эталона*. В этой области находится множество объектов, состояние которых отвечает конкретному эталону системы с разной степенью интенсивности проявления качеств эталона в реальности. Множество таких объектов образует *кластер объектов наблюдения*.

Результат технологии системной экспертизы — знание о качестве эмпирического описания, качестве всех системных и эталонных моделей, качестве отображений областей пространства качествований в признаковое пространство системы.

Технология системной экспертизы представляет элементы системного знания в трех нормативных форматах (*качество*, *объем*, *аспект знания*).

Технокуб системного дизайна. Измерения Технокуба системного дизайна заданы координатами «Представление», «Объяснение», «Атрибуты» (рис. 5). Момент «Качества» характеризует систему как единое целое в ее структурных инвариантах, сборках состояний, формах системных закономерностей. Момент «Свойства» раскрывает устроение областей эталонов в признаковом пространстве системы, правила сопряжения эталонов, доминанты состояний системы. Момент «Различия» дает полное объяснение всех актуальных состояний системы в отдельности и ее пространства состояний.

Технология системного дизайна применяет семейство кластеров объектов наблюдения для построения *моделей актуальных состояний системы*. Каждое эталонное состояние системы воплощается в разных объектах наблюдения с разной степенью интенсивности. На базе каждого кластера порождается *модель формы воплощения эталона* в признаковом пространстве системы. Такая модель включает кластер объектов наблюдения и оценки степени интенсивности воплощения эталона в этих объектах.

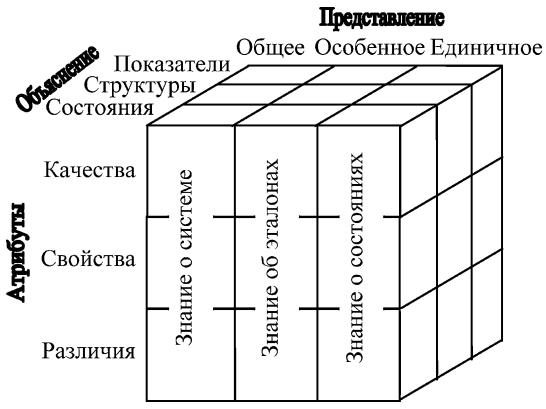


Рис. 5. Технокуб системного дизайна

Главная задача технологии системного дизайна — синтез всех актуальных состояний системы, представленных в ее эмпирическом описании состояниями объектов наблюдения. Реконструкция актуального состояния возникает в результате «сборки» всех моделей форм воплощения эталонов, отвечающих этому конкретному состоянию. Каждая реконструкция выступает носителем знания о состоянии системы как едином целом и ее *эмерджентных свойствах* в этом состоянии. Состояния системы раскрываются в реконструкциях через показатели и механизмы, характеризующие и детерминирующие эти состояния.

С каждым показателем связан набор атрибутов, которые с позиций системного целого оцениваются на специальных количественных и качественных шкалах. Эти атрибуты характеризуют каждый показатель в оценках уровня его значения, предопределенности этого уровня, важности, подвижности, грубости показателя.

В реконструкции конкретного актуального состояния каждый частный системный механизм способствует утверждению или изменению этого состояния. По реконструкции актуального состояния определяется конкретная роль каждого частного механизма в детерминации этого состояния. Полное множество реконструкций несет в себе знание обо всей системе в целом и ее эмерджентных свойствах, знание об ограничениях и закономерностях сопряжения различных качеств системы в ее актуальных состояниях.

Результат технологии — модели рационального объяснения: свойств каждого показателя в каждом конкретном состоянии; свойств, обусловленных системой в целом; свойств актуальных состояний системы как единого целого; механизмов, ответственных за формирование изменчивости каждого показателя и глобальных свойств системы.

Технология системного дизайна представляет элементы системного знания в трех нормативных форматах (*знание о системе*, *об эталонах*, *о состояниях*).

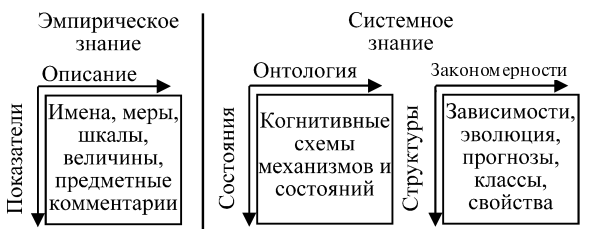


Рис. 6. Производство ресурсов решений

Генерация ресурсов решений. Технологии аналитического ядра образуют уровень *системной онтологии*. Их задачей является производство системного знания. Это знание имеет абстрактную форму, отвлеченную от конкретной предметности. Оно служит рациональной основой для производства ресурсов решений системных проблем. *Ресурсы решений* — это системное знание, рассчитанное на объяснение системы в интерпретируемых понятиях, формах и отношениях.

Уровень *предметной онтологии* образуют технология формирования контекста и технологии конструктивного компонента. На этом уровне знание о системе дано в формах эмпирического знания и ресурсов решений (рис. 6).

По координате «Представление» Технокубов системной онтологии система раскрывается в целом, частях, элементах. На уровне предметной онтологии эта координата развертывается в три координаты — «Описание», «Онтология», «Закономерности». По координате «Описание» фиксируется эмпирическое знание об исследуемой системе. По координате «Онтология» на основе системного знания раскрывается в ключевых понятиях и отношениях и выражается в когнитивных схемах сущностный мир системы. По координате «Закономерности» выводятся наиболее существенные, необходимые и устойчивые отношения между показателями, характеристиками их изменчивости, актуальными и потенциальными состояниями системы. Эти отношения — внешние аналитические описания сущностного мира системы.

Категории «Показатели», «Состояния», «Структуры» характеризуют знание о системе во внешних, внутренних и внешневнутренних формах. Через категорию «Показатели» *вводится описание системы* на уровне эмпирического знания. На этом уровне система и ее состояния определяются как гипотезы. Через категорию «Состояния» *система получает конструктивное определение* в понятиях системной онтологии. На уровне предметной онтологии *определение системы развертывается в описания ее механизмов и состояний*, наполняется фактами эмпирического знания, становится конкретно-предметным представлением. Категория «Структуры» задает правила, в соответствии с которыми на базе полученных

описаний внутреннего мира системы осуществляется вывод закономерностей, детерминированных внутрисистемными механизмами.

Заключение

Исходным представлением открытой системы служит ее описание в эмпирических данных. На его основе технологии ФС автоматически производят полное завершенное знание о системе без участия экспертов.

ФС в своих методологических основаниях руководствуется следующими положениями:

1) система есть многокачественное единство целого;

2) в каждом своем качестве система определена в некоторой локальности, являющейся частью целого и одновременно всем целым, наделенным этим качеством в условиях данной части;

3) поведение системного целого в локальности является доминантным;

4) локальности системы имеют двухфакторную организацию;

5) факторы локальностей системы однородны и формируются каждый уникальным системным механизмом;

6) систему в каждой ее качественной определенности определяет уникальный механизм двухфакторного взаимодействия;

7) системные закономерности обусловлены действием внутрисистемных механизмов, устанавливающих отношения между частями и элементами системного целого.

Первые четыре положения получают прямое воплощение в конструктах технологий аналитического ядра. Эти технологии производят системное знание об устроении системы как единого целого, определяют конструкты этого целого и объясняют их роли в формировании целого, его частей и состояний. Три других положения объективируются в технологиях конструктивного компонента. В конструктах этих технологий данные положения выражаются в виде когнитивных схем механизмов и состояний, а также в виде формальных зависимостей, свойств и оценок.

Конечным продуктом технологий аналитического ядра и конструктивного компонента являются ресурсы решений системных проблем. Элементы этих ресурсов образуют достоверное, понятое, проверенное, имеющее рациональное объяснение системное знание, допускающее содержательно-предметную интерпретацию.

Ресурсы решений передаются технологиям проективного компонента. На этом уровне (уровень приложений) с ресурсами решений работают специалисты предметной области. Их задача состоит в оценке полученных вариантов решений конкретных прикладных проблем на базе полученных ресурсов решений.

Статья подготовлена при частичной финансовой поддержке ISTC в рамках проекта #3476р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Качанова, Т.Л.** Физика систем — посткибернетическая парадигма системологии [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 3 (121).— С. 29–36.

2. **Качанова, Т.Л.** Основания системологии феноменального [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999.— 180 с.

3. **Качанова, Т.Л.** Метатехнология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.— 336 с.

4. **Качанова, Т.Л.** Технология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Сб.: Проблемы инновационного развития. Вып. 2.— СПб.: Политехника, 2003.— 146 с.

5. **Ageev, V.** Physics of Open Systems: a new approach to use genomics data in risk assessment [Текст] / V. Ageev, B. Fomin, O. Fomin, T. Kachanova [et all.] // In Book «Risk Assessment».— Book 2/Ed. M.G. Tyshenko.— InTech, 2012.

6. **Kachanova, T.** Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge [Текст] / T. Kachanova, B. Fomin // 3rd Intern. Multi-Conf. on Complexity, Informatics and Cybernetics: «IMCIC 2012». March 25th — 28th, 2012 — Orlando, Florida, U.S.A.

7. **Качанова, Т.Л.** Методы и технологии генерации системного знания [Текст]: Учеб. пособие для магистров и аспирантов / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.— 132 с. ISBN 978-5-7629-1197-9.

8. **Качанова, Т.Л.** Введение в язык систем [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб: Наука, 2009.— 340 с.

УДК 519.7+681.51

В.О. Агеев, А.В. Арасланов, Т.Л. Качанова, К.А. Туральчук, Б.Ф. Фомин, О.Б. Фомин

ГЕНЕРАЦИЯ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

Физика систем (ФС) предложила новый подход к решению проблем познания, научного понимания и рационального объяснения феномена сложности открытых природных, общественных (гуманитарных) и техносферных (антропогенных) систем. В рамках этого подхода система имеет конструктивное определение и является объектом фундаментального исследования [1]. Идеи и методы ФС воплощены в новых когнитивных и информационных технологиях, обеспечивших поиск регулярности, редукцию сложности и реконструкцию целого в открытых системах. Технологии физики систем формируют информационный, интеллектуальный, когнитивный, технологический ресурсы знания об исследуемой системе. Ресурсы знания, дополненные оценками ценности и применимости, а также новыми вычисляемыми объектами и их атрибутами, преобразуются в ресурсы решений прикладных задач [2–4].

Аналитический аппарат и информационные технологии проходят апробацию в рамках системных проектов, включающих: освоение больших объемов эмпирических данных; производство научного системного знания; накопление, сопряжение, хранение и эксплуатацию системного знания на принципах интеграции исследовательских инфраструктур; создание технологических платформ знания; преодоление технологических барьеров междисциплинарных взаимодействий; интеллектуализацию информационных мониторингов открытых систем.

Уместен вопрос о перспективах применения физики систем в исследованиях социологической реальности. Авторы статьи попытались с междисциплинарных позиций раскрыть суть новой парадигмы, описать сценарий действия ее «интеллектуальной машины», объяснить на примерах объектов социологического анализа реальности объем, состав и содержание системного научного знания, произведенного из данных, накопленных эмпирической социологией.

В качестве примеров объектов социологического анализа в статье рассмотрены *регионы*, *группы регионов*, *федеральные округа РФ* (всего 14 объектов). Каждый регион как социальная система характеризуется присущими ему системными закономерностями. Каждой группе регионов и каждому федеральному округу как социальной системе присущи закономерности, общие для всех входящих в их состав регионов. Исследования проведены независимо по каждому объекту. Результаты производства знания представлены и интерпретированы в сравнении по всей совокупности анализируемых объектов.

В аналитическое ядро ФС поступают статистические данные о жизнедеятельности регионов РФ. На их основе создаются эмпирические описания регионов и округов РФ как систем. В качестве носителя при исходном определении систем принят регион РФ [5]. Состояния регионов описываются единым сегментированным набором показателей:

Сегмент	*Число показателей*
Терроризм	4
Криминал	18
Социально-экономический	15
Финансы	34
Демография	14
Напряженность	10
Территория	1
Итого	96

Период наблюдения для всех регионов — 29 месяцев (с января 2002 года по май 2004 года). Состояние за конкретный месяц определяется вектором значений показателей. В качестве объекта анализа выступает федеральный округ РФ. Каждый округ как система представлен эмпирическим описанием (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики таблиц данных по округам

Объект анализа	Число регионов	Число показателей	Число наблюдений
Центральный федеральный округ (ЦФО)	18	89	522
Сибирский федеральный округ (СФО)	16	86	464
Приволжский федеральный округ (ПФО)	15	86	435
Южный федеральный округ (ЮФО)	13	86	377
Северо-западный федеральный округ (СЗФО)	11	90	319
Дальневосточный федеральный округ (ДФО)	10	86	290
Уральский федеральный округ (УФО)	6	90	174

При построении эмпирических описаний систем в результате фильтрации данных исключены некоторые показатели из единого набора. Объекты анализа сопоставимы по набору показателей, описывающих их состояния. Число наблюдений каждого объекта анализа дает достаточно представительные выборки данных для применения технологии системных реконструкций.

Информационный ресурс решений

Технология системных реконструкций преодолевает сложность объектов анализа, проявленную в их внешних абстрактных представлениях (структуры парных связей и их атрибуты) и выраженную в реконструктивном семействе системных моделей, раскрывающих многокачественную сущность систем (табл. 2).

Оценка проявленности характеризует четкость выражения внутренних отношений во внешних формах (парных связях). Оценка сложности связана с выявлением знаковых доминант бинарных отношений. Взятые вместе оценки связей указывают на разнообразие внутрисистемных корреляций.

Гетерогенность открытых систем выражается вовне через структурные неоднородности. Степень раскрытия многокачественной сущности систем характеризует процент разрешенных неоднородностей. Закономерности, формирующие изменчивость показателей, раскрывает множество системных моделей. У всех объектов анализа есть некоторое число показателей, научное знание о закономерной изменчивости которых в моделях в полной мере не раскрыто. Эти закономерности полностью определены для тех объек-

Таблица 2

Оценки гетерогенности объектов анализа

Объект анализа	Парные связи		Разрешенная неоднородность, %	Показатели в системных моделях		
	Проявленность	Сложность		Ведущая системная роль, %	Число дополнительных вершин	Участие в ядрах, %
ЦФО	0,79	0,32	26	85	13	9
СФО	0,91	0,23	68	95	4	27
ПФО	0,85	0,22	50	91	8	21
ЮФО	0,89	0,22	58	90	9	18
СЗФО	0,82	0,34	19	84	14	6
ДФО	0,92	0,37	6	42	50	5
УФО	0,94	0,39	7	54	41	5

тов анализа, у которых 100 % показателей обладают ведущей системной ролью. Смысловая активность показателей определяется числом их вхождений в ядра системных моделей — носителей смыслов систем.

Исходно информационный ресурс возникает на этапе построения эмпирического описания системы. Технологии аналитического ядра ФС исследуют это описание с позиций его полноты и достаточности для раскрытия и выражения всех качеств системы, оценки существенности показателей для передачи смыслов системы и их значимости в определении состояний и свойств системы (рис. 1).

Паспортизованный информационный ресурс дополняется оценками весомости показателей на базе слов «Коррелятивность». «Представительность», «Осуществленность» языка систем [6]. Слова языка систем порождают первый и второй информационные ранги показателей. На базе рангов определяются группы сильных и слабых показателей. На основе первого информационного ранга и слов «Системная обусловленность» языка систем вычисляются потенциалы адекватности отображения эмпирической весомости показателей. На базе второго информационного ранга и слова «Акцентирование существенного» вычисляются потенциалы адекватности отображения однородности показателей в целевом наборе.

Информационный ресурс решений устанавливает подмножества существенных и несущественных показателей, задает подмножества показателей, значимых для решения конкретных целевых задач. На базе информационного ресурса разрабатываются рекомендации для проектирования мониторингов систем.

Интеллектуальный ресурс решений

Сложность систем, представляющих объекты анализа, разрешается в реконструктивных семействах системных моделей. Степень преодоления сложности характеризуют оценки неоднородности, проявленной, разрешенной и выраженной в формальных моделях, раскрывающих уникальные качества систем. Каждый объект анализа представлен своими уникальными наборами системных моделей и моделей взаимодействия, раскрывающими сущность данного объекта. Уникальность наборов моделей обусловлена различиями в числе, составе, структуре, атрибутах, морфологии моделей (табл. 3).

Количество полученных системных моделей у объектов анализа характеризует раскрытую многокачественную сущность системы. Оценка «Охват целого моделью» характеризует в среднем завершенность форм устроения моделей всех качественных определенностей системы. Ядра моделей напрямую выражают системные смыслы уникальных качеств системы. Синглеты (элементарные ячейки системы) образуют ядра системных моделей и формируют сами эти модели. Оценки «Среднее число синглетов» и «Средний размер ядра» отображают полноту передачи системных смыслов во внешних структурных фор-

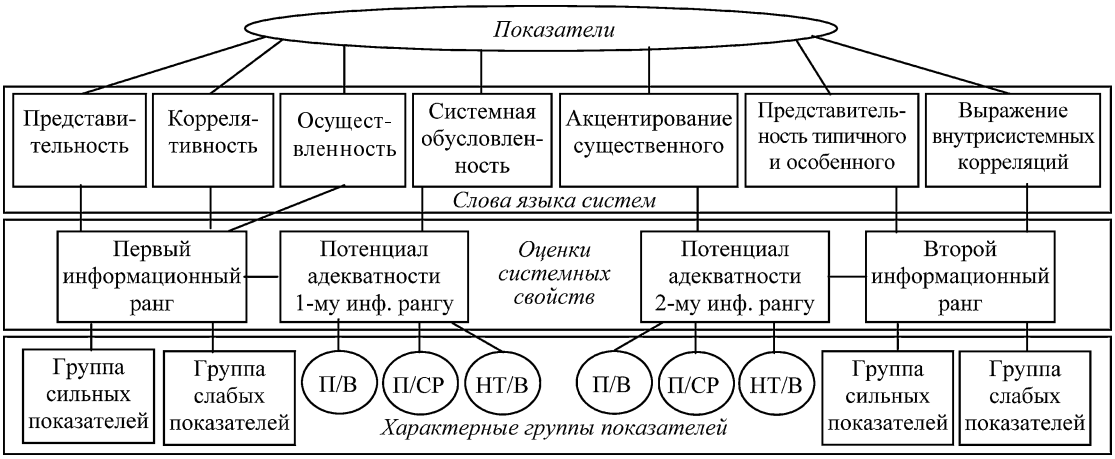


Рис. 1. Паспорт информационного ресурса:

П — позитивность потенциала; НТ — нейтральность потенциала; В — высокий уровень первого ранга; СР — средний уровень первого ранга

Таблица 3

Оценки моделей

Объект анализа	Системные модели						Модели взаимодействия, количество				
	Количество моделей	Охват целого моделью, %	Среднее число синглетов	Средний размер ядра	Доля ядра	Подобие первичных системных единиц	Дублет SIM	Дублет SWI	Дублет ABS	Триплет INT	Синглет SEP
ЦФО	33	75	7	7	0,16	0,64	81	1	2	0	1960
СФО	19	89	34	22	0,3	0,71	242	0	1	0	5597
ПФО	26	76	25	17	0,19	0,71	279	7	6	0	4630
ЮФО	25	84	21	14	0,19	0,68	197	5	18	0	4665
СЗФО	38	66	4	5	0,15	0,40	48	9	7	0	608
ДФО	13	88	2	4	0,21	0,48	9	0	0	0	135
УФО	23	65	2	3	0,17	0,41	11	8	8	0	163

мах. Внутреннее подобие характеризует смысловую однородность качественной определенности системы. Внешнее подобие служит мерой схожести разных смысловых единств системы (дублеты SIM). Подвижность, изменчивость системы обусловлена внутрисистемными взаимодействиями. Моделями взаимодействия являются синглеты SEP, дублеты, триплеты. Поскольку структуры всех видов моделей взаимодействия всегда определяются однозначно, главное в системном знании об этих моделях — их количество. Число синглетов SEP обусловлено качеством обособления системы, числом и завершенностью построенных системных моделей. Дублеты SWI, ABS и триплеты INT отвечают за выражение системного целого, образуемого уникальными качественными определенностями.

Исходно интеллектуальный ресурс возникает как реконструктивные семейства системных моделей и моделей взаимодействия, построенных технологией системных реконструкций [7]. Технологии ФС исследуют эти семейства с позиций полноты, завершенности, качества системных моделей для раскрытия и выражения смыслов системы, оценки существенности моделей для передачи смыслов системы и их значимости в определении состояний, свойств и механизмов системы (рис. 2).

Интеллектуальный ресурс решений самодостаточен. Он образует базу научного системного знания, с которой работают системные аналитики, чья цель — глубокое проникновение во внутрисистемные процессы.

Когнитивный ресурс решений

Исходно когнитивный ресурс возникает на базе технологии системной экспертизы. Основой этого ресурса служат слова и понятия языка систем [6].

Для всех системных моделей установлены объективные интегральные оценки качества вы-

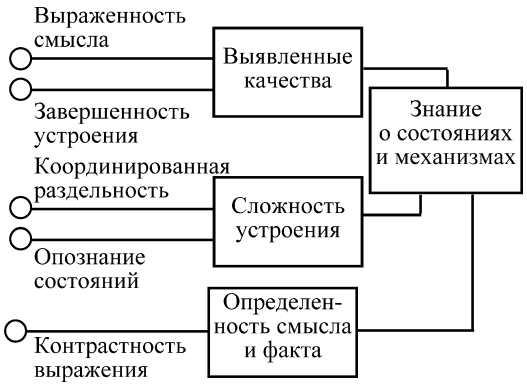


Рис. 2. Оценки системного знания на уровне интеллектуального ресурса

раженности смыслов в каждой отдельно взятой модели (качество оформленности и однородности). Качество *оформленности* оценивает комплексный показатель, имеющий в своей базе 11 единичных показателей, характеризующих структуру и морфологию системной модели. Мерой качества *однородности* служит комплексный показатель, основанный на 15 единичных показателях, отображающих общность, единство и согласованность всех компонентов системной модели. Вычисление оценок основано на определении и применении базовых образцов системных моделей для каждого отдельно взятого объекта социологического анализа. Оценки качеств оформленности и однородности системных моделей носят относительный характер. Для их вычисления используются оценки соответствующих качеств *базовых образцов*. Доля моделей с хорошими и отличными оценками этих качеств используется в качестве общей характеристики полноты и законченности системного знания.

Возникает вопрос, насколько факт, отражающий реальные наблюдаемые состояния систем, способен воспринять конкретный системный смысл, раскрытый в моделях эталонных состояний (качество адекватности). Оценки качества *адекватности* находятся в результате верификации каждой модели эталонного состояния. Эти оценки носят абсолютный характер. Для всякой системной модели на базе ее ядра определяется *идеал* данной модели. Идеалы задают правила прямого отображения эталонных состояний системных моделей на актуальные состояния объектов социологического анализа, представленные в их эмпирических описаниях.

Когнитивный ресурс дополняют оценки: системные групповые ранги моделей, сильные и слабые модели этого ранга, потенциалы адекватности выражения в моделях смыслов системы; предметные групповые ранги моделей, оценки близости целевых моделей к эталону; итоговый ранг моделей. Для решения целевых задач формируются подмножества системных моделей (рис. 3).

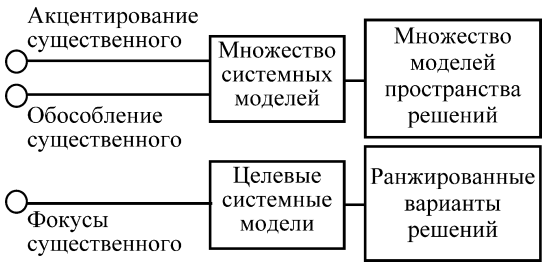


Рис. 3. Оценки системного знания на уровне когнитивного ресурса

Каждый округ РФ как объект анализа исследуется независимо от других объектов. В качестве примера рассмотрен СЗФО:

Номер региона	*Название региона СЗФО*
4	Архангельская область
10	Вологодская область
16	Калининградская область
29	Ленинградская область
34	Мурманская область
35	Ненецкий автономный округ
37	Новгородская область
45	Псковская область
53	Республика Карелия
54	Республика Коми
65	Санкт-Петербург

Далее приведены результаты по регионам 4, 29, 35, 65 для задачи «Социальная напряженность». В качестве оценок социальной напряженности в регионах приняты: миграционный прирост населения; отношение потребительских расходов к денежным доходам; отношение потребительских расходов к стоимости набора из основных продуктов питания; отношение численности граждан, ищущих работу, к числу требуемых работников.

Системные ранги системных моделей вычисляются на базе оценок слов «Выраженность смысла», «Завершенность устроения», «Координированная раздельность» языка систем. Всего выделено пять системных рангов. Предметные ранги системных моделей определены для целевых системных моделей. Они вычисляются по оценкам слов «Обособление существенного», «Фокусы существенного», «Контрастность выражения». Всего выделено пять предметных рангов. Итоговый ранг модели определяется по единой порядковой шкале.

Когнитивный ресурс решений обеспечивает оценку потенциала решения прикладных задач на основе системного знания.

Технологический ресурс решений

Каждый объект анализа в любом его конкретном актуальном состоянии описывает формальная модель — научная реконструкция состо-

яния объекта. Эта модель представляет состояние объекта как системного целого. Модель охватывает все раскрытые смысловые части, описывающие множественные внутрисистемные механизмы, детерминирующие данное состояние (табл. 4).

Системные модели жизнедеятельности каждого региона в составе федерального округа построены методами технологии системного дизайна. Технологический ресурс включает модель жизнедеятельности любого региона в составе округа РФ. Каждое состояние региона задается реконструкцией состояния и характеризуется набором системных моделей, взятых в присущих им эталонных состояниях: HR; HL; LR; LL. Реконструкция состояния дает рациональное объяснение значения каждого показателя в наблюдаемом состоянии. В моделях состояний для показателя установлены наборы атрибутов: ранг, уровень значения, предопределенность, важность, подвижность. Эти атрибуты в совокупности характеризуют показатель как элемент, необходимый для идентификации конкретного актуального состояния объекта и оценки потенциала его изменчивости.

Все состояния региона, упорядоченные во времени, задают модель жизнедеятельности региона — эволюцию его состояний на периоде наблюдения (табл. 5).

На основе моделей жизнедеятельности регионов определены общее число системных моделей, детерминирующих состояния регионов, и классы этих моделей (табл. 6).

Иллюстрацией табл. 6 служит рис. 4. На рисунке классы системных моделей объединены

Таблица 4

Модель состояния 65-го региона во 2-м квартале 2002 года (фрагмент)

Показатель	Значение	Имена моделей	Ранг	Уровень значения	Предопределенность	Важность	Подвижность
C1	7226	D3/HR, FIN16/HL, S2/HL, C6/LR, BURSTED/LL, C5_9/LL, D_7/LL, I6/LR, FIN4/HR, FIN17/LR, I4/LR, I7/LR, D11/LL, S11/LL, F9t/LL	О	17	Н	0,63	0,00
C6	19		О	7	Д	0,18	0,52
C7	22		Д	6	Д	0,00	0,61
S1	3505		Д	8	Д	0,27	0,41
S2	3049,4		О	15	П	0,60	0,10
S7	1061		Д	9	Н	0,44	0,47
S9	0		О	1	Н	0,58	0,00
S11	0		О	3	Н	0,40	0,29
D3	391,7		О	15	Н	0,62	0,25
D4	4407		Д	3	П	0,34	0,37
PTRRYN1	10145,8		О	17	Н	0,63	0,00
FIN4	20444,2		О	15	Н	0,63	0,12
S1_7	3,3		Д	8	Д	0,20	0,49
PTRYN1t	-1342,7		Д	6	Д	0,00	0,56
FIN1	5131,1		Я	17	Р	0,63	0,00

Примечание:

Класс моделей 1: D3/HR (0,83); FIN16/HL (0,85); S2/HL (0,85); C6/LR (0,92); URSTED/LL (0,92); C5_9/LL (0,88); D_7/LL (0,89)

Класс моделей 2: I6/LR (0,81)

Класс моделей 3: FIN4/HR (0,76); FIN17/LR (0,80); I4/LR (0,76); I7/LR (0,76); D11/LL (0,77); S11/LL (0,71)

Класс моделей 4: F9t/LL (0,68)

Таблица 5

Модель жизнедеятельности (фрагмент для региона 65)

Имя модели	Год-квартал											
	2002–1	2002–2	2002–3	2002–4	2002–5	2002-6	2002-7	2002-8	2002-9	2002-10	2002-11	2002-12
D11	LL	LL	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR
D_7	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL
S2	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL	HL
S11		LL	HR	LL	HR	HR	LL	LL	LL	LL	LL	HR
I4	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR
I7	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR
D3	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR
FIN17	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR			
BURSTED	HR	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL	LL
FIN4	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR
C5_9	LL	LL	LL	LL	LL	LL		HR	HR	HR	LL	HR
F9t		LL	HR	HR	HR	LL	HR	HR	HR	HR	HR	HR
I6	LR	LR		LR	LR	LR		LR	LR	LR	LR	
C2_4	LL		LL	LL	LL			LL	LL	LL	LL	LL

Таблица 6

Характеристики моделей жизнедеятельности регионов СЗФО

Номер региона	Название	Число моделей пяти классов					Общее число моделей
		1	2	3	4	5	
4	Архангельская область	34	35	87	89	7	252
10	Вологодская область	149	36	115	42	6	348
16	Калининградская область	93	6	172	91	3	365
29	Ленинградская область	161	23	127	65	3	379
34	Мурманская область	52	21	114	129	8	324
35	Ненецкий автономный округ	326	0	127	23	0	476
37	Новгородская область	203	27	177	29	14	450
45	Псковская область	266	54	139	32	4	495
53	Республика Карелия	253	116	92	47	0	508
54	Республика Коми	55	1	178	107	4	345
65	Санкт-Петербург	380	4	123	25	0	532

в две группы: *классы 1 и 2* (механизмы системных моделей первой группы детерминируют каждое отдельно взятое состояние системы); *классы 3, 4, 5* (механизмы системных моделей второй группы ответственны за изменчивость и подвижность состояния).

Характер жизнедеятельности регионов иллюстрируют изменение числа и классов системных моделей по полугодиям наблюдаемого периода. Для примера показаны распределения числа моделей системных механизмов первой и второй групп по полугодиям наблюдаемого периода для четырех регионов округа (рис. 5).

Информационный, интеллектуальный, когнитивный, технологический ресурсы решений служат базой для генерации поведенческих портретов методами технологии генерации поведения. Все полученное знание передается технологии оформления решений, завершающей технологический цикл создания научной базы решений прикладных задач.

Заключение

Сложность открытых систем обусловлена их масштабами, гетерогенностью возникающих структур, взаимозависимостью гетерогенных компонентов. Моделирование открытых систем

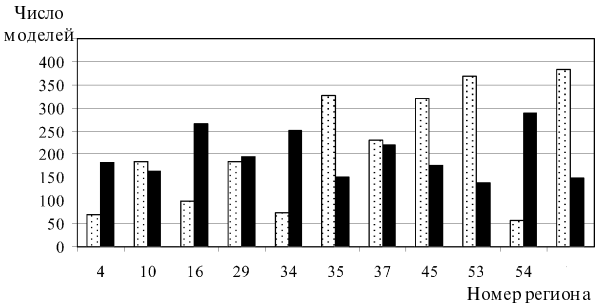


Рис. 4. Распределение числа системных моделей по регионам СЗФО:

серый цвет — модели первой группы;
черный цвет — модели второй группы

остро ощущает проблемы эмерджентности, системных иерархий, масштабируемых представлений, описания свойств в моменты их возникновения. Многодисциплинарное взаимодействие специалистов наталкивается на глубокие технологические проблемы. Огромные объемы эмпирических данных об открытых системах мало востребованы, используются в рамках статистического подхода, имеющего в таких применениях низкую продуктивность. Требуются новые идеи и методы научного понимания и рационального объяснения состояний и законов жизнедеятельности открытых систем.

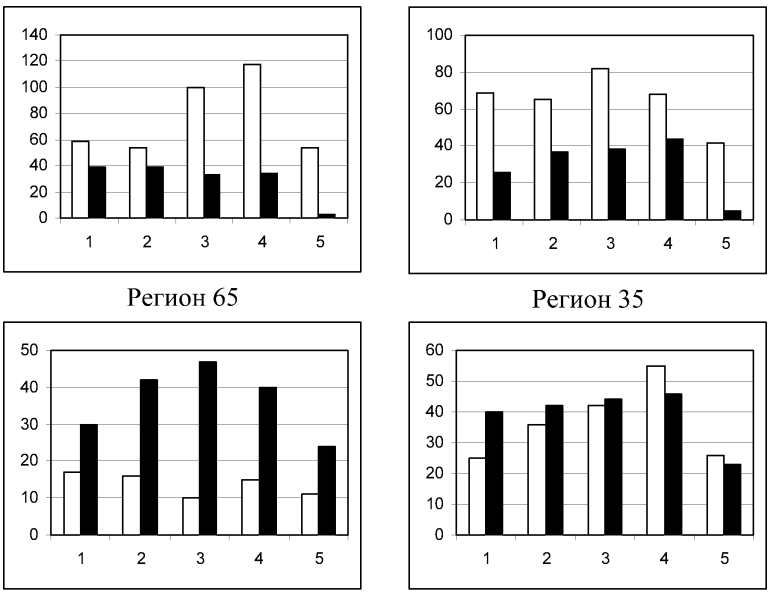


Рис. 5. Распределение числа и классов системных моделей по номерам полугодий

(белый цвет — модели 1 и 2 классов;
черный цвет — модели 3, 4, 5 классов) для четырех регионов

Созданные технологиями ФС ресурсы служат научным инструментом понимания и объяснения феномена социальной напряженности в регионах и округах РФ. Они дают объективные ответы на главные вопросы исследуемой проблемы. В них представлено системное знание следующего:

главных и существенных (идентифицирующих) показателей состояний субъектов РФ;

базовых структурах отношений, определяющих состояния и жизнедеятельность субъектов;

главных факторов жизнедеятельности субъектов;

критических параметров социальной напряженности в регионах и округах РФ, закономерностей их эволюции;

критериев оценивания социальной напряженности;

системных моделей, описывающих состояния субъектов в заданные моменты их жизнедеятельности;

механизмов, доминирующих в жизнедеятельности субъектов;

механизмов, порождающих ситуационную и событийную составляющие поведения субъектов;

социальной напряженности в отдельных субъектах, любых группах субъектов, России в целом;

настораживающих обстоятельств, угроз роста социальной напряженности;

правильности, полноты и завершенности понимания феномена социальной напряженности и связанных с ним проблем.

Глобальные реконструкции состояний и жизнедеятельности субъектов РФ дают возможность аналитическим службам региональных и федеральных органов государственной власти вести плановую подготовку обсуждений в ситуационных центрах, готовить и принимать управленческие решения в опоре на научное понимание и рациональное объяснение системного феномена социальной напряженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Качанова, Т.Л.** Физика систем— посткибернетическая парадигма системологии [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011.— № 3 (121).— С. 29–36.

2. **Kachanova, T.** Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge [Текст] / T. Kachanova, B. Fomin // 3rd Intern. Multi-Conf. on Complexity. Informatics and Cybernetics.— «IMCIC 2012».— March 25th–28th, 2012.— Orlando, Florida, U.S.A.

3. **Качанова, Т.Л.** Методы и технологии генерации системного знания [Текст]: Учеб. пособие для магистров и аспирантов / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.— 132 с.

4. **Ageev, V.** Physics of Open Systems: a new approach to use genomics data in risk assessment [Текст] / V. Ageev, B. Fomin, O. Fomin, T. Kachanova [et all.] // In Book: Risk Assessment.— Book 2 / Ed. M.G. Tyshenko.— InTech, 2012.

5. **Агеев, В.О.** Глобальные реконструкции состояний и жизнедеятельности открытых систем: социальная напряженность в округах и регионах РФ [Текст] / В.О. Агеев, А.В. Арасланов, Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин, О.Б. Фомин // Труды VI Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'07) / ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.— М., 2007.— С. 1–17.

6. **Качанова, Т.Л.** Введение в язык систем [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Наука, 2009.— 340 с.

7. **Качанова, Т.Л.** Технология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— Сб.: Проблемы инновационного развития.— Вып. 2.— СПб.: Политехника, 2003.— 146 с.

УДК 159.922.2:159.923:159.943

В.Н. Кругликов, М.В. Оленникова

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТИВАЦИИ И ПРОБЛЕМЫ МОТИВИРОВАНИЯ

В современных исследованиях мотивации, особенно применительно к мотивации персонала, о каких-либо проблемах практически ничего не говорится. Сложилась ситуация, когда при наличии большого количества теоретических разработок и практических методов их реализации отмечается определенная стагнация научного направления. Консультанты-психологи активно используют существующую теорию и практику для формирования систем мотивации персонала компаний, для разработки методов повышения эффективности его деятельности.

Рост российской экономики положительно сказывается на востребованности услуг по разработке и применению систем мотивации персонала. В работе кадровой службы это направление приобретает первостепенное значение. Если прежде проблемы мотивации персонала решались очень просто — повышением заработной платы или заменой одного сотрудника на другого, то теперь эти приемы перестают работать. На рынке нарастает кадровый дефицит, повышение зарплаты стремится к уровню, за которым оно становится экономически невыгодным, к тому же в условиях нарастания конкурентной борьбы за квалифицированных специалистов оно в принципе не дает прежних результатов. Сама жизнь доказала необходимость системного подхода к формированию мотивации персонала. При этом необходимо учитывать, что апробированные десятилетиями методики построения систем мотивирования все чаще не работают, эффект от их применения становится все более непродолжительным, да и сами классические теории мотивации начинают противоречить реалиям жизни. Отмеченные обстоятельства определяют актуальность нашего исследования.

Инструментарий практических психологов

В современной практике построения систем мотивации персонала нет практически ничего нового. Все предлагаемые сегодня подходы базируются на нескольких испытанных теориях. Наиболее часто используются: мотивационная теория Макклеланда; «Двухфакторная теория мотивации», или «Мотивационно-гигиеническая модель» Герцберга; «Теория *X* и *Y*» Макгрегора, а также процессуальные теории — «Теория ожиданий» В. Врума, «Теория справедливости» и модель Портера—Лоулера. Практически всегда так или иначе упоминается теория Маслоу; хотя она не имеет выраженного прикладного значения, но с ее помощью нередко пытаются обосновать приоритеты в мотивации персонала.

Иными словами, проблемы, теоретические недоработки и практические нестыковки, над которыми давно бьются ученые, во многом по-прежнему актуальны или даже приобрели еще большее значение. Если что-то новое и появилось за последние десятилетия, то это либо очень сложные и дорогостоящие технологии, практически неприемлемые для использования, или просто варианты прежних разработок. Поэтому на практике до сих пор используются старые испытанные методики и модели, которые, как и прежде, не гарантируют получения положительного результата. Их эффективность чаще всего не столь значительна, как прогнозируется, и весьма непродолжительна. Все это приводит к развитию негативных тенденций, связанных с потерей доверия к психологическим технологиям со стороны менеджмента компаний.

Противоречия и проблемы

Если непредвзято проанализировать ситуацию, то сразу сталкиваешься со странными противоречиями. Мотивация человека изучена сегодня достаточно хорошо, но все существующие модели мотивирования персонала опираются на положения, так или иначе противоречащие природе мотивации и выявленным ее свойствам. В первую очередь это относится к динамическим характеристикам мотивации. Вот некоторые из природных характеристик мотивации, которые редко учитываются при создании методик мотивирования:

Изменчивость — одно из основных свойств мотивации. Никем, в том числе и авторами упомянутых мотивационных теорий, не отрицается, что мотивация персонала зависит от множества факторов, что она меняется с течением времени, что изменения происходят довольно быстро и часто практически непредсказуемо. Тем не менее в практике построения систем мотивации этот факт не учитывается. Естественно, что при использовании статичных моделей, определенные средства мотивирования, которые вчера давали хороший результат, сегодня могут оказаться абсолютно не результивными и, наоборот, то, что вчера показало свою неэффективность, сегодня может быть использовано с большим успехом.

Индивидуальность. Мотивация явление индивидуальное: мотивационные поля у разных людей имеют существенные различия. Однако в базовых теориях слабо отражено многообразие этих различий. Наиболее показательны в этом отношении теории Маслоу и Макгрегора. В теории *X* и *Y* утверждается, что есть всего два типа людей, отличающихся своим отношением к работе. Исходя из этого предполагается выстраивать универсальную систему мотивирования таких сотрудников.

Основным аргументом в пользу использования такого представления считается необходимость массового подхода к мотивированию. Действительно, какой смысл изучать мотивацию отдельного сотрудника, когда их сотни или даже тысячи. Следовательно, можно предположить, что при использовании подобных теорий ориентируются на усредненный психологический портрет работника. Но здесь возникает очередное противоречие. Для того чтобы составить усредненный портрет сотрудника, необходимо исследовать индивидуальные мотивационные предпочтения персонала, а это как раз не предусматривается. Если же провести такое исследование, текучесть кадров чаще всего быстро сведет его результаты на нет. Кроме того, неизвестно какой результат будет получен и насколько он будет соответствовать формуле, которая заложена в канву известных теорий. Очевидно, что у сотрудников различных подразделений, разных специальностей, видов деятельности и разного статуса должна быть различная мотивация, в противном случае они будут профессионально некомпетентны. Такое исследование становится достаточно громоздким и дорогостоящим.

Согласно другому аргументу в пользу использования упомянутых теорий специально исследовать ничего не нужно, поскольку и так известно, что любой среднестатистический человек всегда стремится к деньгам, власти, славе и благополучию, т. е. его основные мотивы известны заранее. Очевидно, что это достаточно поверхностный взгляд.

Существует еще один аргумент, весьма условный. Возможно, усредненный подход к мотивации сотрудников можно обосновать тем, что все используемые теории были разработаны за пределами нашей страны и не учитывают российского менталитета. Е. Емельянов и Д. Тарантин, например, так объясняют изменчивость мотивационного состояния российских сотрудников: «Российский сотрудник хорошо делает только то, что он делает с душой. Он не может просто выполнять предписанные ему сверху процедуры. Это объясняет неровное качество работы персонала. В один день сотрудник пришел в хорошем настроении, любит свое дело и работает хорошо. Через день или даже в течение дня в связи со сменой настроения тот же человек может выполнить то же самое из рук вон плохо»*. По нашему мнению, этот аргумент еще раз свидетельствует об изменчивости и полизависимости мотивации. Особенность российского менталитета состоит в том, что порядок трудовой деятельности в нашей стране часто не регламентирован детально: отсутствует подробное описание функций и способов выполнения работ, не строго определена (возможно, еще не устоялась) структура профессиональных обязанностей по

* Маркетинг, менеджмент.— 2006. № 6. — http://www.mgmt.ru.

специальностям и должностям, как это имеет место во многих зарубежных странах. Поэтому трудно выполнять работу без определенного положительного настроя, без настроя на активную деятельность, или, как было сказано, без души, а с научной точки зрения — без мотивации. Ни одна из мотивационных теорий не учитывает эту духовную составляющую труда. Возможно, что и по этой причине в нашей стране терпят неудачу попытки выстроить с их помощью эффективные модели мотивирования.

Иерархичность. Это свойство мотивации вообще забыто. О нем пишут только в теоретических работах. С этим связано еще одно несовпадение теорий мотивирования и практики построения систем мотивации, они не учитывают иерархичность мотивационного поля. В этом смысле показательна пирамида Маслоу. Ее очень часто используют для обоснования приоритета одних групп мотивов над другими, но на практике она использоваться не может, поскольку все далеко не так просто, как хотелось бы. У каждого человека пирамида строится по своим принципам и может значительно отличаться от предложенных Маслоу иерархических приоритетов. Несмотря на то, что у каждого из нас социальным окружением культивируется уважительное отношение к деньгам, власти, славе и т. д., в связи с чем все эти глобальные мотиваторы и соответственно мотивы присутствуют у каждого, их иерархия сугубо индивидуальна. Мало того, она меняется с возрастом, с изменением статуса или жизненной ситуации. Но и это еще не все. Иерархичность мотивации предполагает, что для достижения одних и тех же целей люди могут использовать различные средства, различные маршруты, которые формируются по мере достижения человеком промежуточных мотивов-целей, которые в свою очередь определяются мотивами нижних уровней и психофизиологическими особенностями личности. Иными словами, если один человек предпочитает, например, строить карьеру, развивая свои умственные способности, то другой для достижения тех же карьерных высот предпочитает использовать активность, хитрость или агрессию, подкуп. Очевидно, есть и другие маршруты, число которых неограничено. Вот эта иерархичность мотивации в теориях мотивирования персонала никак не учитывается. Вероятно, авторы просто не придумали, как это можно учесть.

Цикличность. Все в нашем мире подчиняется законам колебаний. Мотив тоже цикличен. Мотив зарождается, растет, затухает. Хорошо известно, что близость к цели способствует нарастанию интенсивности мотивации, а после достижения цели наступает спад и затухание мотива. Длительное воздействие факторов, стимулирующих активность и способствующих возбуждению мотивации, как известно, также способно вызвать привыкание, снижение напряжения и последующее затухание или «выгорание» мотива. Человек не способен чего-либо хотеть постоянно со стабильно высоким уровнем побуждающей силы. Следовательно, одни и те же цели, факторы или средства не могут длительное время служить мотиваторами, одни и те же воздействия не могут давать длительный положительный эффект, на различном расстоянии от цели их эффективность будет различна. Отсюда становится понятным почему, например, система оплаты труда, которая, не приводит к периодическому повышению уровня доходов, теряет свое мотивирующее начало. Причем, если даже система предусматривает повышение уровня доходов с использованием фиксированной суммы, то со временем мотивирующее воздействие такой системы постепенно снижается.

Если теперь соотнести все это с используемыми методами мотивирования, то несоответствие становится очевидным. Между тем в теориях построения систем мотивации не учитываются и некоторые другие свойства мотивации человека.

Мотивация человека

Мы уже упомянули некоторые свойства мотивов, которые не учитываются в современных технологиях построения систем мотивации персонала, и сделали это примерно так же, как обычно описывают характеристики мотива, т. е. оторванно, обособленно. По литературным источникам весьма затруднительно составить целостную картину мотивации человека. Попытаемся сделать это.

Сначала еще раз перечислим основные характеристики мотива. Мы знаем, что мотив в своем развитии переменчив и цикличен, что у него есть периоды возникновения, нарастания интенсивности и спада, периоды затухания. Каждый мотив имеет свою продолжительность цикла жизни, свою текущую интенсивность, свою цель, после достижения которой снижение

интенсивности мотива неизбежно; но снижение интенсивности может быть вызвано и другими причинами. Все человеческие мотивы имеют иерархическую систему взаимодействия, причем у человека в разные периоды жизни иерархия мотивов по значимости может меняться. Человек подвержен влиянию всех видов мотиваторов, под воздействием которых у него могут активизироваться любые из известных мотивов, но активизируются они или нет — зависит от текущей ситуации и личной предрасположенности. Ситуация при этом может носить как внешне обоснованный, так и инициативный характер. Наконец, мотивация человека весьма нестабильна и индивидуальна. Она определяется как психофизиологическими особенностями личности, так и внешним ситуационным воздействием. Причем внешнее воздействие имеет явный приоритет, поскольку система ценностей человека изначально формируется под влиянием социального окружения, которое диктует нам, «что такое хорошо, а что такое плохо». Система общечеловеческих ценностей определена и перечень базовых ценностей не так велик, мы их уже упоминали — слава, деньги, власть, самосохранение, положение в обществе, первенство, здоровье и некоторые другие. Человек исходя из собственных возможностей и особенностей определяет для себя приоритеты и выстраивает свою индивидуальную систему ценностей, которая в свою очередь определяет вероятность возникновения мотивов. Исходя из перечисленного можно попробовать представить картину мотивационного поля человека. Совокупность мотивов по своим характеристикам очень похожа на морские волны. Возможно, наиболее наглядно будет сравнить мотивацию человека с поверхностью моря. Если каждый мотив — это отдельная волна со своей высотой и скоростью нарастания, которая накатывает со своего направления, то человек представляется некоторым мячиком, плывущим в направлении, которое зависит от того, с какой стороны удар волн окажется сильнее. При этом каждая большая волна гонит перед собой несколько более мелких — мотивы нижележащих уровней, а те в свою очередь гонят еще более мелкие волны и т. д. Направленность всех волн в принципе нацелена на человека. Те волны, которые выше и мощнее, воздействуют сильнее, а более мелкие — слабее. Мотивационное море полностью окружает личность, и волны накатываются со всех сторон, но суммарное усилие способно сместить мячик нашего мотивационного поля в определенном направлении. Итоговое воздействие всегда представляет собой частичное сложение усилий близких по направленности волн, а мелкие волны, достаточно удаленные от базовой, могут одновременно служить двум или даже трем «господам» — базовым волнам. Если результирующее мотивационное смещение приобретает некоторую регулярность или становится постоянным, то оно характеризует мотивационную направленность личности. Волны подталкивают нас к определенным действиям с разным усилием в течение времени, поэтому в периоды затишья возможно существенное воздействие даже со стороны слабых, незначительных волн или даже направленных против привычного движения, но такое воздействие носит обычно ситуативный, временный и случайный характер.

Совмещение мотивационных полей

Нужно ли, чтобы в компании работали разные по наклонностям сотрудники? Вопрос не для профессионалов. Разумеется, в компании нужны разные люди и важны индивидуальности, так как именно они способны на прорыв, способны на творчество, всегда готовы к принятию ответственных решений. Идеально, когда различными видами деятельности занимаются сотрудники, в наибольшей степени соответствующие по своим психофизиологическим данным именно этим видам деятельности. Другими словами, в успешной компании всегда работают разные по складу характера, а следовательно, и мотивационным пристрастиям люди, и именно это обеспечивает успех.

Из сказанного логически вытекает необходимость при разработке систем мотивации персонала научиться учитывать особенности мотивации как отдельного человека, так и коллектива в целом. Но как это сделать, когда мы такие разные и такие непостоянные? Если обратиться к научным исследованиям, то выясняется, что природа побеспокоилась о том, чтобы как-то упорядочить наши мотивационные побуждения и стремления, и предусмотрела определенные психологические механизмы.

Во-первых, нам на помощь в этом приходит адаптация. Мы назовем ее мотивационной адаптацией. Любой человек, попадая в новый кол-

лектив, вынужденно старается приспособиться к нему. Обычно это сопровождается изучением внутренней культуры и попыткой скорректировать свое поведение так, чтобы соответствовать ей. В первую очередь человек сравнивает принятую систему ценностей со своей. В случае несовпадения корректирует свое поведение, смягчая или заглушая непопулярные в данном коллективе мотивы и активизируя общепринятые. При этом происходит процесс синхронизации иерархии мотивов (во всяком случае, осуществляется попытка синхронизации).

Во-вторых, необходимо вспомнить о социально-психологических эффектах. Эффекты заражения, подражания, «волны», «ореола» и др. способствуют передаче мотивационных импульсов, актуализации определенных мотивов и трансляции мотивационного воздействия от мотиватора через промежуточное звено — человека (сотрудника) — к объекту воздействия (новичку). При этом психологическое состояние промежуточного звена часто играет роль усилителя. Исследования показывают, что в результате такого воздействия мотивы отдельных членов коллектива приобретают тенденцию развиваться синхронно с мотивами коллег по работе. В итоге получается, что как нарастание определенных мотивов, так и их снижение происходит у большинства сотрудников синхронно, что в общем-то мы наблюдаем постоянно. Причем это касается не только мотивов профессиональных, но и любых других. Всем известно, что когда в коллективе культивируются занятия спортом (начиная от шашек и заканчивая горными лыжами), КВНы или разведение цветов, то большинство сотрудников так или иначе втягиваются в процесс либо как непосредственные участники, либо хотя бы как заинтересованные зрители и болельщики.

Еще одним, не менее интересным и важным явлением в этом ряду является высокая вероятность формирования пар или цепочек взаимосвязанных мотивов, когда один мотив, теряя свою побудительную силу, как бы передает эстафету другому — родственному, который, наоборот, при этом набирает силу. Примеров таких пар можно привести много. Например, учебная мотивация порождает профессиональную; мотивация к занятиям спортом часто перерастает в стремление к здоровому образу жизни; мотивация к выращиванию цветов — в мотивацию к составлению букетов; мотивация к вождению машины — в мотивацию к ее ремонту или тюнингу. Передача эстафеты может происходить и на фоне переориентации. Известно, что от любви до ненависти один шаг. Так и мотив к вождению машины со временем может перерасти в мотив совершать пешеходные туристические походы и отказ от передвижения на транспорте.

Таким образом, хотя все люди разные, но, находясь в социальном окружении, вольно или невольно, они стараются не быть «белыми воронами» и становятся замотивированными (или незамотивированными) по образцу большинства. Хотя о полной синхронизации, конечно, говорить не приходится ввиду наличия внешнего воздействия со стороны внепрофессионального социального окружения (влияние семьи, друзей, партнеров по увлечениям).

Концепты создания систем мотивации персонала

Перечисленные особенности мотивации человека формируют достаточно сложную задачу по созданию системы мотивации. С одной стороны, при столь высокой изменчивости мотивационного поля человека возникают сомнения в реальности ее решения. С другой, — сложно отказаться от попытки разработать такую систему, тем более что известны все исходные данные. Наконец, в современных условиях так или иначе решать задачу нужно, этого требует рынок труда, требует нарастающая конкуренция.

Концептуально определить принципы построения системы мотивации, учитывающие ее динамические особенности, тем не менее достаточно легко. Наверняка, в их число должны войти следующие:

мотивация должна носить разнообразный характер. Система мотивации должна охватывать по возможности все сферы жизни сотрудника — профессиональную, социальную, личностную и т. д., а мотиваторы или стимулы должны быть как материального, так и морального свойства;

работа должна начинаться с разработки систем мотивирования отдельных обособленных групп персонала, выделяемых по виду деятельности, территориальному размещению и должностному положению (директорат, коммерческий отдел, юридический отдел, бухгалтерия, охрана);

вся система мотивации должна строиться по иерархическому принципу и создавать системы мотивирующих факторов как на индивидуальном уровне, так и на уровне подразделений, а в конеч-

ном счете, в масштабах всей компании, но применительно к сотрудникам каждого уровня;

активизация профессиональной деятельности, профессиональной мотивации должна производиться путем периодической актуализации и активации различных мотивов человека, причем они могут быть связаны как с профессиональной деятельностью, так и с другими аспектами жизни человека. Важно, чтобы происходила передача мотивационного побуждения от одних мотивов к другим, что предотвратит снижение общей активности сотрудника и положительно скажется на профессиональной деятельности;

подбор персонала должен осуществляться с учетом совместимости мотивационного поля кандидата и принятой в компании системой мотивирования. Серьезные расхождения могут привести к увеличению срока адаптации или полному отторжению нового сотрудника коллективом.

Анализ состояния вопроса о мотивировании персонала, таким образом, показывает, что существующие теории и технологии мотивирования опираются на отдельные свойства мотивации человека и не в состоянии обеспечить создание эффективных систем мотивирования. Возможность создания такой системы существует и связана в первую очередь с учетом динамических характеристик мотивации. При этом говорить о некоторой универсальной модели системы мотивирования, очевидно, некорректно, поскольку во многом она будет зависеть от особенностей компании, специфики ее деятельности, масштаба, количества структурных подразделений, приоритетов руководства компании, мастерства консультантов и других факторов. Можно говорить о концептуальных подходах к разработке системы мотивирования, которые и предложены в данной работе.

УДК 658.562 (075.8)

В.В. Глухов, В.Н. Тисенко, А.Д. Шадрин

ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТОВ МЕНЕДЖМЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Известно, что хорошее образование — это необходимое и достаточное условие для обеспечения конкурентоспособности человека на рынке труда в любой стране. Вместе с тем очевидно, что конкурентоспособность не должна быть целью деятельности, поскольку она может быть обеспечена не только достоинствами самого работника или предприятия, где он работает, но и недостатками конкурентов или просто их устранением. Конкурентоспособность это только средство. Цель любой деятельности человека — улучшение качества его жизни, а также жизни близких ему людей. Причем разные люди считают «близкими» разные группы — от одного-двух членов семьи до всего человечества.

Именно высокое качество, основанное на мастерстве, — самый надежный источник конкурентоспособности. Таким образом, любой специалист должен отчетливо понимать, что такое высокое качество и каким образом оно достигается. Ответ на эти вопросы не прост, именно поэтому у отдельных людей возникают различные неприятности, а предприятия и целые государства переживают кризисы.

Качество как цель деятельности

Решением проблемы качества международное сообщество активно занимается, можно сказать, в течение последних ста лет. Причем основные усилия специалистов направлялись на обеспечение *качества продукции*, под которым согласно ГОСТ 15467 понимается «*совокупность свойств продукции, обусловливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением*» [1].

К сожалению, люди в большинстве считают, что необходимые и достаточные признаки высокого качества продукции* — это высокий спрос на данную продукцию и высокая удовлетворенность потребителя. Однако это ошибка: потребитель достаточно часто активно потребляет продукцию не самого лучшего качества, причем порой во вред себе. И не только потому, что другая продукция ему недоступна, а очень часто потому, что потребитель — не специалист в данной области и просто не может отличить хорошее от плохого.

Лауреат Нобелевской премии Д. Акерлоф доказал: рынок не обеспечивает высокого качества. На рынке имеет место асимметричность информации: продавец и покупатель по-разному осведомлены о свойствах продукции. Покупатель в принципе не может хорошо разбираться в качестве любой продукции.

Кроме того, продукция, обеспечивающая высокую удовлетворенность потребителя и производителя (продавца), нередко наносит ущерб другим заинтересованным сторонам и (или) обществу. И примеров тому множество — тут и контрафактная продукция, и торговля наркотиками, и коррупция, и т. п.

В результате на рынке, где во все времена и во всех странах осуществляется и обмен и обман, зачастую отсутствует доверие.

Д. Акерлоф констатировал: отсутствие доверия на рынке приводит к тому, что продукция высокого качества вытесняется дешевой («доступной»), но низкокачественной продукцией —

* В соответствии с ИСО 9000 под «продукцией» в статье понимаются любые результаты деятельности людей — и товары, и услуги, и произведения искусства, результаты образования, медицины, политики и т. д.

во всех областях. Мы в России, к сожалению, в последнее время наблюдали этот процесс в полной мере.

Рынок без доверия, основанного на четких и всеми соблюдаемых законах и правилах, стимулирующих высокое качество, разрушает и экономику, и государство, и общество.

Формированием доверия к себе и к своей деятельности люди и организации озабочены достаточно давно. А примерно лет 25 назад международное сообщество с этой целью стало разрабатывать стандарты в различных областях менеджмента. Первыми из этих стандартов стали стандарты ИСО серии 9000 по менеджменту качества. Причем принципиально важно то, что эти стандарты посвящены не просто «качеству», а именно *менеджменту*, *т. е. системе управления организацией*.

В международном стандарте ИСО 9000:2000 (2005) (и в ГОСТ Р ИСО 9000–2008) дано принципиально отличное от [1] определение: «*Качество — степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования*» (degree to which a set of inherent characteristics fulfils requirements) [2], причем речь идет о требованиях не только потребителя, а всех заинтересованных сторон.

Другими словами, в соответствии с ИСО 9000 качество — это не «совокупность свойств», а отражение, результат, который данная совокупность свойств вызывает у заинтересованных сторон. Следовательно, высокое качество — это высокая степень удовлетворения требований всех заинтересованных сторон.

Отметим три существенных момента понимания качества в соответствии с этим определением.

Первое. Степень, с которой выполняются требования, зависит от совокупности собственных характеристик не только объекта (продукция), но и субъекта, о требованиях которого идет речь.

Теория и практика управления (менеджмента) крайне редко обращают внимание на характеристики субъекта, который оценивает качество. А ведь даже в магазине или в ночном клубе, где, казалось бы, точка зрения покупателя на продукцию должна иметь преимущество перед всеми другими точками зрения, все не так просто: потребитель зачастую не может в полной мере оценить качество того, что потребляет. А уж когда речь заходит о более сложных проявлениях качества, например о качестве образования или качестве жизни, следует рассматривать собственные характеристики всех действующих сторон процесса.

Второе. Наличие многих заинтересованных сторон приводит к тому, что качество как степень выполнения требований может быть описано только с помощью распределения [3].

Третье. Наличие всех заинтересованных в качестве сторон позволяет утверждать, что высокое качество — единственная цель работы добросовестной организации. Так, например, прибыль, о которой часто идет речь как о цели, на самом деле является не целью, а средством для удовлетворения требований некоторых заинтересованных сторон.

Принципиальная проблема объективной оценки качества, а вслед за этим и реального повышения качества, состоит в том, что понятия «качество» и «качество продукции», которые означают разные объекты, в повседневном языке подавляющего большинства людей эквивалентны.

Качество продукции оценить сравнительно легко: если объективные характеристики продукции соответствуют установленным требованиям, качество продукции хорошее (отличное, удовлетворительное), не соответствуют — качество продукции плохое.

Конечно, каждый человек понимает, что качество любой продукции удовлетворяет потребности не в полной мере (а если в полной, то ненадолго). Но оценивать степень удовлетворения различных заинтересованных сторон объективно и без больших затрат люди пока умеют плохо и, видимо, поэтому обычно не разделяют понятия «качество продукции» и «качество».

В этой ситуации взаимосвязь между качеством продукции и качеством, например для случая оценки качества образования, может быть проиллюстрирована приводимым рисунком. При этом «качество продукции» представлено в виде результатов работы преподавателей, непосредственно передающих определенную совокупность знаний студентам. Эти результаты, безусловно, вбирают в себя и работу специалистов, разрабатывающих программы обучения, и методистов, и тех, кто обеспечивает инфраструктуру учебного процесса.

Вместе с тем студенты — разные, одни и те же передаваемые знания могут самым различным образом отразиться как на их знаниях, так и на их удовлетворенности процессом обучения. То же самое можно сказать и об удовлетворенности

других заинтересованных сторон (родители студентов, работодатели выпускаемых специалистов, общество — в лице правительства и органов местного самоуправления). Таким образом, заинтересованные стороны — это своеобразная «линза», «преломляющая» свойства продукции в ту или иную степень удовлетворенности (α). Причем $f(\alpha)$ — плотность суммарного распределения степени удовлетворенности разных заинтересованных сторон. Очевидно, что это распределение характеризует «статичное» состояние в рассматриваемый момент. В следующий момент оценка заинтересованных сторон и характеризующее ее распределение могут измениться.

Конечно, степень, с которой данная продукция удовлетворяет требования всех заинтересованных сторон, оценить гораздо сложнее, чем совокупность свойств продукции, благодаря которым она способна удовлетворять определенные потребности в соответствии со своим назначением. Но при современном уровне информационных технологий это вполне решаемая задача.

Причем противоречивость потребностей различных сторон позволяет говорить об улучшении качества только тогда, когда повышение степени удовлетворения потребностей одной стороны не приводит к снижению степени удовлетворения потребностей какой-либо другой стороны. Да, это условие выполнять трудно, но возможно. И такие примеры есть. Когда повышение степени удовлетворения потребностей одной стороны приводит к снижению степени удовлетворения потребностей какой-либо другой стороны, «побеждает сильнейший». Такие примеры тоже есть. Но это совсем не означает, что при этом улучшается качество.

Известно: для успеха главное — верно сформулировать цель. В соответствии с современными стандартами менеджмента качества совокупность свойств результатов деятельности, производимой добросовестной организацией, не должна быть ее целью. Другими словами, качество продукции не должно составлять цель, оно всего лишь инструмент достижения цели.

Стандарты менеджмента как инструмент улучшения качества

Следует подчеркнуть, что многие люди неверно понимают роль стандартов в реальной экономике. Обычно полагают, что стандарт содержит некие ограничения, и это правильно. Зачастую считается, что работать в рамках стандарта означает стоять на месте, отставать, и «выход за рамки стандарта» признается чуть ли не доблестью. А это уже ошибка.

Разработанный надлежащим образом стандарт вбирает в себя все лучшее, что сегодня известно науке и проверено практикой. Здесь уместна аналогия: все здоровые люди стандартны, отклонение организма от стандарта означает болезнь. Это не мешает людям быть бесконечно разнообразными. И человеческая нравственность — это тоже стандарт. Известно: все счастливые семьи счастливы одинаково. Точно так же все благополучные организации успешны потому, что соблюдают определенные и в общем известные науке правила.

«Все умные люди — единомышленники. Это только дурак мыслит по-своему», — отмечает М. Жванецкий.

Известно: когда произошла какая-нибудь неприятность или авария, необходимо рассматривать три вопроса. Это случилось потому, что у нас не было стандарта? Это случилось потому, что мы не следовали стандарту? Это случилось потому, что стандарт не был адекватным?

Две отмеченные выше стороны качества сформировали два научных и практических направления развития стандартизации.

Первая сторона — это *управление качеством продукции*, т. е. совокупность методов, с помощью которых специалисты в конкретной области обеспечивают соответствие свойств конкретной продукции установленным требованиям. Такого рода методам студенты (строители, механики, физики, программисты, экономисты и т. д.) в значительной степени учатся в соответствующих вузах и на соответствующих факультетах. В процессе этого обучения студенты изучают теорию и практику реализации стандартов, касающихся данной специальности и данной продукции. Другими словами, *управление качеством продукции «встроено» в каждую специальность*, в этом суть любой специальности. Однако сегодня это — только необходимый минимум знаний для любого специалиста.

В условиях рынка конкурентоспособность специалиста и организации, где он работает, может быть обеспечена только на основе удовлетворения потребностей всех заинтересованных сторон, т. е. на основе *качества* — степени удовлетворения требований всех заинтересованных сторон. Развитием и практикой применения соответствующих методов занимается второе из

рассматриваемых направлений — *менеджмент* (качества, экологии, безопасности, риска и т. д.).

Известный специалист в области менеджмента И. Адизес (I. Adizes) считает, что «менеджмент», в принципе, нельзя определять через «управление». По его мнению, *менеджмент — это процесс, осуществляемый людьми, по обеспечению того, чтобы компания была эффективной и результативной в краткосрочной и долгосрочной перспективе.* Такая трактовка достаточно точно отражает сущность понятия «менеджмент».

Именно менеджмент есть предмет стандартов, о которых говорилось выше. В основе этих стандартов лежат принципы оптимального управления, сформулированные в кибернетике во второй половине XX-го века. Причем все эти стандарты ориентированы на достижение успеха в рыночных условиях, поэтому требованием, объединяющим все стандарты, является *постоянное улучшение* всех процессов организации.

У стандартов менеджмента две цели. Первая — это *формирование доверия* к той организации, менеджмент (система управления) которой соответствует данным стандартам. В этих стандартах определяется, «что такое хорошо» — и для самой организации, и для общества.

Вторая цель стандартов менеджмента состоит в том, чтобы способствовать *повышению эффективности* деятельности тех организаций, которые выполняют определенные правила. В этих стандартах даются рекомендации предприятиям любого размера и любой специализации, каким образом следует организовать взаимодействие людей и подразделений, чтобы с наименьшими затратами достигать поставленную цель.

Применение этих рекомендаций, которые во многих странах (в том числе и в России) принимают форму *национальных стандартов*, является добровольным для использования организацией. Но когда стандарт принят в организации к исполнению, его рекомендации становятся для нее обязательными требованиями.

Для следования тому или иному стандарту организация должна приложить определенные усилия. Однако это идет на пользу самой организации, поскольку она использует не отдельные «принципы», «шаги», «ступени», «ключи» и тому подобные рецепты отдельных авторов, которыми заполнены полки книжных магазинов, реклама и интернет. Организация совершенствует свою систему управления, используя научно обоснованный опыт лучших мировых компаний. При этом она может получить сертификат соответствия, который подтверждает квалификацию организации в данной области менеджмента. Для многих, в том числе российских, компаний такой сертификат служит надежным пропуском на международный рынок.

На сегодняшний день международные стандарты менеджмента применяются во всем мире сотнями тысяч самых разных организаций — от небольших частных фирм до крупных промышленных холдингов, университетов и органов государственного управления. Можно сказать, что эти организации переходят к новой, научно обоснованной *дисциплине, обеспечивающей конкурентоспособность*.

Разработаны десятки стандартов по менеджменту в различных областях деятельности людей: в экологии, обеспечении безопасности, в автомобилестроении, нефтяной и газовой отрасли, пищевой промышленности, телекоммуникациях, на железнодорожном транспорте, в образовании, муниципальном управлении, при выполнении проектов, в области социальной политики и т. д. Причем перечень и область охвата этих стандартов постоянно расширяются.

Вопросы качества сегодня интересуют всех, поэтому они достаточно широко освещаются в специальной литературе. Вместе с тем следует отметить, что, к сожалению, не все авторы, в том числе и наши коллеги, преподаватели СПбГПУ, достаточно хорошо знакомы с теорией, практикой применения и стандартами соответствующих научных дисциплин. В результате в доступных студентам публикациях зачастую имеются и неточности, и грубые ошибки.

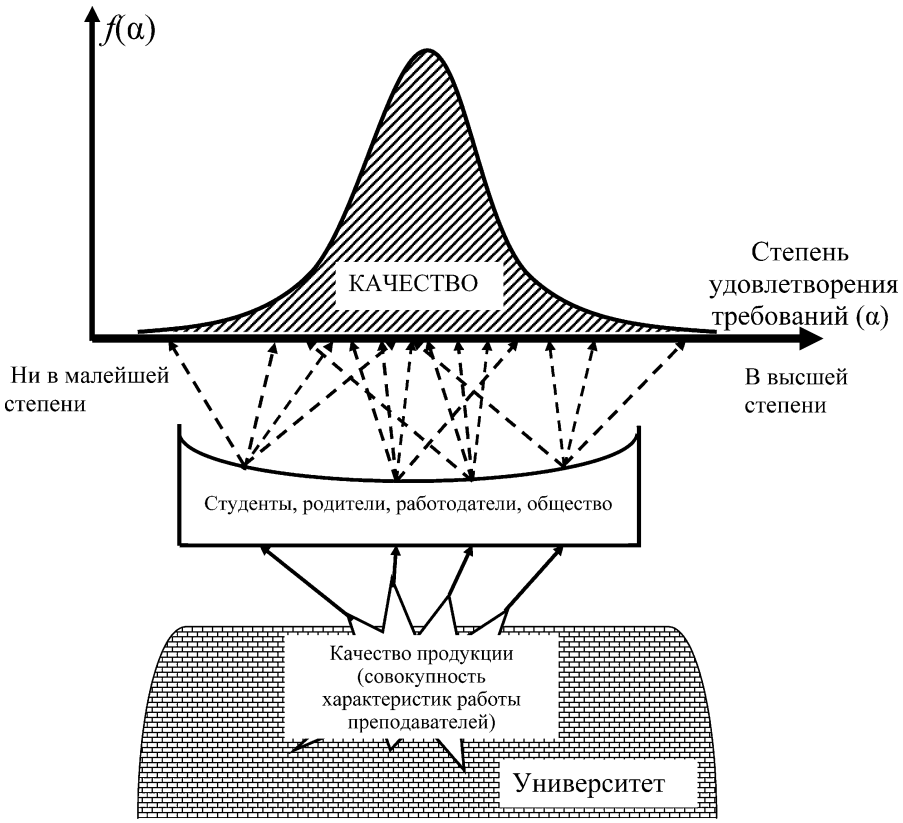
В учебниках порой приводятся определения «качества», отличающиеся от определения российских национальных стандартов (а ведь стандарт — это своего рода закон!) и отражающие только мнение автора. В результате у некоторых студентов (да и у некоторых немолодых специалистов) формируется искаженное мнение о теории и практике управлении качеством и менеджменте качества. Именно этот факт в значительной степени объясняет отставание нашей страны по качеству продукции и качеству менеджмента.

На наш взгляд, настала необходимость обучать студентов всех (как минимум, инженерных) направлений основам менеджмента на базе стандартов, чтобы создавать у них дополнительную компетенцию для успешной конкуренции в условиях развитого рынка.

Измерение качества

Их сказанного следует, что качество можно и нужно улучшать. А сделать это можно, лишь научившись «измерять» качество (степень удовлетворения требований всех заинтересованных сторон) в рамках выбранной шкалы. При разработке системы оценивания необходимо решить две основные задачи: создать систему метрик оценки (показатели, характеризующие оцениваемый объект, например качество работы университета) и выбрать метод вычисления, например комплексный показатель, являющийся «сверткой» множества значений единичных показателей, каждый из которых характеризует качество с определенной стороны. Такая «свертка» дает возможность принять решение по значению единственного комплексного показателя, а не по значениям множества единичных, что значительно легче и полезнее, так как, например, легко можно проводить сравнение качества по комплексному показателю для различных целей.

Задача 1. Создание системы метрик оценки. Очевидно, что для оценки качества необходимо разработать такой перечень показателей, который будет отражать потребности всех заинтересованных сторон. Перечень удобно представить в виде иерархической древовидной структуры. Пусть мы анализируем качество проекта «создание нового образовательного направления». При этом целесообразно, прежде всего, понять, чьи потребности должны быть удовлетворены при реализации данного проекта. Составим перечень заинтересованных сторон: представители университета (владельцы или руководство, нанятый персонал), потребители услуг и продукции университета (студенты, будущие работодатели, потребители результатов научных разработок), общество (заказывающее и оплачивающее образовательные услуги и научные разработки), поставщики университета (организации среднего образования и др.). Отметим, что потребности каждой из заинтересованных сторон, как правило, находятся в противоречии с потребностями других сторон.



Связь между качеством продукции и качеством в университете

На следующем уровне рассматриваемой структуры проведем разбиение потребностей сторон на группы, например на «показатели, характеризующие свойства продукции», «показатели, характеризующие проект» и т. д. После этого группы разбиваются на подгруппы следующего уровня: свойства продукции (пусть это будут выпускники нового направления) могут быть представлены совокупностью компетенций выпускников и специфическим показателем «инновационность проекта», а также такими характеристиками проекта, как финансовые, кадровые, временные и т. д. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет создана возможность простой количественной оценки каждого показателя (в рублях, днях, баллах и т. д.). Эти показатели могут быть «измерены» непосредственно (например, деньги и времена могут быть взяты из бизнес-плана проекта) или оценены экспертно (например, степень инновационности проекта). Таким образом, последовательное рассмотрение всех ветвей дерева дает перечень метрик оценивания (показатели нижнего уровня), а соединения между показателями двух соседних уровней (ветви дерева или дуги графа) определяют причинно-следственные связи между показателями. Полученный граф можно использовать как для оценки качества работы университета в целом, так и для оценки качества отдельных проектов университета. В зависимости от конкретного проекта из перечня потребностей выбираются конкретные, а в зависимости от целей проекта и приоритетов лиц, принимающих решение (ЛПР), — характеристики связей причинно-следственной модели (например, путем введения весовых коэффициентов).

Задача 2. Выбор метода «свертки» единичных показателей (характеризующих выявленные потребности заинтересованных сторон) — получение того комплексного показателя, который и нужен ЛПР. Поставленная задача очень важна для оценки, так как от корректности метода «свертки» зависит и корректность получения значения комплексного показателя, характеризующего качество выполнения проекта. Эту задачу приходится решать в условиях неопределенностей, когда нет возможности создать строгую аналитическую модель, связывающую значения единичных показателей и комплексного показателя качества проекта. Принимая во внимание результаты анализа существующих методов раскрытия таких неопределенностей, проведенного, например, в [4], рекомендуем применение одной из нечетких логик — логики противоположностей (антонимов), созданной Я.Я. Голотой [5]. Как и в других математических логиках, в логике антонимов (ЛА) рассматриваются объекты простые и сложные. Сложные связки образуются с помощью операторов α, β, γ. Первая из них — одноместная, вторая и третья — двухместные. Объекты вида A и неA (отрицание A) образуют антонимические пары. Чем больше оценивается один, тем меньше другой, и наоборот. В сумме же обе эти оценки никакой константы не образуют. В этом одна из отличительных черт ЛА. Напомним, что в булевой алгебре объект неA является дополнением объекта A до единицы. Двухместные операторы β и γ по разному связывают элементы: оператор γ связывает теснее, чем оператор β. Тесная связь γ означает, что одновременно с обращением в ноль оценки одного из элементов совокупная оценка также становится равной нулю, слабая же связь β подразумевает, что обнуление одного из элементов приводит к уменьшению всей совокупной оценки, но не настолько, чтобы она обратилась в ноль.

Любому объекту рассмотрения в ЛА может быть поставлено в соответствие любое неотрицательное число. Последовательное применение правил ЛА позволяет определять число, которое ставится в соответствие сложному объекту (в нашем случае — качеству проекта), путем вычисления значения некоторой функции от многих переменных. В ЛА доказывается теорема, утверждающая, что, как бы ни был сложен объект рассмотрения, всегда может быть получено число, ему соответствующее, если элементарным объектам, из которых состоит сложный объект, поставлены в соответствие числа [5]. В ЛА противоположности, символизируемые знаками A и αA, связываются уравнением

$$H[\alpha A] = -\log_2 [1 - 2^{-H[A]}],$$

где $H[A]$, $H[\alpha A]$ — числа (значения функционала H, определенного на A), причем $H[A] \in [0, \infty]$.

Я.Я. Голотой доказано, что если элементарные объекты связаны тесно, то справедливо выражение $H[C] = -\log_2[1 - (1 - 2^{-H[A]})(1 - 2^{-H[B]})]$, а в случае слабой связи справедливо выражение $H[C] = H[A] + H[B]$, где A, B, C — рассматриваемые объекты (в нашем случае — потребности заинтересованных сторон на первом уровне графа),

а $H[C]$, $H[A]$, $H[B]$ — числа, обозначающие степень отношения (оценку) к объекту. Не будучи физическими величинами, они могут рассматриваться лишь в сравнении с себе подобными в одной системе оценок. В нашем случае эти числа определяются оценкой единичных показателей в шкалах в диапазоне [0, 1]. Крайние точки шкал соответствуют значениям показателей потребностей соответственно для «самого плохого» проекта (0) и для «идеального» проекта (1). Определив характер связей (тесная γ или слабая β) между показателями разных уровней и руководствуясь вышеприведенными выражениями, можно рассчитать оценку комплексного показателя, характеризующего качество проекта.

Важно отметить, что полученная комплексная оценка может рассматриваться только в сравнении с аналогичными объектами. Таким объектом может быть, например, «идеальный» проект (в котором значения всех показателей соответствуют правым границам шкал). Тогда сравнение рассчитанного комплексного показателя рассматриваемого проекта с комплексным показателем «идеального» варианта проекта показывает, насколько он далек от «идеального».

Если же ЛПР интересует ход выполнения проекта во времени, то он может решить и эту задачу, рассчитав комплексные показатели для двух точек времени жизненного цикла проекта. Используя описанный метод, можно достаточно просто решать задачи ранжирования вариантов проектов в соответствии с рассчитанными комплексными показателями качества проектов. Использование ЛА (в сравнении, например, с традиционно используемыми в квалиметрии различными методами «свертки») дает очень важное преимущество — возможность учесть характер причинно-следственной связи между показателями проекта (тесную или слабую связь), которая отражается приведенными выше выражениями. Если же ЛПР сможет каждому из показателей проекта поставить в соответствие затрачиваемый ресурс (деньги, время, кадры и т. д.), то можно решать и следующую важную задачу — задачу поиска, например оптимального проекта при имеющихся ограничениях.

Примеры использования описанного метода для различных случаев показали, что разница между полученными результатами и результатами «измерения» с помощью методов квалиметрии достигает 50 %. Это свидетельствует о том, что метод, по крайней мере, заслуживает внимания и широкого практического применения.

Принятое мировым сообществом понимание качества как степени удовлетворенности всех заинтересованных сторон необходимо доводить до понимания всем студентам, в том числе инженерных специальностей, с тем чтобы они осознали, что главное в их последующей деятельности — учитывать потребности всех заинтересованных сторон, а не только некоторых из них. Такое понимание позволит им выполнять инженерные разработки, не просто удовлетворяя требования технического задания, но и делать это с меньшими издержками, что будет способствовать повышению конкурентоспособности и их как разработчиков.

В практике менеджмента качества необходимо научиться «измерять» качество, используя современные достижения системного анализа. В частности, целесообразно применять описанный метод, который отличается от известных в лучшую сторону: более адекватным отражением мнения ЛПР в графо-аналитической модели благодаря аксиоматике новой логики антонимов, получением количественной оценки качества (задача «анализа») и возможностью получения заданного качества при ограниченных ресурсах (задача «синтеза»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 15467–79** Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения [Текст].— М., 1979.

2. **ИСО 9000:2000.** Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Текст].— М., 2000.

3. **Шадрин, А.Д.** О соотношении качества и качества продукции в России [Текст] / А.Д. Шадрин // Стандарты и качество.— 2010.— № 7.— С. 56–59.

4. **Азгальдов, Г.Г.** О квалиметрии [Текст] / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман.— М.: Изд-во стандартов, 1973.— 167 с.

5. **Golota, Ya.Ya.** On a certain formalization of antonyms [Текст] / Ya.Ya. Golota // Fuzzy Sets and Systems.— 1992. № 45.

УДК 378.147

В.П. Горюнов

ГУМАНИТАРНЫЙ СТЕРЖЕНЬ СОВРЕМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

В рассмотрении социального бытия можно выделить три уровня: теоретический, идеологический, технологический:

на теоретическом уровне существование человека и общества объясняется, здесь их рассмотрение сугубо рационально, объективно;

на идеологическом уровне обосновывается существование тех или иных общностей и форм социальной организации как объективной исторической необходимости, речь идет об их существовании среди других общностей, а существование социума в целом, т. е. общества как такового, идеологического обоснования не имеет;

на технологическом уровне описываются способы деятельности, средства, обеспечивающие существование данных общностей и форм социальной организации.

Становление и развитие человека и общества объективно не заданы ни природной эволюцией, ни сверхъестественным духовным абсолютом. В настоящее время наука не может объяснить непосредственные причины и конкретный механизм перехода к социальному способу существования живого, сейчас можно говорить только об общем законе социального бытия. Суть человеческого способа существования живого состоит в выходе за пределы естественно-природного равновесия, а сам способ заключается в совместности существования (социальности). Фундаментальный закон социальности состоит в отношении «цель — средство», которое обусловлено тем, что совокупная масса ресурсов, непосредственно и опосредованно расходуемых на осуществление процесса производства, в конечном счете растет с опережением, в силу чего совокупная масса производимых средств жизни не способна заполнить требуемый объем потребления даже при условии его усредненности в уравнительном варианте распределения, оставаясь всегда меньшей по сравнению с той массой, которая обеспечила бы возможность существования всех участников производства. Это отношение может быть реализовано только с помощью техники, в чем заключается ее социальная сущность. Следовательно, всеобщая функция техники — быть материальным средством получения ресурсов жизни из природы — опосредована ее социальной функцией, т. е. превращением одного человека в средство жизнедеятельности другого человека. Иначе говоря, человек воздействует на природу силами другого человека, оснащенного техникой.

Критерий технического прогресса — функциональное развитие техники, т. е. увеличение возможностей человека в производстве ресурсов жизни из предметов природы. Поскольку техника в процессе ее использования в рамках отношения человека и природы не обеспечивает поддержания существования человека и ее развитие в этих рамках неосуществимо, постольку движущая сила технического прогресса находится в сфере общественных отношений, и такой силой является борьба за выживание. Более того, логично предположить, что даже само возникновение техники, а не только ее развитие, обусловлено борьбой. Иначе говоря, уже первые простейшие орудия воздействия на природу были созданы под влиянием конкуренции, а быть может, в первую очередь для непосредственного использования людьми друг против друга. Сейчас не принято подчеркивать в отношениях между людьми борьбу, используется более мягкое понятие конкуренции, и достоинством образования человека считается его конкурентное преимущество. Но, в конечном счете, под всем этим подразумевается борьба за существование.

Одна из современных российских проблем состоит в значительном расхождении профессиональной структуры наличного самодеятельного населения, особенно вступающего в самостоятельную жизнь поколения, и востребованной профессиональной структуры реальной общественной жизнедеятельности. В передовых устойчивых общностях люди, как правило, работают в соответствии с избранной и полученной в процессе образования специальностью, их социальная динамика вписывается в рамки

профессиональной деятельности в виде предсказуемого карьерного движения. Это является одним из оснований технологического лидерства таких общностей. В России слишком много людей занято простым зарабатыванием денег безотносительно к способу жизнедеятельности, но в этом случае оказываются наиболее результативными уже не столько профессиональные способности, сколько некие личностные качества. В итоге развитие общественного производства затормаживается, конкурентный процесс искажается, а индивидуальная жизнь теряет предсказуемую позитивную динамику, образование перестает быть стартовым началом определенного жизненного маршрута.

Применительно к России понимание объективных закономерностей общественного развития актуализируется кризисностью положения в большинстве сфер человеческой жизни, необходимостью принятия стратегических решений, не имеющих исторических аналогов, исключающих подражание, повторение путей, пройденных другими странами и оставленных в прошлом. Главная особенность современного положения России состоит в том, что, будучи технологически отставшей, она не может идти по пути догоняющего развития, ведущего в тупик. Следовательно, возникновение новой социальной реальности в России и вообще в мире обусловливает необходимость подготовки кадров нового типа, а значит, и качественных изменений системы образования, включая гуманитаризацию.

Исходным пунктом изменения образования в России стало то, что оно должно научить конкурентной борьбе, получению прибыли, а не обеспечивать некий общественный, даже не конкретный национальный интерес. В современных развитых странах нет острого противоречия между частной прибылью и национальным интересом, потому что источник прибыли — внешний, другие страны. Сам по себе труд не может принести прибыль, она возникает на основе обмена результатами труда. Даже если прибыль возникает внутри передовой страны, то все равно за счет внешнего источника — приезжей рабочей силы.

С началом перестроечных процессов в России оживленно велась дискуссия о школьных программах по гуманитарным дисциплинам, в частности по литературе. В контексте образовательных технологий речь шла о том, надо ли заучивать сами художественные произведения, изучать биографии авторов и т. п.? То же самое относится и к изучению истории — надо ли заучивать даты событий, биографии деятелей, какую историю вообще надо изучать — социальную или политическую. В контексте идеологии образования это относится к вопросу о единстве модели мира, общности элементов его картины, необходимой для понимания людьми друг друга. Без обязательного заучивания здесь не обойтись. Другой вопрос — о *содержании* модели мира.

Обсуждаемые проблемы образования в основном группируются по двум направлениям — идеологии образования (чему учить?) и технологии образования (как учить?). Идеология естественнонаучного и инженерно-технического образования имеет общечеловеческий характер, различие национальных образовательных систем в основном состоит в различии образовательных технологий.

В социальном образовании на первом плане находится идеология (чему учить?). Что вообще должен знать и уметь человек? Он должен иметь в голове модель мира (знания) и должен быть способен к практическому действию (уметь) для выживания в реальном мире. В сфере материально-предметной деятельности людей объединяют и позволяют получать высокие результаты, в первую очередь, умения, формируемые образовательными технологиями. Модель мира сама по себе в этой сфере ни объединяет, ни разъединяет людей. А вот в сфере социальной жизни эта модель стоит на первом месте. Единство содержательного наполнения картины здесь выражается в единстве культуры, и плюрализм здесь не пройдет, потому что он разрушает общность. Члены одной общности должны вырастать на общих сказках, с общими героями, с общим персонифицированным (типа русских сказочных персонажей) видением добра и зла. Если все сведется к тому, что люди едины в знании звезд футбола, рок-музыки, политики и пр., то общность распадется идеологически и вообще духовно.

Критерием выбора программного преподавания, чтения, запоминания служит направленность на формирование общей картины мира, единой нормативности. Классики искусства и литературы потому и остаются в исторической памяти, что они обеспечивают связь времен. В древности эту

функцию выполнял эпос. В условиях глобализации происходит взаимодействие культур, сильные подчиняют и уничтожают слабых. В частности, преобладающей тенденцией является вестернизация. Конечно, индивиды в состоянии освоить западную культуру, но при этом они остаются без корней и в большинстве своем теряют устойчивость собственного существования. Преобладание современной массовой культуры в ее зрелищно-развлекательных формах, допустимых для восприятия людей не ниже совершеннолетнего возраста, поневоле вызывает опасение, что школьные программы заполняются по содержанию телевизионными.

В детстве закладываются нормативы, в которых добро и зло различаются абсолютно. Во взрослом состоянии людей в восприятии добра и зла грани между ними сглаживаются, добро и зло предстают в их относительности. Но если у детей будет изначально сформирован нравственный релятивизм, то люди не смогут жить вместе, общество погибнет в войне всех против всех. В тоталитарных обществах господствует идеология в ее идейно-политической выжимке, будь то коммунизм, фашизм, христианский или исламский радикализм и фанатизм. В демократических обществах все определяется рейтингом. Тут вступает в силу фактор подготовленности людей к пониманию относительности ценностей жизни. Если в школе не будут заложены абсолюты добра и зла, то во взрослом состоянии индивидов следует неизбежно ожидать преобладания ориентации на безликую, примитивную массовую культуру.

В передовых общностях духовный иммунитет образуется с детства, поэтому в них востребована высокая культура. Передовое свободное общество более мифологизировано, но от тоталитарных обществ оно отличается тем, что его мифологизация имеет демократические основания. В передовом обществе и за пределами школы продолжается программирование ценностей, овладение достижениями высокой культуры является обязательным, без этого невозможно быть признанным «своим». Социальное знание изначально идеологично в том плане, что оно не может быть общечеловеческим, будучи ориентированным на интересы общности в ее борьбе на выживание среди других общностей.

Образование и культура представляют собой формы духовного производства (сфера услуг), продукт которого — сознание человека. Образование — это содержательное наполнение сознания как идеальной модели мира, которой руководствуется человек в своей жизнедеятельности. Следовательно, качество образования задает общий способ жизнедеятельности человека, а не ограничивается его функциональными способностями. Оно определяется рыночным механизмом — спросом и предложением. Хорошее образование — то, которое востребовано, на которое есть спрос (спрос на получение образования и на потребность в специалистах с хорошим образованием). Чем выше в общности потребность в образовании, тем выше уровень ее развития.

В лидирующих общностях сосредоточивается мощный человеческий ресурс, главное содержание которого заключается в высоком профессионализме населения. Иначе говоря, в этих общностях вся жизнедеятельность (бытовая, производственная, управленческая и т. д.) осуществляется профессионально по меркам самых передовых технологий, а значит, она максимально эффективна, что обеспечивает преимущество лидирующей общности в обмене результатами жизнедеятельности с другими общностями.

История знает достаточно примеров, когда судьба страны определялась ее системой образования. Для России XX века это было особенно показательно, ибо именно интеллектуальный потенциал, созданный благодаря передовому образованию, обеспечил прочную базу ее могущества. Исходный критерий оценки образования, необходимого России XXI века — способность образования обеспечить инновационное развитие. Иного пути перехода в разряд мировых лидеров не существует.

Терминологические различия между школьными предметами обществоведения в СССР и обществознания в современной России, а также между вузовскими циклами бывших общественных наук и нынешних гуманитарных и социально-экономических наук уже кажутся малоинтересными. Но вопрос о собственно научности содержания дисциплин, относящихся к вышеперечисленному ряду, имеет принципиальный характер и весьма актуален в практическом плане. Важно определиться по двум главным позициям: во-первых, действительно ли гуманитаризация необходимо присуща высшему образованию; во-вторых, в чем ее содержательный смысл?

В самом широком плане гуманитаризация означает представление человеческой деятельности как общественного процесса, который, следовательно, в любой сфере осуществляется в соответствии с законами общественного функционирования и развития.

В частности, гуманитаризация высшего технического образования обеспечивает понимание общественного содержания материально-технической деятельности во всем многообразии ее проявлений. Речь идет о том, что естествознание и техника изначально служат составными элементами общества, они создают его материальное тело. Однако вплоть до XX века общественная природа техники была эмпирически данной, и линия технического прогресса формировалась непосредственно в процессе материального производства. Но материально-техническое развитие общества больше не может оставаться стихийным процессом, его надо направлять, дальше идти наощупь нельзя, ибо технологическая стихия ведет в тупик. Масштабы и сложность современного материально-технического развития требуют научно обоснованного управления этим процессом. Соответственно, научное понимание техники не сводится к ее естественнонаучному объяснению, оно необходимо предполагает и ее социально-научное осмысление.

Естествознание, объясняя природу, устанавливает некие ограничения, запреты в области материально-технической деятельности, указывает — *что* невозможно или нельзя делать и только через это «невозможно» и «нельзя» определяется круг того, что возможно и можно. Оно не предписывает того, как должно падать тело, а просто описывает реальное падение, т. е. то, как тело падает. Оно не говорит — правильно ли текут реки, хороший или плохой климат и т. п. Естествознание не указывает человеку, что нельзя прыгать с большой высоты без технических средств, что стены домов надо ставить вертикально, а фундаменты класть горизонтально, — оно только указывает закон, а люди сами делают выбор.

От Ньютона никто не требовал определения способов применения открытого им закона всемирного тяготения и, тем более, способов его преодоления. Важно, что стало понятно, почему стены домов должны быть вертикальными. Так и знание законов социальности должно стать для социального конструирования тем же, что и законы механики для строительства зданий. Научные законы не предписывают ни истинное количество этажей в домах, ни истинные способы распределения в них квартир, они только объясняют условия, которые надо соблюдать, чтобы дома и общества не разрушались сами собой.

Технические науки означают получение знания об искусственно созданных процессах, веществах, системах. На фундаментальном уровне исследований в технических науках получается знание, не ограниченное какими-либо конкретными изделиями, тогда как прикладные исследования связаны с созданием определенных систем и технологий. Здесь, казалось бы, можно считать, что в технических науках нет ничего, кроме приложения достижений естествознания. Действительно, в технике нет ничего, кроме движущихся предметов и процессов природы, однако, с другой стороны, техника — не природное, а общественное явление, и к предмету технического знания относится также социальное содержание техники, которая не может рассматриваться только как приложение естествознания. Поскольку социальность техники предметно (субстратно) выражена, постольку она составляет относительно самостоятельное содержание технических наук.

Современность в этом плане показывает нам два убедительных примера. В первом случае речь идет о судьбах атомной энергетики, социальное содержание которой в виде потенциальной угрозы для людей оказывается непреодолимым препятствием для дальнейшего развития отрасли, несмотря на ее глубокую научную изученность и практическую проверенность. Здесь мы имеем дело с недостаточностью знания природы. Второй пример взят из области социальной жизни, которая все более требует материально-технического регулирования в виде противодействия терроризму, разбою, хищениям, электронному мошенничеству и т. п. Здесь мы имеем дело с недостаточностью знания общества. Но оба примера демонстрируют отсутствие позитивно-научной определенности в понимании перспектив материально-технического развития и безусловную необходимость осмысления техники на философском уровне обобщения, позволяющем удержать ее в поле общественного интеллекта.

Как содержание техники составляет преобразованная природа, так бесконечность форм природы обусловливает бесконечность форм техники. Но в той мере, в какой преобразование

природы ориентировано на существование человека, формы техники определяются его собственными природными и социальными формами. Однако бесконечное многообразие мира, лишающее его собственной определенности, лишь относительно упорядочивается общественной практикой человека, поскольку эта практика лишена определенности в общеисторической перспективе. Иначе говоря, за постнеклассическим пониманием науки, выражающимся в конечном счете в отказе от поиска объектной определенности мира (в поэтапном переходе от признания вероятностного характера познаваемых процессов к утверждению феноменологичности познания, совершающегося через ощущение, показание прибора, математическую модель), следует постнеклассическое понимание техники, а в более широком плане — техносоциального бытия, состоящее в обнаружении того факта, что знание и техника — это товары, ценность которых определяется не соответствием объективной реальности и сущности человека, а раздутой с помощью рекламы востребованностью на рынке.

Наряду с объективными закономерностями и пределами в субстратном развитии техники есть свои закономерности и пределы в познании. Предельна или беспредельна природа? И, одновременно, пределен или беспределен разум? Познание всегда исторически ограничено. Но до последнего времени оно шло впереди материальной практики и переход к новым технологическим способам жизни во многом базировался на уже созданных познавательных заделах. Сейчас, скорее, потребности практики идут впереди познавательных возможностей, и нельзя исключать возникновение такой ситуации, когда обществу, способному в принципе познать любые природные явления и преобразовать их в необходимые для производства ресурсов жизни состояния, просто не хватит времени до наступления всеобщего технологического кризиса.

Материально-техническое развитие общества не имеет принципиальных пределов ни по источникам потенциальных ресурсов жизни в природе, ни по интеллектуальным способностям людей вовлекать эти ресурсы в производственный оборот и управлять отходами жизнедеятельности. Следовательно, нет абсолютного экологического порога в существовании социума. Однако реализовать беспредельность человеческой жизни на Земле можно только на базе научно-технического прогресса и социальной гармонии.

При таком рассмотрении техники ее суть представляется глубоко социальной и технический прогресс считается органичной составляющей социального процесса. Следовательно, научное исследование законов материально-технического развития в значительной мере относится к сфере гуманитарных и общественных наук.

Четкое видение общественного содержания материально-технической сферы и в целом общественный характер мышления в этой области деятельности востребованы в настоящее время рядом обстоятельств общечеловеческого и специфически-российского плана. Рассмотрим наиболее важные.

Переход к инновационному развитию, вызванному исчерпанием традиционных способов жизни — технологического, организационно-производственного, социально-политического, духовно-культурного. Наиболее остро здесь представлены экологические и демографические проблемы. У общества больше нет известного пути развития, оно вынуждено постоянно и во всех областях переключаться на что-то новое, неиспытанное, непроверенное. Наука стала главным, если не единственным, источником пополнения ресурсов жизни, нахождения возможностей для дальнейшего существования людей. Гуманитаризация в данном случае предстает как переход к системному образованию, которое по самой сути своей гуманитарно в том смысле, что его предметом является общество, человеческая жизнь во всех ее проявлениях, а не в том, что оно напичкано дисциплинами гуманитарного и социально-экономического цикла.

В условиях глобальных проблем существования общества в природе и глобализации системы социального взаимодействия друг с другом людей, сосуществующих на Земле в более чем семимиллиардном количестве, управление обществом также приобретает глобальные масштабы. Речь не идет о едином человечестве и мировом правительстве, поскольку субъекты социума — это отдельные общности и их объединения, ведущие борьбу за существование с другими общностями и их объединениями. Человечества как единого субъекта, организующего свою жизнь в природе, не сложилось, однако корреляция материально-технического, экономического и со-

циально-политического развития отдельных общностей осуществляется в глобальных масштабах. И без понимания общественного содержания человеческой жизнедеятельности в данном аспекте не обойтись ни в какой сфере. Глобализация заставляет определиться с национальными интересами и приоритетами в условиях их всеобщего переплетения по главным направлениям общественного развития, обостряется проблема обеспечения их национальной ориентированности. Транснационального в чистом виде не существует, корпоративность так или иначе имеет свое гражданство.

Россия традиционно нуждается в гуманитаризации, связываемой не столько с образованием, сколько с воспитанием, наделением людей особой духовностью, готовностью к самоотверженности, чего не может быть на Западе в силу его благополучия, рациональности. У России другая мерка. Кто провозглашает курс на превращение России в одну из среднестатистических стран, тот либо не понимает России, либо враг ей. При этом идея особенности России не вытекает из классовой или религиозной идеологии, она отражает объективные обстоятельства борьбы за выживание, за сохранение целостности. Разумеется, это тоже идеология, органично присущая гуманитаризации, но она не провозглашает мнимого превосходства. Гуманитаризация выполняет определенную идеологическую функцию, ибо право на существование надо уметь доказывать, хотя конечный аргумент всегда силовой.

Таким образом, гуманитаризация не ограничивается обеспечением понимания общественного статуса естествознания и техники, она в первую очередь обеспечивает понимание общественного статуса самого человека, его принадлежности к определенной исторической общности и взаимозависимости индивидуальной и общественной жизни. Если, например, предприниматель не видит себя в более широкой общественной системе, в которую вписывается и от которой зависит его жизнедеятельность, и руководствуется только сиюминутной выгодой, он социально безответственен и просто безграмотен, а его существование в целом оказывается бесперспективным. Зрелое общество не позволит антиобщественного способа жизни своих членов, а незрелое общество само лишено перспектив. В настоящее время Россия проходит историческое испытание именно на социальную зрелость.

Образовательно-воспитательная функция общественных наук в системе советской высшей школы и дисциплин гуманитарного и социально-экономического цикла в современном российском высшем образовании по формальным признакам одна и та же — формирование определенного типа личности инженера, ученого, врача, учителя, творческого работника, управленца и т. д. В Советском Союзе изучение общественных наук концептуально было вполне определенным, оно вписывалось в общую задачу коммунистического воспитания населения. Однако коммунистическое воспитание по своему идеологическому стержню и теоретическому основанию оказалось иллюзорным, а кроме того, объективно было направлено против национального интереса, поскольку иллюзорной оказалась модель интернационализма. Как в плане внутреннего развития страны идея равенства обернулась мифом и при попытке практической реализации провалилась, так и во внешнем социальном взаимодействии идея интернационализма оказалась теоретически бесплодной и практически убыточной.

Необходимость нынешнего преподавания гуманитарных и социально-экономических дисциплин часто обосновывается расплывчатым тезисом о приобщении людей к общекультурным, абстрактно-гуманистическим идеям, способствующим становлению некой активной, творчески мыслящей личности без определенной социально-ценностной ориентации. Соответственно, было бы глубоким заблуждением сведение лозунга гуманитаризации инженерного образования к культурно-художественному воспитанию будущих специалистов в виде приобщения их к искусству во всех его формах и проявлениях. Здесь, в первую очередь, речь должна идти о формировании у инженерно-технических работников глубокого знания и понимания социального содержания (социальной составляющей) в материально-техническом развитии, вытекающего из социальной сущности техники. Только при этом условии можно добиться такого положения, когда в каждом техническом проекте будет определена и учтена его социальная составляющая, за счет чего технический прогресс действительно станет составной частью общественного прогресса и все технические достижения будут поставлены на службу человеку.

В связи с этим симптоматично создание университета в подмосковном Сколково, ориентированного на подготовку специалистов высшего уровня, способных управлять и распоряжаться национальным богатством. О конкретном содержании заявленной элитарности образования можно только догадываться, но то, что оно будет независимо от специальности в высшей степени целостно-гуманитарным, не вызывает сомнений, потому что речь идет о подготовке управленцев глобальной, предельно диверсифицированной экономикой.

При этом важно заметить, что гуманитарное мышление не складывается само по себе в ходе собственно профессиональной подготовки, оно требует наличия специальных дисциплин гуманитарного профиля. Если инженерно-техническому специалисту нужно знать, что такое природа, общество, человек, знание, познание, истина, наука, техника и т. д., и т. п., то из каких дисциплин, кроме гуманитарных, он это узнает? В России всегда был и еще долго будет востребован фундаментальный гуманитаризм образованных людей, возвышающий их над утилитарной экономической и политической натасканностью.

Гуманитарно-идеологический стержень западного мировоззрения — идея открытого общества. Мы не можем просто подхватить ее, потому что Россия не принадлежит к тем мировым лидерам, которым открытое общество выгодно, поскольку они выигрывают соревнование в нем и заинтересованы жить по его правилам. Для них модель открытого общества, модель открытых дверей представляет собой средство подчинения.

Вступление России в Болонский процесс — то же самое, что и вступление в ВТО. Вопрос — в каком качестве? Происходит включение человеческих ресурсов в общее движение ресурсообмена, эффективность которого определяется соотношением входной и выходной масс ресурсов жизни. Фундаментальность всегда была общепризнанным достоинством российской системы высшего образования. Большая доля фундаментальной составляющей в нем обеспечивалась общим высоким уровнем интеллектуального потенциала педагогических кадров, она не требовала больших затрат и потому была доступной даже в условиях ограниченности материальных ресурсов. В результате выпускники технических вузов, как правило, обладали высоким уровнем мировоззренческой и общенаучной подготовки, но изначально не были достаточно компетентны в узкоспециальных областях. Однако фундаментальность, будучи широкой базой образования, давала преимущество в том плане, что позволяла быстро адаптироваться к требованиям практики, а при необходимости даже переквалифицироваться и переходить в другие области деятельности. Поэтому не случайно многие крупные российские ученые, конструкторы и организаторы-хозяйственники выросли на плодотворном соединении отечественного фундаментального образования и зарубежных специализированных стажировок.

Таким образом, в современных условиях фундаментальная подготовка будущих научно-технических специалистов, не требующая при наличии высококвалифицированных кадров больших материальных затрат, приобретает характер подготовки интеллектуального сырья для завершающей стадии научно-технического образования. Модель придаточно-сырьевого развития России оказывается вполне реальной и в этой области. Образование стало одной из сфер неэквивалентного обмена России с окружающим миром. Система оплачиваемого государством образования делает его бесплатным для значительной массы отечественных потребителей и чрезвычайно дешевым для иностранных учащихся. Интеллектуальный потенциал страны оказывается в роли все тех же мехов, обмениваемых на стеклянные бусы, о чем давно и много сказано.

Идеология и технология образования находятся в противоречивом единстве друг с другом. Идеология предполагает рассмотрение образования в общественном аспекте, с точки зрения потребностей общности, тогда как образовательные технологии ориентированы на индивидов. Соответственно, единство идеологии и технологии в образовании подразумевает единство общества и личности как единство целевых установок, вытекающих из идеологии развития общности, от нее к идеологии образования и далее к идеологии развития человека. Следовательно, идеология образования, будучи производной от идеологии развития общности, есть идеология производства человеческого ресурса. Главная трудность здесь состоит в определении того, кто будет разрабатывать идеологию всех уровней, кому и какая идеология будет нужна.

В качестве вывода о значении гуманитаризации высшего образования отметим следующее: кардинальные изменения среды социального и производственного функционирования выпускников вузов требуют адекватной перестройки социально-экономического и гуманитарного образования, существенной корректировки и нового наполнения его теоретического содержания. В первую очередь необходим анализ содержания современной учебно-научной литературы по социально-экономическим и гуманитарным дисциплинам, изучение которых — составная часть высшего профессионального образования. Указанный анализ предполагает:

1. Оценку изменений в научно-теоретических представлениях об обществе и человеке в ходе реформирования общественной жизни в России, установление их влияния на мировоззренческие ориентации специалистов — выпускников вузов.

2. Концептуальный анализ содержания социально-экономических дисциплин (мировоззренческий, методологический и теоретический аспекты) путем экспертных оценок содержания стандартов, программ и учебников на предмет их соответствия современному уровню научных представлений об обществе и человеке.

3. Экспертные оценки содержания стандартов, программ и учебно-научной литературы последнего поколения по социально-экономическим и гуманитарным дисциплинам с целью определения их логической целостности и концептуальной сопряженности (выявление необоснованного дублирования материала, а также концептуальных разночтений). На этой основе откроется возможность оптимизировать содержание и структуру социально-экономического и гуманитарного образования, повысить его идейно-воспитательную эффективность.

4. Предложения по научно-теоретическому совершенствованию содержания литературы в области социально-экономических и гуманитарных дисциплин с целью приведения ее в более полное соответствие с новой социальной реальностью, сложившейся в России и во всем мире.

5. Разработку стандартов и макетов учебников нового поколения по основному блоку социально-экономических и гуманитарных дисциплин, обеспечивающих концептуальное (теоретическое) единство социально-экономического и гуманитарного образования.

Конечная цель — перевод гуманитарного знания на научные основания как главное условие гуманитаризации.

УДК 378.1:378.14

Т.Н. Носкова, Т.Б. Павлова

НОВЫЕ ПРИОРИТЕТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ СОВРЕМЕННОГО ВУЗА

Благодаря совершенствованию технической оснащенности образовательных учреждений, стремительному повышению доступности сетевых и интернет-технологий, во многом изменяются информационные условия, в которых происходит образовательный процесс в современном вузе. Возможности непосредственного общения в аудитории существенно дополняются различными видами пространственно распределенных коммуникационных связей, использующих вебразируемые ресурсы и сетевые сервисы. Различные форматы образовательного взаимодействия могут быть построены на основе таких свойств виртуальной коммуникации, как многоканальность, интерактивность, возможность взаимодействовать в отложенном режиме или в режиме реального времени, мультимедийность и пр. Но появление новых информационных средств и инструментов не является гарантией повышения качества образования, это лишь компоненты образовательной среды, обладающие высоким образовательным потенциалом. Исходя из того, что новые способы взаимодействия не замещают, а дополняют, расширяют традиционные возможности, можно говорить о виртуальной части образовательной среды, которая не суще-

ствует обособленно, а изменяет качество всей этой среды в целом, позволяет ставить и решать новые классы задач.

Необходимо отметить, что вопросы эффективности педагогической деятельности в образовательной среде современного вуза чрезвычайно важны как в отношении образовательных результатов, так и в отношении использования дорогостоящей инфраструктуры (мультимедийного и серверного оборудования, компьютерных классов и сетей).

Что является необходимым условием эффективного образовательного взаимодействия в виртуальной среде?

Согласно одному из определений информационная образовательная среда — это социально-психологическая реальность, в которой созданы психолого-педагогические условия, обеспечивающие познавательную деятельность и доступ к информационным образовательным ресурсам на основе современных информационных технологий [1]. Эти психолого-педагогические условия не формируются сами собой с развитием инфраструктуры, а являются непосредственным результатом профессиональной деятельности педагогического коллектива и каждого преподавателя в отдельности.

Средства и технологии обмена информацией с помощью компьютерных сетей (сетевые технологии) открывают в педагогической деятельности новые возможности, но и предъявляют к ней особые требования, которые должны быть осознаны и приняты преподавателями. Очевидно, что сегодня педагогическая деятельности в вузе направляется, в первую очередь, обновлением стандартов высшего профессионального образования, которые отражают происходящие социокультурные изменения. В соответствии с ними меняются цели, стратегии, задачи, содержание образования и способы организации образовательного процесса. В стандартах третьего поколения компетентностный и личностно-ориентированный подходы приняты в качестве ведущих, а в процессе освоения компетенций особая роль отводится организации активной самостоятельной работы студентов и индивидуализации их образовательного пути. Для этого учебный процесс необходимо строить как вариативный, нелинейный, адаптируемый к личностному образовательному и информационному запросу студента.

На практике такой гибкий личностно-ориентированный учебный процесс невозможно воплотить без опоры на сетевые информационные средства, поддерживающие деятельность педагога. Но есть еще один немаловажный аспект значимости виртуальной части образовательной среды при освоении компетенций — характер профессиональной подготовки должен соответствовать меняющимся условиям социокультурной жизни и отражать актуальные и перспективные тенденции изменений в профессиональной деятельности. Многие из этих изменений связаны именно с возможностями виртуальной среды и предполагают использование различных видов информационной активности в сфере решения образовательных и профессиональных задач. При этом стоит учитывать, что современные студенты выросли в период активного использования виртуального пространства, владеют различными способами действий в нем, воспринимают информацию в соответствии с особенностями этой среды. Также важно понимать, что сегодня особое значение имеют компетенции специалиста, связанные с применением информационных и коммуникационных технологий, и грамотное профессиональное информационное поведение — важная составляющая конкурентоспособности выпускника.

В чем проявляется специфика виртуальной образовательной среды и педагогической деятельности в ней?

Во-первых, в отличие от традиционного предметно-практического учебного окружения с ведущей ролью педагога, виртуальная образовательная среда — система открытая. Она характеризуется тем, что имеет распределенные информационные ресурсы и разнообразные каналы обмена ими с другими информационными средами. В ней можно взаимодействовать не только с ближайшим учебным окружением и субъектами, но и использовать потенциал глобального информационного и коммуникационного пространства.

Во-вторых, она предоставляет принципиально новые интеллектуальные инструменты для активизации знаний, формирования акту-

альных когнитивных и практических навыков, включения значимых на современном этапе развития общества социальных и личностных факторов. При определенных условиях она может стать для студента эффективным средством самостоятельной образовательной деятельности и постоянного профессионального саморазвития. Но для этого преподаватель должен осознать и принять новые профессиональные цели, в его деятельности должны появиться мотивы, связанные с сопровождением виртуальных взаимодействий на основе новых моделей деятельности, применения современных способов освоения информации и коммуникации с окружающим миром.

Иными словами, необходимое условие формирования такой среды — профессиональная деятельность педагога, который мыслит и действует по-новому, стремится к достижению целей и ценностей, адекватных инновационной экономике, постоянно саморазвивается в своей профессиональной деятельности [3].

По нашему мнению, необходимо действовать в двух направлениях.

Во-первых, необходимо организовать в вузе **специальную подготовку преподавателей** к сопровождению самостоятельной работы студентов в виртуальной образовательной среде. Такая подготовка должна способствовать осознанию преподавателем важности расширения спектра образовательных целей и приобретению умений решать педагогические задачи адекватно возможностям современной информационной среды. В процессе такой подготовки, наряду с технологической, особое значение имеют ценностно-целевой и рефлексивный компоненты. Ценностно-целевой компонент подготовки способствует осмыслению новых ценностных и целевых структур (отношения, установки, позиции), связанных с образовательным взаимодействием в современной информационной среде. Рефлексивный компонент формирует способность преподавателя производить анализ и постоянно совершенствовать свою педагогическую деятельность в виртуальном пространстве [4].

Во-вторых, необходимо гибкое **мотивирующее управление деятельностью преподавателя** со стороны администрации по созданию и использованию виртуальной образовательной среды. Педагоги, имеющие опыт применения информационных и коммуникационных технологий, отмечают, что она требует достаточно больших временных и интеллектуальных затрат. А это — значительный барьер, препятствующий получению полноценного эффекта от виртуального образовательного взаимодействия. Стимулирование и поддержка педагогической деятельности в данном аспекте, объединение электронных ресурсов, методическое и технологическое сопровождение деятельности преподавателя через систему информационно-ресурсных центров — все это способствует переходу от инициативного использования отдельных информационных и коммуникационных технологий к системному раскрытию потенциала распределенной образовательной среды.

Для определения необходимых направлений подготовки и управления информационной педагогической деятельностью, конкретизируем основные векторы изменений в деятельности преподавателя, осуществляемой в сетевом информационном пространстве вуза. Проанализируем специфику решения основных групп педагогических задач [2]. Учтем, что потенциал виртуальной образовательной среды ориентирован на человека, который активно и самостоятельно конструирует свое знание, развивает свои компетенции во взаимодействии с другими субъектами.

Основные задачи педагогической деятельности связаны с построением образовательного процесса. При выявлении изменений будем учитывать, что в традиционном образовательном взаимодействии есть ряд ситуаций, в которых недостаточно непосредственного общения в аудитории (из-за ограничения времени аудиторных занятий, невозможности уделить достаточно внимания общению с каждым студентом при значительных потоках обучающихся, из-за отсутствия студентов на занятии и др.). Проблемой является и организация самостоятельной внеаудиторной учебной деятельности. Значимость этой проблемы возрастает в свете того, что профессиональная подготовка в соответствии с компетентностным подходом рассматривается как процесс профессионального развития, самостоятельного овладения опытом будущей профессиональной деятельности. Следует создать условия для формирования у студентов компетенций и личностных качеств, необходимых спе-

циалистам, которым предстоит работать в условиях информационного общества.

В виртуальной информационной среде доступны разнообразные образовательные ресурсы, возможны вариативные формы индивидуальной и совместной учебной и квазипрофессиональной деятельности. Соответственно, от преподавателя требуется не только передавать знания, но и подготовить условия для самостоятельной познавательной и практической активности обучающихся, организовывать и сопровождать ее в виртуальной среде.

Что должен для этого уметь преподаватель, какие ему необходимы новые компетенции?

В психодидактической концепции образовательной среды выделены три узловых понятия, в которых отражаются основные изменения в образовательном ваимодействии в современной информационной среде и с которыми связаны новые грани професиональных умений педагога. В качестве базовых концептов выбраны следующие: социальная информация (электронные ресурсы среды), образовательная коммуникация в сетевом пространстве и управление распределенной образовательной деятельностью [4]. Исходя из этого преподаватель при построении нелинейного учебного процесса должен быть готов формировать электронную ресурсную базу для обеспечения самостоятельной работы студентов в дистанционном режиме; инициировать и координировать целенаправленную образовательную сетевую коммуникацию обучающихся, направленную на удовлетворение их индивидуализированного образовательного запроса; через виртуальную образовательную среду и ее ресурсы управлять индивидуальной и распределенной групповой самостоятельной работой студентов.

Понятие «*электронная ресурсная база*» введено с целью подчеркнуть взаимосвязанность и целевое единство комплекса электронных образовательных ресурсов, созданию которого способствует преподаватель, чтобы организовать эффективную самостоятельную работу студентов в процессе формирования компетенций. Это не дублирование в цифровой форме традиционных учебных материалов, а по-новому сформированная информационная основа потенциальных образовательных действий в насыщенном информационном окружении. Гиперсвязанные информационные блоки предназначены не для замещения существующих учебников и учебных пособий, а для расширения информационного поля деятельности, предоставления студенту возможности реального осознанного выбора образовательных ресурсов на основе вариативов содержания, формы представления и доступных способов действий с информацией. При этом необходимо осознавать психологические особенности интерактивного взаимодействия обучающихся с электронными ресурсами образовательной среды и научиться определять потенциал этих ресурсов в реализации педагогических технологий. Важно актуализировать механизмы, ориентированные на самоуправление познавательной деятельностью студента. В процессе формирования электронной ресурсной базы преподавателю необходимо уметь установить методические и технологические связи с ресурсами институциональной и глобальной информационной образовательной среды (электронные библиотеки, образовательные порталы, сайты, сетевые конференции др.), а также определить обоснованную потребность в разработке собственных, оригинальных электронных образовательных ресурсов.

Как изменяется в сетевой среде педагогическая коммуникация?

Для того чтобы способствовать формированию эффективного поля виртуальной образовательной коммуникации, преподавателю недостаточно научиться использовать сетевые коммуникационные сервисы. Определяющим является понимание преимуществ распределенного сетевого взаимодействия в групповых и коллективных формах, в синхронном и асинхронном режимах. Важно владеть педагогическими технологиями, эффективными в виртуальной среде. Иными словами: преподавателю необходимо научиться коммуникативным действиям, направленным не только на непосредственное взаимодействие с обучающимся, но и на создание в сети особых коммуникативных условий, способствующих активизации и расширению деятельностной основы самостоятельной работы студентов. При этом преподавателю не стоит переносить привычное взаимодействие со студентами из аудитории в сетевое пространство — его усилия должны быть направлены на

активизацию самостоятельного (группового, малогруппового) взаимодействия обучающихся в процессе решения образовательных задач в виртуальной среде.

Но основная сложность построения учебного процесса в расширенном информационном пространстве заключена в трансформации управления образовательной деятельностью, которая строится в опоре на систему обратных связей, выстраиваемых в электронной среде. Причем, обратные связи необходимо замыкать не только в отношении протекания познавательных процессов, но также и по линиям протекания мотивационных и регуляционных психических процессов [4].

Важное преимущество сетевой среды заключается в том, что в ней можно видеть не только результат, но и наблюдать процесс самостоятельной работы студентов: он фиксируется в архивах дискуссионных форумов, в учебных блогах, wiki-ресурсах, электронных портфолио студентов. Это позволяет своевременно вносить педагогическую коррекцию, устанавливать предметно-рефлексивные отношения между субъектами, в результате чего обеспечивается гибкость и индивидуализация управления учебным процессом.

Если характер взаимодействия педагога с обучающимися в виртуальной среде не меняется по сравнению с общением в аудитории, то даже при достаточном оснащении электронными образовательными ресурсами и формальном применении сетевых средств студент не получает необходимой степени образовательной свободы, самостоятельности и мотивации для самоуправления познавательной деятельностью, что необходимо ему для формирования современных профессионально значимых компетенций.

Для того чтобы строить индивидуализированный учебный процесс с широким использованием сетевых информационных и коммуникационных технологий, преподавателю необходимо видеть и понимать, как поведение обучающихся в образовательном процессе распределено во времени и пространстве. Педагогу необходимо учитывать, что психологические аспекты (интересы, мотивы, установки) действий студентов с электронными средствами отличаются от традиционных, характерных для аудиторного взаимодействия. Педагогическое видение и своевременная коррекция поведения субъектов в виртуальной среде (при интерактивном взаимодействии с электронными образовательными ресурсами, в процессе диалогической, интраперсональной и групповой коммуникации в учебных блогах, на сетевых форумах, в сетевых сообществах) позволяет оптимизировать деятельность студентов с разными когнитивными стилями, ведущими сенсорными модальностями, учитывать различные стратегии образовательной деятельности обучающихся. Другими словами, преподаватель должен способствовать созданию психологически комфортной телекоммуникационной атмосферы образовательного взаимодействия. При этом необходима высокая степень понимания достоинств и рисков внедрения сетевых коммуникационных средств: факторов различной информационной компетентности обучающихся и различий в технической оснащенности их рабочих мест; рисков, связанных со стабильностью функционирования программных сред и каналов связи и др.

Таким образом, выстраивая учебный процесс с привлечением возможностей электронной среды, преподаватель перестает быть его «информационным центром», в его деятельности появляется новая доминанта — он управляет контентом электронной ресурсной базы, организует и поддерживает разнообразные связи с ресурсами и субъектами среды. При этом его действия нацелены на вовлечение обучающихся в активное практикоориентированное сетевое образовательное взаимодействие в процессе формирования компетенций и эффективное его сопровождение.

Благодаря многофункциональности и доступности сетевых информационных и коммуникационных средств, преподаватель должен стать активным созидателем виртуальной образовательной среды. В зоне ответственности конкретного преподавателя находится ее первичный сегмент, отражающий цели и методы его информационной педагогической деятельности, — сетевая информационная и коммуникационная среда профессиональной деятельности преподавателя [5]. Назначение информационной среды, которую имеет возможность формировать преподаватель в сетевом образовательном пространстве, значительно шире, чем у среды предметно-практической, в которой в большей мере решаются задачи когнитивного освоения

учебных дисциплин. В результате специальной подготовки преподаватель сможет проектировать и создавать среду, обладающую также особым потенциалом в плане развития компетенций в сфере коммуникации, критического анализа информации, рефлексии, коллективной образовательной и профессиональной деятельности. Виртуальная образовательная среда с заданными характеристиками информационных отношений и взаимодействий рассматривается как новый важный элемент педагогического сопровождения самостоятельной работы студентов. В числе условий, обепечивающих эффективность функционирования такой среды, можно назвать взаимодополнительность образовательных стратегий при непосредственном и телекоммуникационном образовательном взаимодействии. А из этого следует, что изменения затрагивают и педагогическую деятельность в аудитории, позволяя преподавателю «перераспределить» и трансформировать решение образовательных задач.

И еще одна важная область, в которой проявляются изменения в педагогической деятельности, — это взаимодействие в профессиональном сообществе. К особенностям современной информационной образовательной ситуации относятся интенсификация процессов обновления знаний, актуализация новых образовательных целей, появление разнообразных информационных инструментов, что требует от педагога непрерывного развития его профессиональной компетентности. Сетевая среда позволяет педагогу оперативно получать доступ к самой актуальной профессиональной информации и инновационному опыту коллег (в сетевых дискуссиях, блогосфере, на страницах профессиональных сайтов). При этом она служит не только источником новой информации и знаний, но и виртуальной лабораторией для рефлексивного совершенствования преподавателем своей деятельности, апробации инновационных методических идей. В виртуальном пространстве открываются дополнительные возможности для сотрудничества на расстоянии, использования информационных систем. С учетом того, что сетевая информационая среда изначально предназначена не для индивидуальной деятельности, а для взаимодействия, достижение значимых результатов в ней требует определенного распределения и координации усилий. Это касается и разработки информационных образовательных ресурсов, и телекоммуникационного сопровождения самостоятельной работы студентов, и профессионального саморазвития педагога.

В заключение отметим, что педагог должен динамично реагировать на изменения, происходящие в российском и глобальном образовательном и информационном пространстве, адекватно этим изменениям трансформировать свою деятельность. Сегодня к деятельности преподавателя вуза, осуществляющего подготовку специалистов, востребованных на рынке труда, предъявляются особые требования, связанные с эффективным раскрытием потенциала современной информационной среды. Средства и ресурсы виртуальной образовательной среды должны найти свое место в индивидуализированном педагогическом сопровождении становления и развития профессиональных компетенций студентов; они должны быть ориентированы педагогом на инновационные результаты профессиональной подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красильникова, В.А.** Электронные компоненты информационно-образовательной среды [Текст] / В.А. Красильникова, П.В. Веденеев, А.С. Заварихин, Т.Н. Казарина // Открытое и дистанционное образование.— 2002. Вып. 4(8).

2. Компетентностный подход в педагогическом образовании [Текст] / Под ред. В.А. Козырева, Н.Ф. Родионовой.— СПб., 2004.

3. **Носкова, Т.Н.** Психодидактический подход к построению вузовской информационной образовательной среды [Текст] / Т.Н. Носкова // Экопсихологические исследования: Сб. матер. 5-й Росс. конф. по экологической психологии.— Москва 26–27 марта 2008 г. / Под ред. В.И. Панова. — М.: Изд-во Психологического института РАО, 2009.

4. **Носкова, Т.Н.** Психодидактика информационно-образовательной среды [Текст] / Т.Н. Носкова.— СПб.: Изд-во РГПУ, 2007.

5. **Павлова, Т.Б.** Подготовка преподавателя педагогического вуза к деятельности в современной информационной образовательной среде [Текст]: Автореф. ... канд. педаг. наук / Т.Б. Павлова.— СПб.: Изд-во «Лема», 2010.

УДК 372.1

Д.В. Федин

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА — СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ

Повышение качества профессионального образования и уровня подготовки специалистов в технических вузах — одно из приоритетных направлений государственной образовательной политики. Качественная подготовка высококвалифицированных специалистов приобретает первостепенное значение в свете инновационного развития страны. Специалист с высшим образованием должен быть компетентным, свободно владеть своей профессией, ориентироваться в смежных областях знаний и обеспечивать свой профессиональный рост.

Высокий спрос на квалифицированных специалистов обусловливается возросшими требованиями к выпускникам вузов, что стало актуальной проблемой высшего технического образования. Решение ее крайне важно на современном этапе.

Следовательно, присутствует необходимость совершенствования учебно-методической и учебно-воспитательной работы в соответствии с требованиями реформы высшего образования.

Подавляющее большинство научных работ по педагогике связаны с проблемами образования, управления и организации деятельности образовательных учреждений, перестройки содержания обучения в новых социально-экономических условиях. По мнению экспертов, эти направления уже достаточно насыщены. В то же время недостаточно полно исследованы факторы, влияющие на образовательный процесс, учебная успеваемость, мотивация в обучении, качество образовательного процесса, формы, методы и средства обучения, уровень базовой подготовки абитуриентов. Таким образом, исследование в области педагогики, направленное на решение задач повышения уровня успеваемости весьма актуально. Немалую значимость имеют также разработка модели прогнозирования успеваемости и совершенствование практических рекомендаций по методической работе со студентами.

Актуальность применения в педагогических исследованиях методов моделирования отразили в своих трудах В.Н. Волкова, А.А. Денисов [1], Г.В. Суходольский [5], В.И. Михеев [2], В.М. Монахов [3], В.Е. Радионов [4] и др.

Практическая значимость проектирования прогностических моделей и их реализации в учебном процессе совместно с комплексом разработанных практических рекомендаций определяется возможностью повышения эффективности образовательного процесса. В то же время возможности прогнозирования успеваемости каждого обучающегося позволяют планировать выпуск специалистов и возможное качество подготовки этих специалистов в условиях вуза.

Уже первые исследования в этом направлении подтвердили необходимость проведения более детального анализа факторов, влияющих на качество подготовки специалистов в техническом вузе и целесообразность разработки модели прогнозирования. В процессе исследования учебной успеваемости в образовательном процессе был выявлен ряд негативных явлений: отсутствие у студентов навыков для самостоятельной учебной работы и самообразования; снижение мотивации на фоне возникающих трудностей при обучении; отсутствие организованности в образовательном процессе учащихся.

Выявленные в ходе статистического анализа результатов экзаменационных сессий процентные соотношения подгрупп студентов с низкой, средней и высокой успеваемостью в период поступления в вуз с 2003-го по 2006 год подтвердили предположение о снижении уровня образовательного процесса. Статистически значимых различий между студентами разных годов поступления в вуз нет, но тенденция снижения уровня успеваемости наблюдается. Это, в свою

очередь, позволило прогнозировать ожидаемый контингент абитуриентов, которые будут в последующие годы поступать в вуз на технические специальности.

Снижение уровня успеваемости характеризуется постепенным приростом количества студентов с низкой и средней успеваемостью и в то же время уменьшение студентов с высокой успеваемостью, способных полноценно осваивать учебные программы. По результатам исследования факторов, влияющих на уровень успеваемости, был сформулирован комплекс практических рекомендаций для руководства факультета, кафедр и преподавателей-кураторов. Практические рекомендации направлены на улучшение дисциплины учащихся, активацию и повышение эффективности образовательного процесса.

Как показал анализ результатов анкетирования и собеседования, кураторы учебных групп мало работают со студентами, большинство студентов (73 %) не знают, кто у них куратор. Отсутствуют учебно-методическая работа, консультации, собеседования, в которых студенты, обучающиеся на первом курсе, остро нуждаются. Это приводит к неорганизованности и снижению учебной успеваемости. Соответственно, мероприятия, проводимые в конце семестра по результатам сдачи зачетов и экзаменов, не имеют желаемой эффективности для воздействия на учебную деятельность студентов.

В диссертационной работе было проведено исследование мотивации выбора студентом вуза и специальности при поступлении. На основании полученных результатов исследования была разработана программа «Прогнозирование» для ПК. Теоретическая разработка и практический эксперимент показали работоспособность методики прогнозирования успеваемости студентов, начинающих обучение в вузе на первом курсе. Процент совпадения прогноза с фактическими результатами составил: 52,6 % — в подгруппе с низкой успеваемостью; 65,7 % —со средней успеваемостью; 64,7 % —с высокой успеваемостью.

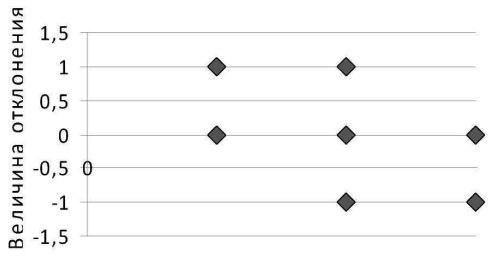


Рис. 1. Распределение отклонений (◆) в зависимости от прогнозируемой подгруппы (*1* — с низкой успеваемостью, *2* — со средней успеваемостью, *3* — с высокой успеваемостью)

Так же была выполнена проверка значений фактического F-критерия и сравнение его со значением табличного F-критерия. Значение $F_{факт}$ оказалось равно 2,15018, а значение $F_{табл}$ (при значениях $df_1 = 70$ — количестве испытаний; $df_2 = 25$ — количестве факторов; $\alpha = 0{,}05$) равно 1,66376. Таким образом, поскольку $F_{факт} > F_{табл}$, то нулевую гипотезу можно отклонить и сделать вывод о статистической значимости связи. Следовательно, в целом модель прогнозирования построена верно. На рис. 1 показано распределение отклонения прогнозируемого значения от фактического. В зависимости от получаемого значения установлено, что отклонения распределены в целом независимо и приблизительно нормально. Это означает, что при увеличении выборки отклонение будет распределено ближе к нулю, и ошибки прогноза будут уменьшаться. Это также подтверждает верность построенной модели.

Обучаемость программы и возможность накопления исходных данных обеспечивает увеличение достоверности прогноза успеваемости.

Разработанные в процессе исследований программа для ПК «Прогнозирование учебной успеваемости студентов», экспериментальная модель учебно-методической работы со студентами (рис. 2) и практические рекомендации были в качестве практического эксперимента апробированы на военной кафедре ВВС ФВО СПбГПУ.

В эксперименте принимали участие 112 студентов электромеханического факультета. Из них 71 студент — экспериментальная группа, 41 студент — контрольная группа. Численность студентов в группах случайная и специального отбора не проводилось.

Начальный этап эксперимента заключался в том, что со студентами экспериментальной группы были проведены: знакомство, анкетирование, индивидуальное собеседование и уточнение данных для накопления исходной информации. Было также проведено изучение личных дел участников эксперимента в студенческом архиве и личных учетных карточек в деканате факуль-

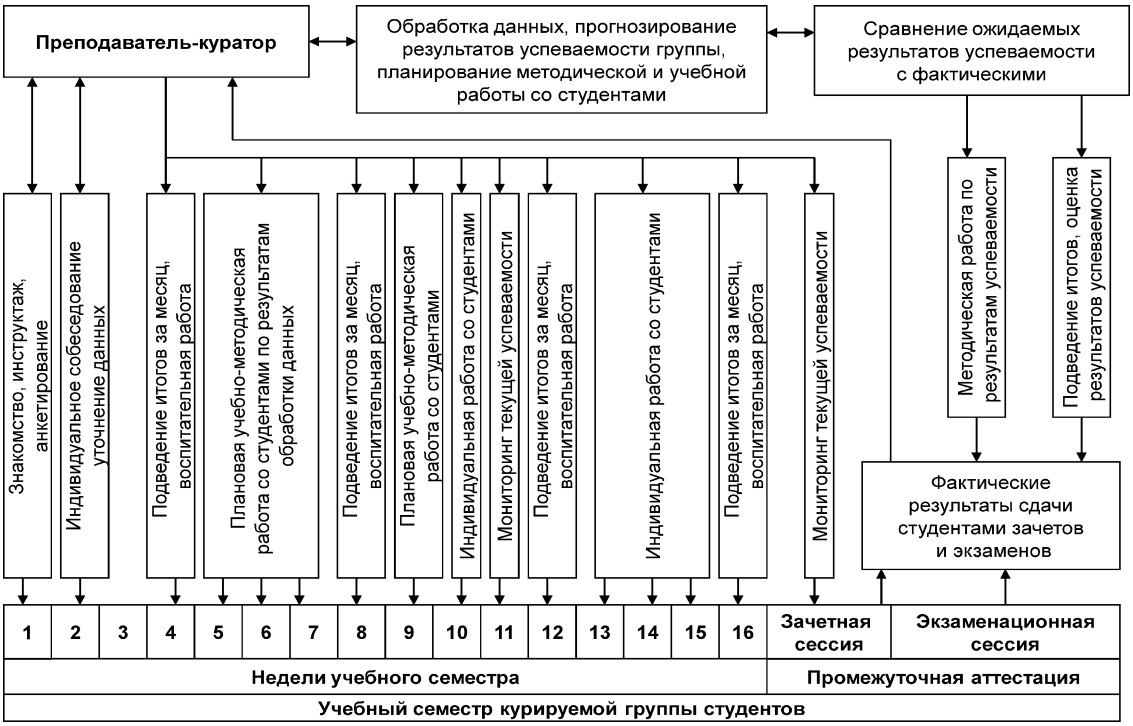


Рис. 2. Экспериментальная модель учебно-методической работы преподавателя-куратора с учебной группой студентов

тета. Полученные исходные данные были преобразованы в числовые значения и обработаны на ПК. В результате обработки получен прогноз предполагаемой успеваемости по каждому студенту экспериментальной группы. Далее преподаватели-кураторы учебных групп с учетом практических рекомендаций и результатов прогноза составили план проведения общих и индивидуальных мероприятий в соответствии с разработанной моделью учебно-методической работы со студентами. На следующем этапе в течение учебного семестра с курируемой группой проводились учебно-методические занятия, индивидуальные собеседования, подведение итогов, мониторинг текущей успеваемости.

Основной задачей учебно-методической работы было привитие студентам навыков самостоятельной работы, организации самостоятельной подготовки, распределения времени для изучения учебного материала.

В ходе индивидуальной работы проводились собеседования со студентами с указанием отрицательных и положительных результатов учебной деятельности, а так же давались рекомендации. Индивидуальная работа в отдельных случаях предусматривала собеседования с родителями обучающегося, которым предоставлялись результаты текущей успеваемости, до них доводились мнения о способностях их детей и предполагаемые результаты промежуточной аттестации. Давались рекомендации для своевременного принятия мер, предупреждающих снижение успеваемости.

При подведении итогов в конце каждого месяца до студентов доводились положительные и отрицательные стороны их успеваемости, посещаемости занятий и личной дисциплинированности. При этом дисциплинарная практика отображалась в личных карточках студентов.

Мониторинг как средство систематического сбора, обработки информации об успеваемости использовался для наглядного информирования студентов как индивидуально, так и по учебной группе в целом.

Кроме перечисленных мероприятий, с экспериментальной учебной группой проводились плановые тематические собрания (дни воинской славы, встречи с ветеранами, исторические и другие информации) с целью культурного и патриотического воспитания.

Результатом регулярной работы и постоянного взаимодействия преподавателя-куратора

с экспериментальной учебной группой стало заметное повышение результатов обучения (рис. 3) как в течение семестра, так и в конце семестра, по результатам промежуточной аттестации в период экзаменационной сессии.

Результаты успеваемости экспериментальной и контрольной групп имеют явные различия между экзаменационными средними баллами по семестрам обучения.

В подтверждение вышеизложенного следует привести следующие факты, проверенные с помощью аппарата математической статистики:

по среднему баллу школьного аттестата и вступительных испытаний контрольная и экспериментальная группы одинаковы, значимых различий нет;

среди групп студентов, обучающихся на первом курсе, по результатам сдачи семестровых экзаменов разницы по средним баллам не выявлено;

начиная со второго курса преподаватель-куратор приступает к работе с экспериментальной группой в соответствии с разработанной методикой, а контрольная крупа продолжает обучаться по общепринятой схеме;

средние баллы за экзамены в третьем и последующих семестрах в экспериментальной группе имеют значительные различия по сравнению с контрольной группой.

Уровни значимости различий между средними баллами за семестровые экзамены, сданные экспериментальной и контрольной группами, составили: $p = 0{,}0054$ за третий семестр, $p = 0{,}0065$ за четвертый, $p = 0{,}0004$ за пятый, $p = 0{,}000005$ за шестой, $p = 0{,}000002$ за седьмой семестр. Величина уровней значимости свидетельствует о существенности различий в средних баллах экспериментальной и контрольной групп.

Таким образом, описанная выше практическая методика прогнозирования с применением разработанной автором программы для ПК [8–10] позволила сократить время анализа успеваемости студентов в течение первого семестра в четыре раза. Следовательно, не дожидаясь сессии и результатов экзаменов по окончании семестра обучения, преподаватель-куратор, применяя разработанный комплекс практических рекомендаций, спланировал и провел учебно-методическую работу со студентами, направленную:

на предупреждение среди студентов количественного роста подгруппы с низкой успеваемостью;

на предупреждение большого количества отчислений студентов за академическую неуспеваемость;

на увеличение эффективности образовательного процесса среди потребителей за счет учебно-методического взаимодействия куратора со студентами;

на управление учебной деятельностью студентов путем организации их образовательного процесса со стороны куратора.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о необходимости применения программы прогнозирования, модели учебно-мето-

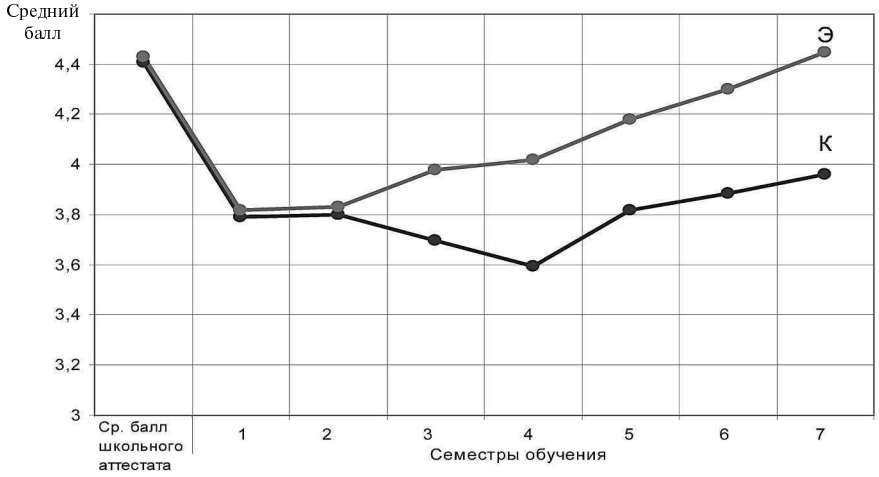


Рис. 3. График успеваемости экспериментальной и контрольной групп по результатам сдачи семестровых экзаменов

дической работы преподавателя-куратора и комплекса практических рекомендаций с начала обучения студентов в вузе. Анализ результатов эксперимента по прогнозированию и учебно-методической работе со студентами подтверждает значимость повышения уровня успеваемости, что весьма важно в подготовке специалистов. Разработанный в ходе выполнения научно-исследовательской работы инструментарий целесообразно внедрить в образовательный процесс подготовки инженеров-специалистов на других технических факультетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волкова, В.Н.** Основы теории систем и системного анализа [Текст] / В.Н. Волкова, А.А. Денисов //Учебник для студентов вузов. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.

2. **Михеев, В.И.** Моделирование и методы теории измерений в педагогике [Текст] / В.И. Михеев // Изд. 4, доп. — М.: Высшая школа, 2010. — 224 с.

3. **Монахов, В.М.** Технологические основы проектирования и конструирования учебного процесса [Текст] / В.М, Монахов. — Волгоград, 1995. — 146 с.

4. **Радионов, В.Е.** Нетрадиционное педагогическое проектирование [Текст]: Учебное пособие / В.Е. Радионов. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. — 140 с.

5. **Суходольский, Г.В.** Структурно-алгоритмический анализ и синтез деятельности [Текст] / Г.В. Суходольский. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. — 120 с.

6. **Пидкасистый, П.И.** Педагогика [Текст]: Учебное пособие / П.И. Пидкасистый, В.В. Воронов, В.И. Журавлев, В.В. Краевский / Под ред. П.И. Пидкасистого. — М.: Изд-во Педагогического общества России, 1998. — 640 с.

7. **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование [Текст]: Монография / А.Н. Дахин — Новосибирск: Изд-во НИПКиПРО, 2005. — 230 с.

8. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610017** Российская Федерация. Прогнозирование [Текст] / Федин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «СПбГПУ». — № 2011618222; заявл. 03.11.11; опубл. 10.01.12. — Бюл. № 2.

9. **Федин, Д.В.** Исследование причин, мотивирующих выбор студентами вуза и специальности при поступлении [Текст] / Д.В. Федин // Актуальные проблемы подготовки специалистов для ВМФ, Часть XII. Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова. — СПб. 2010.— С. 285–301.

10. **Федин, Д.В.** Учет индивидуальных особенностей в прогнозировании успеваемости студента обучающегося на электромеханическом факультете СПбГПУ [Текст] / Д.В. Федин // Отчет о научно-исследовательской работе «Активизация». — СПб.: Изд-во ВАС, 2009.— С 107–110.

УДК 37.013.32: 37.013.46: 37.013.77: 37.013.83

В.Н. Кругликов

ИНТЕРАКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Принцип активности в процессе обучения — один из основных в дидактике. Он предполагает такое качество учебной деятельности, которое характеризуется высоким уровнем мотивации, осознанной потребностью в усвоении знаний и умений, активной учебной деятельностью и результативностью. Инициирование и поддержание такой активности — основа целенаправленной организации педагогической среды, разработки и применения педагогических технологий.

Термин «интерактивное обучение» в современном значении, понимаемый как обучение, основанное на взаимодействии, появился в отечественной педагогике сравнительно недавно, но уже используется в федеральных государственных образовательных стандартах высшего и среднего профессионального образования третьего поколения (ФГОС-03). Согласно требованиям ФГОС-03 интерактивное обучение — обязательная форма организации аудиторных занятий. Например, в соответствии с требова-

ниями стандарта в бакалавриате в формах интерактивного обучения должно проводится не менее 25 % аудиторных занятий. В то же время полного представления о роли, значении, формах и принципах реализации технологий интерактивного обучения у профессорско-преподавательского состава вузов пока нет, как нет и четкого представления о том, чем интерактивное обучение отличается от ставшего уже привычным активного обучения.

Данная статья — это попытка выявить особенности интерактивного обучения, его отличие от других теорий активного обучения.

Принципы интерактивного обучения

Интерактивным (от англ. interaction — интеграция, взаимодействие) считается обучение, построенное на взаимодействии учащегося с учебным окружением, учебной средой, которая служит областью осваиваемого опыта.

Интерактивное обучение относится к теориям, продолжающим и развивающим концепцию активного обучения.

Если обратиться к разработкам, выполненным в рамках активного обучения, то в полный перечень психолого-педагогических принципов активизации обучения обычно включают [1]:

принцип имитационного моделирования конкретных условий и динамики производства во всем многообразии служебных, социальных и личностных связей — основа методов активного обучения;

принцип игрового моделирования содержания и форм профессиональной деятельности как необходимое условие учебной игры, несущей в себе обучающие функции;

принцип совместной деятельности как основы всей игровой деятельности, реализуемый посредством вовлечения в познавательную деятельность нескольких участников, выбора и определения характеристики ролей, ролевых полномочий, интересов и средств деятельности, выявления и моделирования в игре наиболее характерных видов профессионального взаимодействия «должностных» лиц;

принцип диалогического общения. В этом принципе заложено необходимое условие достижения учебных целей. По данным психологии в диалоге порождается процесс мышления, поскольку в условиях противоречивых позиций и точек зрения участников нужно найти ту альтернативу, которая не содержится ни у одного из участников, но каждого устраивает. Только диалог, дискуссия с максимальным участием всех играющих способны породить поистине творческую работу. Только при всестороннем коллективном обсуждении учебного материала обучающимися можно добиться комплексного представления ими профессионально значимых процессов и деятельности;

принцип двуплановости, отражающий процесс развития реальных личностных характеристик специалиста в «мнимых», игровых условиях. Разработчик ставит перед обучающимся двоякого рода цели, отражающие реальный и игровой контексты в учебной деятельности. Процесс реализации принципа двуплановости прямо связан с мотивацией участников игры. Здесь сложным образом переплетаются различные виды мотивации: коллективная и индивидуальная, социальная и профессиональная, результативная и познавательная, мотивация достижения и процессуальная. О.С. Анисимов отмечает, что в систему теоретических средств, используемых в игре, входит инструментарий как собственно методологии, так и социологии, психологии, культурологии, философии, этики, физиологии и т. п. Этим и гарантируется реализация принципа выращивания новых способностей, включая способность к саморазвитию, — наиболее сложного и ключевого принципа педагогической деятельности [2].

принцип проблемности содержания имитационной модели и процесса ее развертывания в игровой деятельности.

Сторонники интерактивного обучения выделяют в педагогике несколько моделей обучения:

1) пассивную, где ученик выступает в роли «объекта» обучения (слушает и смотрит);

2) активную, в которой ученик выступает «субъектом» обучения (самостоятельная работа, творческие задания);

3) интерактивную, где процесс обучения осуществляется в условиях постоянного активного взаимодействия всех учащихся. Ученик и учитель являются равноправными субъектами обучения.

Интерактивное обучение, таким образом, реализуя по существу все представленные принципы активного обучения, основной упор делает на использовании принципа диалогического общения. Поэтому ведущую роль в интерактивном

обучении играет диалог, общение, коллективное обучение, взаимодействие учащихся, принимающих участие в образовательном процессе.

Формула современного образовательного процесса может быть представлена в нескольких видах. Во-первых, специалистами признается, что в современном мире обучение нельзя рассматривать как субъектно-объектные отношения, в которых обучающемуся отводится роль объекта (O_2) педагогического воздействия.

$$S_1 \to O_2.$$

Оно должно реализовываться по схеме субъект-субъектных отношений:

$$S_1 \rightleftarrows S_2,$$

где S_1 — учитель, педагог, руководитель, человек, вызывающий интерес к предмету общения, к себе как к партнеру, информативная для обучающихся содержательная личность, интересный собеседник; S_2 — это ученик, подчиненный, общение с которым рассматривается педагогом как сотрудничество в решении учебных задач при его организующей, координирующей, положительно стимулирующей и подкрепляющей реакции.

По мнению Г.А. Китайгородской, и эта формула является неполной, поскольку необходимо учитывать характерный для современной школы принцип группового обучения или «индивидуального обучения через групповое» (третий принцип активизации в трактовке данного автора) [3]. Формула при этом приобретает вид, который отражает взаимодействие преподавателя и коллективного субъекта учебного процесса:

$$S_1 \rightleftarrows S_{21} + S_{22} + S_{23} + \dots .$$

С учетом определения интерактивного обучения трактовку формулы группового обучения следует представить в ином виде, который учитывает, что совокупный субъект вовлечен в диалоговое общение не только с преподавателем, но и со своим окружением.

$$S_1 \rightleftarrows (S_{21} \rightleftarrows S_{22} \rightleftarrows S_{23} \dots).$$

Такая организация учебного процесса имеет свои особенности, к которым относят:

пребывание студентов и преподавателей в одном смысловом пространстве;

совместное погружение в проблемное поле решаемой задачи;

согласованность в выборе средств и методов решения проблемной задачи, проблемной ситуации;

согласование эмоциональных состояний, переживание созвучных чувств, сопутствующих совместной деятельности.

При совместной деятельности учащихся каждый вносит в этот процесс свой особый индивидуальный вклад, идет обмен знаниями, идеями, способами деятельности. Успешность процесса во многом зависит от организации, необходимый элемент которой — создание атмосферы доброжелательности и взаимной поддержки. Совместное движение, достижение новых целей, рубежей развивает познавательную деятельность, переводит ее в категорию кооперации и сотрудничества.

Интерактивное обучение предполагает активное использование индивидуального опыта учащихся, который служит еще одним источником учебного познания. Поэтому задача преподавателя заключается не в передаче готовых знаний, а в такой организации учебного процесса, при которой студенты побуждаются к самостоятельному поиску.

Исторические и теоретические предпосылки интерактивного обучения

Организация учебного процесса должна обеспечивать максимальное включение в процесс всех учащихся. Используя эти подходы, интерактивное обучение развивает идеи, заложенные в ранних теориях взаимообучения и используемые в современных концепциях кооперативного обучения.

Метод коллективного взаимообучения зародился в конце XVIII — начале XIX веков — Андрю Белл (1753–1832) и Джозеф Ланкастер (1778–1838) одновременно ввели в практику педагогики учебные системы, в рамках которых лучшие ученики под наблюдением учителя обучают слабейших. Первые попытки «взаимного обучения» встречались и ранее, но этим ученым по праву принадлежит первенство в разработке и приведении в систему этого способа обучения, заслуженно получившего название белл—ланкастерской системы обучения. Система получила признание и распространение в мире, хотя уровень обучения в ланкастерских школах был достаточно низок, причиной чего считается факт полного устранения от учебного процесса наставника. Учитель не контролировал и не поддерживал учебный процесс.

В России идеи белл—ланкастерской системы обучения получили развитие в деятельности

Александра Григорьевича Ривина (1878–1944) — русского педагога, изобретателя «талогенизма». Основной заслугой А.Г. Ривина считается изобретение метода содиалога и построение на его основе гуманистической системы обучения. Метод содиалога — это метод обучения, при котором ученики под руководством учителя (старшего) общаются в парах сменного состава в диалоговом режиме, решая задачи достижения каждым учеником индивидуальных образовательных целей. В основе метода лежит диалог, под которым понимается (по Сократу) общение людей в совместном поиске истины.

А.Г. Ривин к основным положениям своего метода обучения относил:

общение («без общения нет общества»);

единство речевой и мыслительной деятельности («ясно мыслю, ясно излагаю») как реализацию дидактического принципа Коменского — безотлагательной передачи знаний;

полиморфизм — множественность форм общения через встречи с различными людьми, продуктами их прошлого опыта и совместного опыта парного общения («Уча других, мы учимся сами») [4].

Для активизации работы учащихся А.Г. Ривин, в частности, использовал прием неполного изложения учебного материала на учебных карточках. [5]

Идеи белл—ланкастерской системы обучения и системы А.Г. Ривина развиваются и сегодня преимущественно в формах коллективного взаимообучения. В России эти идеи вошли в учение об организационных формах общения, которые стали основой построения отечественной теории коллективного способа обучения (КСО) [6]

В США получила распространение форма коллективного обучения, получившая название системы обучения в сотрудничестве. [7]

В Германии идеи взаимного обучения развиваются доктором Жаном-Полем Мартаном, разработчиком методики обучения, получившей название «Учение через обучение» (нем. — Lernen durch Lehren), разработанной и впервые примененной автором на практике в Айхштеттском университете [8]. В 1987 году Жан-Поль Мартан создал контактную сеть «Учение через обучение», которая объединяет сегодня более 800 преподавателей по всему миру. Методика Мартана основана на коллективном взаимообучении, когда уроки проводятся обучающимися под контролем учителя, который выступает модератором, контролирующим процесс, где «из хаотично поступающей информации конструируются знания». Класс при этом преобразуется, по образному представлению автора, в «нейронную сеть», или комплексную самоорганизующуюся структуру.

Основное отличие современных форм коллективного обучения от белл—ланкастерской системы заключается в признании разработчиками значительной, определяющей роли наставника. «Обучение в сотрудничестве требует от педагогов обладания специальными знаниями в области организации труда в эффективно функционирующих коллективах и умения их применять» [7].

Опыт применения форм взаимообучения показал, что даже в тех случаях, когда преподаватель формально устраняется от непосредственного участия в образовательной деятельности, его ведущая роль сохраняется и при этом приобретает новые черты. Для успешного применения этих форм преподаватель дополнительно должен приобрести навыки организатора, менеджера, модератора. От знаний, навыков, опыта, организаторских способностей, ответственности преподавателя зависит конечный успех применяемых форм взаимообучения и эффективность коллективной познавательной деятельности учащихся.

Кооперативное обучение — одна из форм реализации интерактивного обучения, она предполагает достижение интеллектуальной автономности человека и возможности развития социальной компетентности за счет взаимодействия пяти основных компонентов [7]. В их числе:

1. *Позитивная взаимозависимость.* Такая связь может формироваться при условии, что достижение хорошего результата учащимся возможно лишь в том случае, когда все участники группы достигнут хорошего результата. Получение хорошего совместного результата положительно сказывается на индивидуальном результате каждого.

2. *Структурированная индивидуальная ответственность.* Деятельность каждого студента оценивается посредством: а) индивидуального тестирования каждого студента; б) объяснения каждым студентом содержания выученного им материала другому участнику; в) наблюдения за каждой группой и документирования личного

вклада каждого студента. Цель кооперативного обучения состоит в том, чтобы сделать каждого студента индивидуально сильнее в его (ее) собственной позиции. Студенты изучают вместе то, что они могут в последующем использовать индивидуально.

3. *Обеспечение стимулирования студентами успехов друг друга* (за счет помощи, поддержки, одобрения). Создание таких условий делает когнитивный процесс вербально объясняющим. А вербальные и невербальные реакции членов группы обеспечивают важную обратную связь деятельности студента. Студенты получают возможность узнать друг друга и на личностном, и на профессиональном уровне.

4. *Обучение студентов необходимым социальным навыкам* и обеспечение их использования. Успех кооперативных усилий требует сформированности ряда социальных навыков. Как академическим навыкам, так и навыкам лидерства, принятия решения, создания доверия, коммуникации и управления конфликтами надо обучать целенаправленно и точно.

5. *Обеспечение постепенного включения студентов в групповой процесс* и совершенствование навыков групповой работы. Студенты фокусируются на постоянном совершенствовании процессов групповой работы путем описания того, какие действия каждого обучаемого были наиболее полезны для обеспечения эффективных рабочих взаимоотношений и все ли члены группы достигли своих учебных целей. Студенты принимают решение о том, какие модели поведения следует развивать далее, а какие необходимо изменить. Результатом процесса групповой работы может быть: направление учебного процесса по пути его упрощения (уменьшение сложности); избавление от непрофессиональных и неподобающих действий (процесс, защищенный от ошибок); постоянное усовершенствование навыков работы в команде.

Считается, что обеспечение всех перечисленных компонентов способствует возникновению эффектов кооперативного обучения.

В группе кооперативного обучения должно быть от двух до четырех человек (большее количество усложняет получение качественного результата). Каждый участник в группе получает такое задание, выполнение которого, с одной стороны, дополняет деятельность других, а с другой стороны, оно значимо для каждого в отдельности. Так создается эффект причастности каждого к совместной деятельности — формируется позитивная взаимозависимость.

При использовании интерактивных методов роль преподавателя заключается в организации и регулировании учебного процесса. Преподаватель заранее готовит необходимые задания и формулирует вопросы или темы для обсуждения в группах, дает консультации, контролирует время и порядок выполнения намеченного плана.

При решении поставленных задач, участники вынужденно обращаются к социальному опыту — собственному и других людей, при этом им приходится вступать в коммуникацию друг с другом, совместно решать поставленные задачи, преодолевать конфликты, находить общие точки соприкосновения, идти на компромиссы.

Установлено, что в условиях учебного общения наблюдается повышение точности восприятия, увеличивается результативность работы памяти, более интенсивно развиваются такие интеллектуальные и эмоциональные свойства личности, как устойчивость внимания, умение его распределять, наблюдательность при восприятии, способность анализировать деятельность партнера, видеть его мотивы, цели.

Эффективность метода связывают с тем, что интерактивные методы пробуждают у обучающихся интерес; поощряют активное участие каждого в учебном процессе; обращаются к чувствам каждого обучающегося; способствуют эффективному усвоению учебного материала; оказывают многоплановое воздействие на обучающихся; осуществляют обратную связь (ответная реакция аудитории); формируют у обучающихся мнения и отношения; формируют жизненные навыки; способствуют изменению поведения.

В процессе обучения осуществляется межличностное познавательное общение и взаимодействие всех его субъектов. Развитие индивидуальности учащихся, воспитание их личности происходит в ситуациях общения и взаимодействия друг с другом и с преподавателем. Наиболее адекватной с точки зрения сторонников концепции и наиболее часто применяемой моделью создания таких условий является учебная игра. Игра предоставляет педагогу возможность создания условий для практического, имитационного воспроизведения результатов обучения (знания, умения и навыки), их применения, отработки

и тренировки с учетом индивидуальных различий обучаемых, вовлечения в игру учащихся с различными уровнями учебной мотивации. Игры несут в себе возможности значительного эмоционально-личностного воздействия, формирования коммуникативных умений и навыков, ценностных отношений. Поэтому применение учебных игр способствует развитию индивидуальных и личностных качеств учащегося.

Считается, что при проведении занятий в интерактивном режиме следует соблюдать ряд правил:

в работу должны быть вовлечены в той или иной мере все участники. С этой целью полезно использовать приемы и методы, разработанные сторонниками методов активного обучения;

необходима психологическая подготовка участников. Не все, пришедшие на занятие, психологически готовы к непосредственному включению в те или иные формы работы. В связи с чем необходимы разминки, погружения, вводные игры;

обучающихся на занятии не должно быть много или мало. Количество участников и качество обучения могут оказаться в прямой зависимости. Оптимальное количество участников обычно 9–25 человек. Только при этом условии возможна продуктивная работа в малых группах;

помещение для работы должно быть подготовлено с таким расчетом, чтобы участникам было легко перемещаться и удобно работать в больших и малых группах. Необходим физический комфорт;

процедуры и регламенты следует зафиксировать до начала занятия, они не должны быть громоздкими и ограничивать свободу творчества. Об этом надо договориться в самом начале и постараться не нарушать их. В частности, может быть использован следующий перечень принципов работы, обычный для методов активного социально-психологического обучения студентов, а также переподготовки специалистов:

а) занятие — не лекция, а общая работа;

б) суммарный опыт группы больше опыта преподавателя;

в) все участники равны независимо от возраста, социального статуса, опыта, успеваемости;

г) каждый участник имеет право на собственное мнение по любому вопросу;

д) нет места прямой критике личности (подвергнуться критике может только идея);

е) все сказанное на занятии — не руководство к действию, а информация к размышлению;

формирование рабочих групп лучше построить на основе добровольности. Можно воспользоваться принципом случайного выбора или использовать специальные процедуры.

Исторически термин интерактивное обучение относился только к обучению, осуществляемому на основе компьютерных технологий. Сегодня *электронное обучение* занимает отдельное место в интерактивном обучении и, наряду с дистанционными образовательными технологиями, может применяться при реализации образовательных программ независимо от форм получения образования.

Под электронным обучением [9] понимается организация образовательного процесса с применением информации, которая содержится в базах данных и используется при реализации образовательных программ, и обеспечивающих ее обработку информационных технологий, технических средств, а также информационно-телекоммуникационных сетей для передачи по линиям связи указанной информации и взаимодействия участников образовательного процесса.

Под дистанционными образовательными технологиями понимаются образовательные технологии, реализуемые в основном с применением информационно-телекоммуникационных сетей при опосредованном (на расстоянии) взаимодействии обучающихся и педагогических работников.

Необходимое условие реализации электронного обучения — создание электронной информационно-образовательной среды, включающей в себя электронные информационные и образовательные ресурсы, совокупность информационных и телекоммуникационных технологий, а также соответствующие технологические средства, которые обеспечивают возможность освоения образовательных программ обучающимися в полном объеме независимо от их мест нахождения.

По существу, электронное обучение в соответствии с приведенным определением представляет собой обучение, при котором взаимодействие преподавателя и учащегося (группы учащихся) происходит дистанционно с использованием компьютерных и телекоммуникационных технологий, т. е. интерактивно, или виртуально, что

накладывает определенные требования на его организацию и ведение.

Очевидно, что такое обучение имеет две составляющие: дидактическую и техническую. Значение технической составляющей обусловлено наличием необходимого оборудования и такими его характеристиками, как скорость и надежность связи, качество изображения, возможности программного обеспечения, согласование элементов программного обеспечения и др.

Дидактическая составляющая представляет собой практику использования традиционных методических разработок, адаптированных к условиям виртуального общения, а также методик, возможность использования которых определяется достижениями в сфере информационных технологий.

Электронное обучение достаточно молодо, темпы его развития в нашей стране значительно возросли только в последние годы, что связано с появлением широкого спектра новых, легко доступных возможностей для интерактивного общения. Теоретико-методологическое обеспечение электронного обучения развивается не столь быстро. Пока мало разработок теоретического плана, направленных на выявление эффективных форм и методов электронного обучения, подходов к подготовке методического обеспечения, мало разработок специализированного программного обеспечения, позволяющих не просто транслировать имеющиеся учебные материалы, заимствованные из традиционного обучения, но и широко использовать возможности современных компьютерных и телекоммуникационных технологий.

В числе основных проблем электронного обучения, проявившихся при реализации ранних идей программированного обучения и сохранивших свою актуальность в рамках современного интерактивного обучения, остается значительно более высокая скорость развития информационных технологий в сравнении с подготовкой методических материалов. Преподаватели не успевают подготовить, отладить и освоить методический материал, рассчитанный на определенные технические возможности, как оказывается, что разработка уже устарела и ее использование в принципе невозможно или неактуально в связи с использованием техники нового поколения. Этим же объясняется сложность формирования базы методических материалов.

Существует также проблема психологической неготовности студентов к самостоятельной учебной работе. Отсутствие или недостаточное развитие исходной учебной мотивации и волевых качеств значительно снижают эффективность обучения и затрудняют работу профессорско-преподавательского состава.

Поэтому пока при реализации электронного обучения преимущественно используются два дидактических подхода: традиционное, преимущественно субъект-объектное обучение, опосредованное использованием информационных технологий, и самостоятельная работа учащихся с учебными информационными базами или интернетом при ведущей роли самостоятельной работы.

В качестве перспективных остаются такие направления развития, как:

создание интерактивных учебников и учебных пособий нового поколения, построенных на принципах индивидуализации обучения, отличающихся наличием развитой визуальной базы и экспериментально-исследовательских блоков на основе математических моделей процессов и явлений;

развитие сетевых телекоммуникационных комплексов дистанционного группового обучения с обратной связью;

разработка специализированных систем тестирования и диагностики, позволяющих осуществлять дистанционный контроль знаний;

развитие сферы услуг по подготовке учебных программных средств и предоставлению информационных каналов;

обеспечение учебных центров современной телекоммуникационной техникой;

подготовка преподавателей для работы в интерактивном режиме на методическом и практическом уровне.

К положительным сторонам стремительного развития информационных технологий можно отнести развитие интернета и насыщение его информацией, имеющей учебное значение, что в значительной степени снизило потребности учащихся в специализированной методической литературе и облегчило поиск первоисточников и работу в ними.

Приведенный анализ, по нашему мнению, достаточно наглядно свидетельствует, что особенностью интерактивного обучения, выделяю-

щего его в ряду других теорий активного обучения, является акцентирование внимания педагога на создании условий диалогического общения как между педагогом и учащимися, так и между самими учащимися. При этом могут использоваться практически все соответствующие формы и методы, разработанные в рамках теорий активного обучения, за исключением самостоятельной работы студентов. Главным достоинством интерактивного обучения можно считать дополнительное развитие и усиление активной роли учащихся как необходимого условия успешного освоения ими учебных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вербицкий, А.А.** Активное обучение в высшей школе: контекстный подход [Текст] / А.А. Вербицкий.— М.: Высшая школа, 1991.

2. **Анисимов, О.С.** Игровой тренинг мыслительной деятельности [Текст]: Учебное пособие / О.С. Анисимов.— М.: МИНХ, 1990.

3. **Китайгородская, Г.А.** Методика интенсивного обучения иностранным языкам [Текст] / Г.А. Китайгородская.— М., 1982.

4. **Ривин, А.Г.** Содиалог как орудие ликбеза [Текст] / А.Г. Ривин // Революция и культура, 1930. № 15-16.— С. 64–66.

5. **Захаров, К.П.** Истоки коллективного взаимного обучения — Содиалог Александра Григорьевича Ривина [Текст]: учебно-методическое пособие. / К.П. Захаров.— СПб.: Изд-во Плитехнического университета, 2011.

6. **Дьяченко, В.К.** Новая дидактика [Текст] / В.К. Дьяченко.— М.: Нар. образование, 2001.— С. 418.

7. **Джонсон, Д.** Методы обучения. Обучение в сотрудничестве / Д. Джонсон, Р. Джонсон, Э. Джонсон-Холубек / Пер. с англ. З.С. Замчук. — СПб.: Экономическая школа, 2001. — 256 с.

8. **Martin, J.-P.** Für eine Übernahme von Lehrfunktionen durch Schüler, [Текст] / J.-P. Martin // in: Praxis des neusprachlichen Unterrichts.— 1986ю— S. 395—403.

9. **Федеральный закон** от 28 февраля 2012 г. № 11-ФЗ «О внесении изменений в закон Российской Федерации «Об образовании».

УДК 15.301.085

М.А. Иванова

СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ АРАБСКИХ СТУДЕНТОВ ИЗ СТРАН БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

Актуальность исследования

Активизация мобильности иностранных студентов из стран дальнего зарубежья, приехавших в Россию для получения высшего образования, обусловила появление сети региональных и международных учебных заведений или отдельных подразделений в традиционных вузах, для которых характерен не только интернациональный состав студентов, но и подготовка специалистов по приоритетным направлениям науки и техники.

Расширение академической мобильности между зарубежными странами с Россией в рамках различных форм обучения иностранных студентов требует активного участия в предоставлении образовательных услуг психологов, педагогов, социологов и социальных работников. К числу таких услуг относятся прежде всего факультеты (центры) предвузовской (довузовской) подготовки иностранных студентов, созданные в высших учебных заведениях России.

В современных условиях кардинально изменяется их функционально-ролевое назначение. Поиску новых форм обучения и воспитания иностранных студентов могут и должны помочь социологические исследования.

В Институте международных образовательных программ (ИМОП) СПбГПУ такие исследования проводятся уже в течение ряда лет, и их практические результаты позволяют с уверен-

ностью утверждать, что социологические исследования — это объективная необходимость в деле повышения эффективности подготовки иностранных студентов к дальнейшему обучению в вузе.

Сочетание таких социологических приемов и методик, как тестирование, контент-анализ, интервьюирование, уже с первых дней пребывания на факультете позволяет получить достаточно объективную информацию о факторах, влияющих на уровень адаптационных процессов студентов различной региональной, этнической и социальной принадлежности. Эта информация может служить ориентиром в выборе форм и методов дифференцированного подхода к личности каждого студента в интернациональной группе, основой правильного формирования учебных групп и потоков с учетом психологической, интеллектуальной, коммуникативной совместимости; она способствует выбору оптимальных механизмов воздействия на личность студента. Полученные результаты позволяют: совершенствовать учебный процесс в самый трудный и ответственный момент начальной адаптации иностранных студентов к новым социальным условиям их жизни и деятельности; исключить ряд причин, вызывающих наибольшие трудности в период обучения на подготовительном факультете (ПФ); адекватно оценить уровень непосредственного эффекта и опосредованной эффективности педагогической работы по подготовке иностранных студентов к дальнейшей учебе и жизни в России.

Социологические исследования позволили собрать большой эмпирический материал и создать социологические портреты студентов первого года обучения в российском вузе.

Цель предлагаемой статьи — составление социологического портрета арабских студентов из Туниса, Марокко, Ливана, Алжира и Иордании.

Сбор информации проводился по авторской методике «Ваша учеба и жизнь на подготовительном факультете» (М.А. Иванова, Н.А. Титкова), основу которой составили мотивационно-фоновые характеристики, служащие ориентиром в выборе форм и методов дифференцированного подхода к личности каждого студента, являющегося представителем определенного региона. К числу мотивационно-фоновых характеристик относим: установку иностранных студентов на получение высшего образования; мотивацию выбора места и целей обучения; степень реализации мотивации и целевых установок; степень готовности иностранных студентов к обучению в высшей школе России; темпы адаптации студентов к новым социальным условиям, к жизни и быту в многонациональном общежитии, к учебному процессу в интернациональной группе.

Описание методики. Методика включает анкету из девяти вопросов с возможными вариантами ответов по каждому из них:

1. Почему вы хотите получить высшее образование именно в России?
2. Как вы готовились к поездке в Россию?
3. Что вы знали о нашей стране до поездки в Россию?
4. Как быстро вы адаптировались к новым условиям жизни?
5. Почему вы хотите получить высшее образование?
6. Как вы думаете, во время учебы на ПФ вы получили новые знания?
7. К кому вы обратитесь за помощью, советом, если встретитесь с трудной проблемой по учебным, личным и политическим вопросам?
8. Какими источниками вы пользуетесь для получения информации по вопросам будущей специальности, политики, экономики, международного положения и образа жизни?
9. Вы согласны, что знание русского языка расширяет ваши возможности?

База исследования — ИМОП СПбГПУ. Всего на различных этапах исследования в нем приняло участие 125 арабских студентов из стран Ближнего Востока в возрасте 21–23 лет.

Обсуждение результатов исследования

Вопрос: «**Почему вы хотите получить высшее образование именно в России?**» включает 14 возможных вариантов:

читали/слышали об условиях получения образования в России;

совет родителей;

семейные традиции (в России учились родители, братья, сестры);

я не выбирал, где учиться; меня направило государство/правительство;

поступить в институт в России легче, чем на родине или в другой стране;

в России за учебу платит государство;

специалистам, которые учились в России, легче найти хорошую работу;

не было другого выбора;

хотел получить высшее образование именно в России;

хотел поехать в Россию посмотреть страну;

в какой стране учиться — мне все равно, главное — получить высшее образование;

специалистов моей будущей профессии лучше всего готовят в России;

специалистов такой профессии не готовят в моей стране.

Результаты исследования показывают, что 89 % арабских студентов стран Ближнего Востока хотели получить высшее образование именно в России (1-е ранговое место), 61 % — читали/слышали об условиях получения образования в России (2-е ранговое место), 56 % — по совету родителей (3-е ранговое место) и только 11 % опрошенных студентов ответили, что специалистов их будущей профессии лучше всего готовят в России.

Вопрос: «**Как вы готовились к поездке в Россию?**» включает 11 возможных вариантов ответа:

встречался с людьми, которые учились или работали в России;

читал информацию о России на неродном языке;

разговаривал с людьми, которые знают русский язык;

смотрел кинофильмы;

разговаривал со специалистами, которые работают в моей стране;

специально изучал историю России;

занимался в кружке русского языка;

читал книги на русском языке;

читал журналы на русском языке;

читал газеты на русском языке;

изучал русский язык самостоятельно.

Результаты исследования показывают, что 95 % опрошенных студентов перед поездкой в Россию встречались с людьми, которые учились или работали в нашей стране (1-е ранговое место), 89 % — смотрели кинофильмы о России (2-е ранговое место), 78 % опрошенных студентов читали информацию о России на родном языке (3-е ранговое место).

На вопрос «**Что вы знали о нашей стране до поездки в Россию?**» студентам предлагались следующие варианты ответов:

о борьбе России за мир;

руководителей государства;

о политической системе в России;

об экономической системе в России;

о русских писателях, поэтах;

о системе образования в России;

о национальной науке и технике;

о социальной системе в России;

о конституции страны;

о современной национальной культуре;

о современной национальной литературе;

о русской классической музыке.

Результаты исследования по данному вопросу показывают, что 89 % опрошенных арабских студентов до поездки в Россию знали руководителей нашего государства (1-е ранговое место), 78 % знали о политической системе в России (2-е ранговое место) и почти половина опрошенных (3-е ранговое место) интересовались вопросами экономической системы России. Большинство арабских студентов ничего не знают ни о литературе, ни об искусстве в России, и здесь предстоит большая работа с этим контингентом студентов преподавателей гуманитарных наук.

Вопрос: «**Как быстро вы адаптировались к новым условиям жизни?**» Нас интересовало, насколько быстро адаптировались арабские студенты к следующему:

требованиям интернациональной учебной группы;

условиям большого города;

необходимости учиться именно в этой, а не в другой группе;

изучению русского языка;

общению с людьми разных национальностей;

нормам поведения в учебной группе;

самообслуживанию (самим стирать, готовить еду, убирать комнату и т. д.);

«языковому барьеру»;

системе обучения на подготовительном факультете;

распределению свободного времени (чтобы его хватило и на учебу и на отдых);

новому режиму (распорядку) дня;

самостоятельному распределению стипендии;

жизни вдали от дома, от родных;

условиям жизни в общежитии;

климатическим условиям.

Студентам была предложена трехбалльная шкала адаптации: адаптировался очень быстро, почти сразу (1 балл); было много трудностей (2 балла); до сих пор не адаптировался (3 балла).

Результаты исследования показывают, что **адаптировались очень быстро** к требованиям ин-

тернациональной учебной группы 78 % опрошенных студентов (1-е ранговое место), к условиям большого города — 77 % студентов (2-е ранговое место), к необходимости изучения русского языка — 68 % (3-е ранговое место). Труднее всего адаптируются арабские студенты к условиям жизни в общежитии, к самостоятельному распределению стипендии, климатическим условиям, к жизни вдали от дома и родных.

Вопрос: «**Почему вы хотите получить высшее образование?**» Мотивы получения высшего образования содержат 13 позиций и составляют 11 ранговых мест.

Результаты исследования по этому вопросу показывают, что важным мотивом получения высшего образования для арабских студентов служит стремление получить материальную независимость в своей стране (1-е ранговое место) и понимание того, что их стране нужны именно такие специалисты (2-е ранговое место). Далее следует: диплом — гарантия служебной карьеры (3-е ранговое место); желание в будущем занять руководящую должность (4-е ранговое место). Последние ранговые места распределились так: высшее образование — это семейная традиция; оно дает перспективу общественной деятельности в своей стране.

Вопрос: «**Как вы думаете, во время учебы на ПФ вы получили новые знания?**» содержит 18 позиций, т. е. 18 возможных ответов на вопросы о приобретении знаний и навыков по изучению дисциплин, предусмотренных учебным планом, а также о приобретении знаний по будущей специальности, о системе высшего образования в России, об умении общаться с людьми разных национальностей.

Результаты исследования по этому вопросу показывают, что 95 % опрошенных арабских студентов (1-е ранговое место) получили новые знания в области экономики и политики России; о роли России на международной арене и образе жизни людей; в изучении русского языка; 89 % студентов повысили свой культурный уровень и научились лучше понимать людей, их характер, поведение (2-е ранговое место); 78 % опрошенных получили знание и умение общаться с людьми разных национальностей, а также по предметам естественно-научного цикла, изучаемым на ПФ (3-е ранговое место). Обращают на себя внимание такие факторы, как «неумение жить в многонациональном общежитии» для арабских студентов и «самостоятельно распределять свободное время», которые занимают 15-е ранговое место из восемнадцати возможных.

Вопрос: «**К кому вы обратитесь за помощью, советом, если встретитесь с трудной проблемой по учебным вопросам, по личным и политическим вопросам?**»

Результаты исследования: если у арабских студентов возникают трудности по личным проблемам, то в первую очередь для их разрешения они обращаются к родным и близким (1-е ранговое место), затем к преподавателям русского языка (2-е ранговое место) и в посольство или общественные организации (3-е ранговое место).

При возникновении трудностей по учебным проблемам они обращаются к преподавателям русского языка и родным, близким (1-е ранговое место), затем к товарищам по учебной группе (2-е ранговое место) и далее к руководителям землячеств (3-е ранговое место). Последнее ранговое место занимает обращение к русскому другу.

При возникновении трудностей у арабских студентов по политическим проблемам они для их разрешения прежде всего обращаются к руководителям землячеств или родным, близким (1-е ранговое место), затем в посольство и общественные организации (2-е ранговое место) и далее к землякам-старшекурсникам (3-е ранговое место). Как правило, арабские студенты не обращаются для разрешения политических проблем к преподавателям-предметникам или сотрудникам деканата (последние ранговые места).

Вопрос: «**Какими источниками вы пользуетесь для получения информации по будущей специальности?**» (25 позиций); по вопросам политики, экономики, международного положения (26 позиций); об образе жизни людей (26 позиций).

Анализ источников информации по вопросам политики, международного положения, указанных арабскими студентами, показывает, что первые три ранговых места распределяются следующим образом:

1-е ранговое место (70 % ответивших) — газеты на родном языке;

2-е ранговое место (62 %) — политические журналы на родном языке студентов и беседы с преподавателями;

3-е ранговое место (48 %) — радиопередачи на родном языке, российские газеты;

последнее ранговое место (38 %) — беседы с официальными лицами в посольствах, консульствах.

Анализ источников информации, которые получают арабские студенты по вопросам будущей специальности, показывает следующее распределение:

1-е ранговое место (64 %) — беседы с товарищами по учебе;

2-е ранговое место (59 %) — газеты на родном языке;

3-е ранговое место (57 %) — беседы с кураторами групп, соседями по общежитию.

Источниками информации об образе жизни людей для арабских студентов служат: газеты на родном языке (1-е ранговое место); политические журналы на родном языке, беседы с кураторами групп, музеи и выставки (2-е ранговое место); беседы с преподавателями на занятиях, посещение театров и концертных залов, радиопередачи на родном языке (3-е ранговое место).

Одна из специфических особенностей функционирования факультетов предвузовской подготовки для иностранных граждан состоит в том, что русский язык за очень короткое время (9 месяцев изучения) должен стать для иностранных студентов не только и не столько объектом изучения, но и «рабочим» языком, т. е. средством обучения и деятельности студента. Поэтому целесообразно выявить отношение арабских студентов к русскому языку.

Оценку значимости русского языка мы определяем по вопросу: «**Вы согласны, что знание русского языка расширяет ваши возможности?»,** который включает 20 возможных вариантов ответа.

Большинство опрошенных арабских студентов считают, что знание русского языка дает возможность узнать русскую и национальную культуру (1-е ранговое место); помогает быстрее привыкнуть к нормам и требованиям учебной группы и служит средством успешной адаптации к жизни на факультете (2-е ранговое место), а также средством более быстрой адаптации в большом городе, к условиям жизни в России и общению с людьми (3-е ранговое место). Последние ранговые места занимают ответы: «помогает понять проблемы современного мира» и «не дает ничего существенного, является только средством обучения в институте».

Считая ведущими функциями русского языка гностическую, коммуникативную, инструментальную и адаптивную, обратим внимание, что для арабских студентов наиболее значимой оказалась гностическая функция русского языка: «русский язык дает возможность познакомиться с национальной культурой и литературой». Большое значение арабские студенты придают адаптивной функции: «русский язык помогает быстрее адаптироваться к учебной группе и вне факультета». Из инструментальных функций наиболее значимой по оценке арабских студентов оказались: «русский язык помогает изучать предметы на неродном языке». К коммуникативным аспектам они относят: «русский язык помогает в общении с людьми другой национальности».

Данная методика позволяет создать социологические портреты иностранных студентов и из других зарубежных стран.

Описанный социологический портрет арабских студентов из стран Ближнего Востока дает преподавателям высшей школы инструмент для нахождения правильных и эффективных путей совершенствования работы с этой категорией иностранных граждан в первый год их обучения в российском вузе. Знание мотивационно-фоновых характеристик способствует сокращению сроков адаптации иностранных студентов при вхождении в новую социокультурную и социопедагогическую систему.

Полученные результаты социологического исследования внедрены в учебно-воспитательный процесс ИМОП СПбГПУ и другие вузы нашей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арсеньев, Д.Г.** Социально-психологические и физиологические проблемы адаптации иностранных студентов [Текст] / Д.Г. Арсеньев, А.В. Зинковский, М.А. Иванова.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— 160 с.

2. **Буева, Л.П.** Социальная среда и сознание личности [Текст] / Л.П. Буева.— М.: Наука, 1968.— 268 с.

3. **Иванова, М.А.** Социально-психологическая адаптация иностранных студентов первого года обучения в вузе [Текст] / М.А. Иванова, Н.А. Титкова.— СПб., Изд-во НПО ЦКТИ, 1993.— 63 с.

4. **Иванова, М.А.** Психологические аспекты адаптации иностранных студентов к высшей школе [Текст] / М.А. Иванова.— СПб.: «Нестор», 2000.— 150 с.

5. **Стефаненко, Т.Г.** Этнопсихология [Текст]: Учебник для высших учебных заведений / Т.Г. Стефаненко.— М.: Изд-во Института психологии РАН «Академический проект», 1999.— 320 с.

6. **Bochner, S.** The social psychology of cross—cultural relations [Текст] / S. Bochner // Cultures in contact / Ed. by S. Bochner.— Oxford: Pergamon Press, 1982.— P. 5–44.

7. **Chu, G.S.** Student expatriation: A function of relative social support [Текст] / G.S. Chu // Sociology and Social Research.— 1968.— Vol. 52.— P. 174–184

УДК 378.147

С.Э. Харзеева

ПОНИМАНИЕ КАК КОГНИТИВНЫЙ ПРОЦЕСС И КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ЗНАНИЙ В КОМПЕТЕНТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ

Проблема понимания — одной из важнейших проблем образования, поскольку предметом понимания в образовании является усваиваемое обучающимися научное знание.

В высшем профессиональном образовании представление о знании как понимании отражено и в современных нормативных документах. Так, в европейской образовательной системе установлена система дескрипторов (так называемые «Дублинские дескрипторы») для описания требований к выпускникам в соответствии с уровнями образования. Их анализ показывает, что общее для всех уровней — это достаточно высокие требования, основанные на компетентностной модели содержания стандартов высшего профессионального образования, в рамках которой результат образования описывается как знания, умения и навыки в действии.

Указанные требования описываются такими дескрипторами, как знание и понимание изучаемой области, применение знаний и понимания, способность собирать и интерпретировать данные и т. п. (для бакалавра); знание/понимание, обеспечивающее основу для оригинальности в развитии и применении идей, применение знаний и способность решения проблем в новой среде в более широких контекстах, способность интегрировать знания, преодолевая возникающие при этом трудности (для магистров). Выпускники обоих уровней должны обладать навыками обучения, позволяющими самостоятельно продолжить учебу.

Таким образом, знания компетентностного типа рассматриваются в единстве с пониманием как основой их применения и формирования компетенций.

Чтобы получить «на выходе» соответствующие компетенции выпускника, необходимо ввести в содержание обучения (и, что не менее важно, в процесс диагностики и контроля его хода и результатов) соответствующие виды и процедуры когнитивной деятельности, которые должны быть освоены студентом, определить содержание и характер этой деятельности, а также способы диагностики уровня ее освоения

В современных исследованиях психологии науки [1] понимание рассматривается как:

одна из основных процедур функционирования научного знания, наряду с другими процедурами — описанием, объяснением и интерпретацией;

интеллектуальный процесс и познавательная процедура;

компонент мышления.

При этом признается, что процесс понимания обладает своей спецификой, которая отличает его от других интеллектуальных процессов и познавательных процедур.

Для традиционного информационно-репродуктивного подхода характерен общепризнанный недостаток — опора в практике обучения на процессы внимания, восприятия, памяти. Однако очевидно, что запоминание информации и сохранение ее в памяти не тождественно приобретению знаний.

Знания в современной когнитивной науке рассматриваются как индивидуальные знания. Соответственно, на первый план выдвигаются вопросы о том, как происходит обработка информации человеком и в какой форме хранятся знания в его голове. Поэтому утверждается, что *проблема понимания и моделирования научного знания* имеет фундаментальный характер и вследствие своей сложности и многогранности является междисциплинарной.

Эта проблема находится на стыке актуальных проблем психологии понимания как относительно новой самостоятельной области психологии, фундаментальных проблем теории обучения, когнитивной психологии, психологии развития, психологии субъекта, когнитивной лингвистики, семантического анализа и моделирования текста, проблем компьютерной обработки научного текста. Очевидно, что фундаментальные аспекты данной проблемы связаны и с решением актуальных прикладных задач в данных отраслях знаний.

Формой выражения и существования в обществе коммуницируемого научного знания служит научное высказывание, построенное по законам грамматики и синтаксиса. Достижение понимания при усвоении нового знания, передаваемого в подобной коммуницируемой (языковой) форме, может быть основано только на процессе отображения, преобразования получаемой информации в *ментальную репрезентацию* (*модель*). Этот процесс требует привлечения не только лингвистических знаний, но и знаний о мире, фоновых предметных знаний, знаний о ситуации коммуникации и т. д., то есть он может осуществляться только при активном взаимодействии поступающей информации с внутренними концептуальными структурами индивидуального знания.

Отсюда задачи и психолого-педагогической, и когнитивной науки (в ее недостаточно разработанном в настоящее время образовательном аспекте) должны быть связаны, по нашему мнению, с исследованием вопросов о том, что же такое подобные ментальные модели, как они организованы, что представляет собой сам процесс отображения информации в ментальную модель ситуации на высших, концептуальных уровнях понимания.

Как показывает анализ результатов известных исследований, процесс усвоения знания имеет сложную природу и включает механизмы распознавания, перекодирования, интерпретации, организации и др. При этом когнитивные структуры индивидуального знания организуются по законам мышления, понимания и памяти.

Безусловно, эти выводы относятся и к психологии обучения, что подчеркивает важность проблемы моделирования, формирования, развития и использования ментальных когнитивных репрезентационных структур в образовательном процессе.

В эффективном формировании таких индивидуальных когнитивных структур огромную роль может играть, по нашему убеждению, современный процесс обучения.

Такой процесс, как мы полагаем, должен: строиться на глубинных уровнях понимания, уровнях значений и смыслов; быть направлен на осознанное формирование смысловых когнитивных структур различного уровня абстрактности как основы организации концептуальной системы индивидуального знания, понимания и оперирования знанием; включать обучение способам, стратегиям и метаоперациям познания, стимулировать диалогическую активность обучающегося как условие усвоения им операциональных и интерпретационных правил указанной выше формы мыслительной деятельности — трансформационного процесса.

В исследованиях когнитивной лингвистики высказывается гипотеза (М.Барвиш) о характере ментальной модели как некоего внутреннего полного или симультанного свободно доступного «дисплея», разрешающего ряд обращений к памяти при обработке последующих частей высказывания. Хотя, по замечанию автора, совершенно не ясно, чем может быть этот «внутренний дисплей» (как метафора), он, по-видимому, играет решающую роль в понимании языка.

Мы полагаем, что, по существу, внутренняя смысловая когнитивная репрезентация как *средство* и *результат* понимания высказывания может играть роль подобного дисплея.

Таким образом, в процессе обучения должно происходить активное взаимодействие воспринимаемой учебно-научной информации и смысловых обобщенных структур индивидуального знания.

Рассматривая *объекты* познавательной активности человека в предметном мире, принято выделять сами *предметы* и *события* (М. Пола-

ни), подчеркивая при этом, что познавательная активность человека направлена на выявление их *значений*. Соответственно, *формами* долговременной организации знания, рассматриваемыми в когнитивной психологии, являются *категория* и *схема*.

В процессе обучения традиционно рассматривается прежде всего категориальная организация знаний, которая фиксирует принадлежность понятия к некоторому семантическому классу и его отношение к другим представителям этого класса.

Для описания этого уровня организации знаний и соответствующих ему семантических отношений выдвигается ряд моделей — как логических, так и теоретико-множественных.

Однако уже с начала XX века начинает рассматриваться противопоставление так называемых *парадигматических* и *синтагматических* отношений между понятиями. Парадигматические отношения в понятийной системе имеют формальный, например родовидовой, характер. Синтагматические отношения — межкатегориальные, они объединяют понятия из различных категорий в описание ситуаций или событий, «*как они встречаются в нашем опыте*» (А.Р. Лурия. Основные вопросы нейролингвистики.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. Цит. по [2]).

Межкатегориальная организация знаний, которая связывает понятия из различных семантических областей, в когнитивной науке признается исключительно важной. В функционировании концептуальных структур выдающуюся роль играют ментальные структуры знания, получившие общее название «*схемы*». Схемы представляют собой некие устойчивые, обобщенные структуры опыта, которые позволяют предвосхищать порядок развития событий, их содержание, внутреннюю связь.

Хотя понятие «схема» — одно из основных теоретических понятий современных когнитивных исследований, однако известные исследования, касающиеся данной проблемы, относятся к сфере обыденного опыта и мышления. Проблема формирования и функционирования схем в сфере научного мышления, а также образовательные аспекты этой проблемы на уровне высшего профессионального образования практически не изучены.

Подчеркнем здесь усматриваемое нами в современном образовании принципиальное, на наш взгляд, противоречие. Несмотря на общее признание того факта, что наше понимание прямо определяется имеющимися у нас концептуальными структурами, задача исследования организации внутренних ментальных концептуальных структур до сих пор не осознана в образовании, хотя одна из задач образования — преобразование общественно существующих знаний в индивидуальные знания обучающихся, и, по существу, именно эта сторона образовательного процесса подчеркивается компетентностным подходом.

Поэтому, по нашему мнению, предмет исследований современной психолого-педагогической науки должен включать и психологическую онтологию, необходимую для понимания того, как представляются знания в индивидуальных концептуальных структурах и как способствовать формированию последних в наиболее эффективных их формах.

С образовательной точки зрения важно подчеркнуть, что если иерархическая организация понятий выявляется в психосемантических исследованиях только в результате использования сложных математических приемов обработки данных, то схематическая организация, как установлено психологическими исследованиями, обычно более эксплицитна и, следовательно, доступна сознательному учету.

Последний вывод, по нашему мнению, позволяет считать, что схематическая организация знания, представленная обучающемуся в материализованной форме в виде смысловых репрезентационных моделей (структур), может служить ориентировочной основой обучения в процессах достижения понимания и формирования компетентности как способности к применению знания, основанной на понимании и выявлении личностного смысла усвоенных знаний.

В когнитивной науке особенности схематической организации выявлены при исследованиях памяти и рассматриваются как механизмы, которые позволяют человеку использовать данную форму организации знания для эффективного восприятия, а также последующего воспроизведения информации, даже если сама она в значительной степени забыта.

По нашему мнению, смысловые обобщенные концептуальные модели организации индивидуального знания могут использоваться не только

как средства восприятия и воспроизведения знания, но прежде всего как средства понимания и оперирования знаниями.

В современной антропологии схема тоже означает структуру события или явления, включая иерархическое и параллельное соотношение с другими событиями и явлениями, причем подчеркивается, что схема значима для индивида, культурно обусловлена и имеет символическое строение.

Таким образом, долговременными компонентами наших знаний и умений в современной когнитивной науке считаются схемы знаний о мире — фреймы, сценарии, когнитивные карты. Так, согласно данным когнитивных и психолингвистических исследований особую роль в понимании текста играет способность человека опираться на подобные схемы знаний о мире. В известных исследованиях рассматриваются главным образом пространственные и временные типы схем в обыденном сознании

В нашем контексте важно отметить, что при создании «глобальных» когнитивных моделей, а также в контексте моделирования познания с помощью нейронных сетей когнитивными науками впервые начинает систематически рассматриваться проблема обучения. С другой стороны, растущее осознание практической значимости исследования возможных механизмов процесса обучения привело к развитию в когнитивных науках некоторых общих подходов, в том числе к появлению гипотез о характере влияния обучения на развитие механизмов памяти, обеспечивающих хранение знаний.

Так, например, известно предположение (Д. Норман и Д. Румелхарт) о трех качественно различных типах изменений в процессе обучения, которым примерно соответствуют три группы механизмов памяти, хранящих знания в виде схематических структур.

Одним из них является тип изменений на уровне *настройки*, понимаемой как совершенствование *навыков* в результате постоянной и все более тонкой адаптации к параметрам ситуаций, активирующих знания, что соответствует перцептивной и сенсомоторной имплицитной памяти.

Принципиально иная форма обучения, которая соответствует семантической памяти, — это *обогащение* знаний путем добавления к их составу новых терминов, понятий и фактов, Примером изменений этого уровня в процессе обучения является традиционное академическое обучение, ориентированное скорее на накопление знаний, чем на их использование. Вследствие ориентации процесса обучения на обогащение памяти новыми знаниями первостепенное значение в традиционном обучении имеют стратегии улучшения запоминания.

Третий уровень изменений, по мнению авторов, соответствует эпизодической памяти и метапознавательным процессам, оперирующим над знаниями, — это *переструктурирование*, то есть обнаружение новых закономерностей в имеющихся знаниях, что позволяет качественно, «скачком» расширить возможности их применения. (Другие названия этого уровня обучения — «обучение путем открытия», или (в гештальтпсихологии) «обучение посредством инсайта».)

Высказывается предположение о том, что основой всех серьезных продвижений в обучении, ведущих к переструктурированию существующих представлений, служит интеграция первоначально изолированных областей знания [2, т. 1, с. 427].

Отметим, что представление о формировании неких «обобщенных базальных схем мышления» рассматривается и в известной теории поэтапного формирования умственных действий П.Я. Гальперина. С этих позиций привлекает внимание вывод Гальперина о том, что умственное развитие при усвоении знаний происходит лишь в той мере и в той форме, в какой усвоение знаний связывается с образованием *обобщенных базальных схем мышления;* если же этого не происходит, то знание фактов и даже законов не оказывает прямого влияния на развитие мышления. Усвоение знания на основе этих общих схем он считал самым высоким, третьим типом ориентировки (различая эти типы по степени общности входящих в них знаний) и полагал, что это и есть тот теоретически допускаемый Ж. Пиаже вид обучения, при котором приобретение знаний происходит вместе с интеллектуальным развитием. (Однако П.Я. Гальперин замечал при этом, что подобное обучение пока не было описано.)

Нами разработаны способы смыслового моделирования и репрезентации научного знания. Указанные выше свойства ментальных репрезентаций в полной мере присущи разработанным нами моделям глубинной *смысловой репрезентации проблемных ситуаций и форм научного знания* как регулярным структурам.

Поясняя последний термин, отметим, что способность справляться с разнообразнейшими ситуациями при помощи небольшого набора стандартных механизмов служит, несомненно, мощным приспособительным средством познавательной системы человека. Поэтому человек в своей познавательной деятельности стремится к поиску регулярности. Однако, как подчеркивают многие авторы, гибкость этой системы в обращении с новой информацией должна постепенно уменьшаться по мере становления ее структуры. Иначе говоря, мышление человека преобразует окружающую его среду в некие стереотипы или модели; система моделей — очень эффективный способ обработки информации. Однако огромная продуктивность создания моделей или стереотипов влечет за собой и ряд недостатков, главным из которых является то, что крайне трудно, оказывается, перестроить сами стереотипы, чтобы на них влиять. Подчеркнем, что с подобной перестройкой привычных представлений и стереотипов и связано творчество.

Предлагаемое нами смысловое глубинное моделирование ситуации представляет собой *абстрагирование и обобщение смысла* и работает как универсальный механизм, который способен справляться с разнообразными ситуациями, аналогичными по глубинному смыслу, несмотря на различие их поверхностных описаний, предметной области и т. д. Так, разработанная нами обобщенная смысловая модель ситуаций предметного взаимодействия включает их общие инвариантные смысловые элементы, описываемые на концептуальном уровне, а также *систему смысловых связей между смысловыми элементами*. В конкретной ситуации смысловые элементы играют роль факторов, которые идентифицируют относящуюся к ним информацию в описании ситуации и указывают на необходимость привлечения имеющихся фоновых (базовых) знаний при ее неполноте или отсутствии.

Важно подчеркнуть, что при использовании предлагаемого нами подхода проявляется важное отличие его результата от получаемых при традиционных стереотипных алгоритмах решения «типовых» задач. Действительно, при использовании нашего подхода чем шире, разнообразнее, вариативнее система ситуаций, опирающихся на данную обобщенную смысловую схему и/или включающих определенный смысловой элемент, тем более полным и разносторонним становится знание, тем меньше проявляется тормозящее влияние прошлого опыта, тем слабее воздействие психологического эффекта функциональной фиксированности, тем успешнее развивается широта и гибкость мышления. «Ярлыки» не «навешиваются» на объекты раз и навсегда, объекты рассматриваются то с одной позиции (целостная модель ситуации), то с другой.

Согласно разработанному нами подходу развитие у студента обобщенных операций и метаопераций мышления способствует повышению познавательной мотивации и познавательной активности, развивает у них уверенность в собственных интеллектуальных и личностных возможностях, стимулирует развитие субъектности мышления и деятельности.

С целью совершенствования категориальной организации индивидуального знания и развития индивидуальной системы значений нами предложена и использована в образовательном процессе когнитивная модель значения, а также поэтапная стратегия усвоения значения и формирования индивидуальной системы значений.

При использовании разработанного нами подхода выявляются сложные диалектические отношения целостной структуры знания, отображаемой моделью ситуации, с ее составляющими — значениями и смыслами ее элементов. Значение, имеющее сложную иерархическую структуру, раскрывается в модели целостной ситуации лишь со стороны тех признаков, которые семантически согласуются с признаками других ее элементов (в чем проявляется принцип субаддитивности). С другой стороны, целостная модель приобретает новые интегративные свойства за счет возникших отношений между значениями ее отдельных элементов (проявление принципа супераддитивности).

Целостность ситуации и ее новые интегративные свойства отображаются в разработанном нами подходе с помощью вербального и невербального представления модели ситуации как средства создания ее целостного умственного образа. Обучающийся получает возможность изучения топологии связей в этой структуре, свертывания с ее помощью больших массивов информации и оперирования этой свернутой единицей.

Высокий продуктивный потенциал формирования и использования разработанных нами репрезентативных структур связан с их комби-

наторными и рекурсивными свойствами, возможностями декомпозиции сложных задач на более простые и дальнейшей детализации моделей путем включения в них смысловых моделей сопутствующих ситуаций.

При этом за понятийным планом этого оперирования раскрывается и предметный план, определяемый осмыслением отношений, функциональных признаков и соответствующих им «инструментальных» связей реальных объектов, участвующих в ситуации. Последнее способствует развитию мотивационных аспектов обучения, подключая профессиональную мотивацию как результат выявления связей познавательных ситуаций с профессиональной деятельностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аллахвердов, А.Г.** Психология науки [Текст] / А.Г. Аллахвердов, Г.Ю. Мошкова, А.В. Юревич, М.Г. Ярошевский.— М.: Флинта, 1998.— 311 с.

2. **Величковский, Б.М.** Когнитивная наука. Основы психологии познания: в 2 т. [Текст] / Б.М. Величковский.— М.: Смысл: Академия, 2006.

3. **Величковский, Б.М.** Когнитивная психология. [Текст] / Б.М. Величковский.— М., 1982.— 336 с.

4. **Гальперин, П.Я.** Введение в психологию [Текст] / П.Я. Гальперин.— М.: «Книжный дом «Университет», 1999.— 332 с.

УДК 158.1:159.9:615:616

В.П. Сущенко, А.Г. Саракул, В.В. Лесничий

ТЕОРИЯ ЦЕЛОСТНОЙ ЛИЧНОСТИ И ПСИХОСОМАТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

(Обзор клинико-психологических концепций)

В предлагаемом обзоре делается попытка обобщить существующие концепции и теории психосоматической медицины с позиций теории целостной личности, которую авторы разрабатывают в течение последних нескольких лет. Развиваемые здесь психоаналитические, психологические и психотерапевтические практические подходы опираются на выдвинутые нами теоретические идеи о значимой роли адаптивных процессов и систем в условиях напряженной деятельности человека в современных условиях его жизнедеятельности. При этом мы рассматриваем целостность личности как дополнительный адаптивный ресурс, способствующий оптимальному (приспособительному) разрешению сбоев во внутреннем «Я», возникающих в результате стресс-воздействий, противоречий.

Развиваемый здесь ресурсный подход к психической деятельности человека опирается на базовые современные теоретические представления о природе психического. При этом в качестве опорных мы используем теорию психоанализа, психоаналитическую структуру личности, теорию психотипов (по Юнгу), а также авторские концепции «билатеральности психического» и концепцию «троичности иерархической организации интеллекта человека» [1].

Мы исходим из того, что целостность современной личности человека невозможна без осознанной интеграции ее соматических, психических и духовных ресурсов. Приведенный ниже аналитический обзор существующих теорий и воззрений по проблеме психосоматики нацелен на подтверждение авторской концепции возможности «психосоматического самоисцеления и самоповреждения» при гармонизации или дисгармонизации отношений между тремя базовыми уровнями (или ресурсами). Предлагаемая статья — первая попытка поиска доказательной базы гипотезы о трех ведущих психических функциях (самоорганизация, саморегуляция и саморазвитие), приносящих изнутри «ресурс целостности» для естественного преодоления человеком своего дискретного энергетического состояния.

Мы считаем, что ресурс психической целостности личности прежде всего опирается на фе-

номенологию осознанности, за которой следует как подключение к информационной составляющей психического бытия, так и включение в целом всех механизмов исцеляющих воздействий и ***самоисцеляющих процессов*** через этот ресурс психики. Тогда как природа иного типа ресурсов, относящихся к ресурсам бессознательного, ближе к концепциям ***психических состояний и неосознаваемых процессов***, феноменология которых в своем объектном выражении всегда становится доказательной базой степени отклонения личности от ее целостного гармонического состояния и потому служит объективным доказательством патофизиологических и патопсихологических сдвигов (смещений), составляющих природу психосоматической патологии.

Проводимый нами анализ природы эмоционального интеллекта человека убеждает, что эмоциональная энергия для психического столь же значима, как и филогенез для эволюционных концепций психического. Без адекватного эмоционального потенциала или ресурса становится неосуществимой эволюционная программа развития любой личности. Между тем, к сожалению, все концепции, оперирующие терминами «психическая энергия» и т.п., зачастую учеными всерьез не воспринимаются или попросту отбрасываются с порога, как лженаучные.

Тем не менее вся история восточной медицины и философии прекрасно уживается с этими подходами и нисколько не страдает, а наоборот, даже процветает от таких «лженаучных» подходов к природе человека и его психики в целом.

Отсюда наша принципиальная позиция — интегрировать западные и восточные школы и философии, чтобы попытаться объяснить феноменологию психосоматического здоровья человека именно с позиций его психической целостности, где центром и опорой этой его целостности является эмоциональный интеллект.

С начала прошлого века вопросы течения и развития любого заболевания начали рассматриваться с позиций целостного организма. Факт отражения каждого психического акта в телесных ощущениях (и наоборот), как в норме, так и при патологии, вроде бы никем не оспаривался. Но и в начале XXI столетия единство органного и душевного не стало доминирующим ни в сознании клиницистов, ни в сознании исследователей.

История развития психосоматического подхода начинается с немецкого врача R. Heinroth, предложившего в 1818 году термин «психосоматика». В 1918 году B.S. Openheimer и M.A. Rotshild ввели понятие нейроциркуляторной астении, при которой симптомы невроза сопровождались повышенной утомляемостью. Da Costa (1871) описал «возбудимое» сердце солдата (синдром Да Коста) и синдром раздраженного кишечника. В 30-х годах XX века появилось понятие «органный невроз». Органные неврозы G. Bergman рассматривались Г.И. Маркеловым (1948) как «вегетозы», В.Г. Мясищевым (1960) — как системные неврозы и как соматоформные расстройства в нынешних классификациях. В общем виде под термином «психосоматическое расстройство» большинство авторов определяют нарушения функции внутренних органов и систем, возникновение и развитие которых в наибольшей степени связано с нервно-психическим фактором, специфическими особенностями эмоционального реагирования личности (А.В. Петровский, М.Г. Ярошевский,1998).

Патогенез формирования психосоматического расстройства/заболевания достаточно сложен ввиду огромного количества его составляющих, удельный вес каждой из которых лишь предположителен, а взаимосвязи не установлены. В обобщенном виде — это наследственные соматические и психические нарушения и предрасположенность к ним; психическое и физическое состояние личности во время психотравмирующего события; особенности самого события и фона, на котором оно происходит.

Ключевая роль в становлении и интерпретации психосоматики, конечно, принадлежит психоанализу.

Теория «символического языка органов» объясняет возникновение тех или иных симптомов проявлением так называемой «тени» — мыслей, стремлений, фантазий, вытесненных в бессознательное. Так, сексуальное голодание проявляется в нарушении функции желудка; запоры — в тенденции к брезгливости, накоплению денег; респираторные заболевания — в стремлении вернуться в лоно матери. Ключевое понятие психоанализа — конверсия — означает вытеснение влияния на орган (расстройство его функции). Если эта тенденция обратима, то речь идет о неврозе (истерии), если нет — о соматическом заболевании.

Ф. Данбар (1938, 1943) сформулировала концепцию «констелляции личностных черт», которая породила многочисленные разноуровневые и разноплановые исследования по выявлению специфических личностных особенностей психосоматических больных. Ею описаны «коронарный личностный тип», «язвенный», «гипертонический», «аллергический» и др. Многие результаты проведенных в этом направлении работ уже общепризнанны.

Труд американского психоаналитика Ф. Александера «Психосоматическая медицина», вышедший в 1950 году, обобщил опыт бурного развития психосоматики в первой половине XX века. Автор рассматривает концепцию появления симптома как нормального физиологического сопровождения хронизированного эмоционального состояния. Любая подавленная эмоциональная реакция имеет свой соматический эквивалент. Глубина вытесненного специфического эмоционального конфликта определяет форму психогенного заболевания (истерическая конверсия, вегетативный невроз, психосоматическое заболевание). Для каждого психосоматического заболевания, по мнению Ф. Александера, характерен свой интрапсихический конфликт [4].

Бихевиоральное (поведенческое) направление интерпретирует психосоматическое заболевание как результат неправильного научения и разнообразных форм неправильного поведения.

Теория кортико-висцеральных взаимосвязей, отталкиваясь от биологической платформы, выдвинула гипотезу о кортико-висцеральном происхождении психосоматических заболеваний, где, в отличие от вышеперечисленных концепций, основная роль отводится не вытесненному, подавленному, замещенному подсознательному, а первичным нарушениям корковых механизмов управления висцеральными органами за счет перенапряжения, возбуждения и торможения в коре мозга. Исследования школы И.П. Павлова (К.М. Быков, И.Т. Курцин, 1960) продолжают сохранять свою актуальность в формировании современных представлений психосоматической медицины [2].

Клиника неврастении и истерического невроза связана с несуществующей болезнью. Если в первом случае это — психозащитная депрессия и астения (усталость, слабость), когда человек, свято веря сказанному, говорит, что «устал от жизни», то во втором случае человек подсознательно воссоздает модель любой болезни. Известно, что неврастеник ни на что не претендует, его притязания низки, он капитулировал. При истерическом неврозе «болезнь» используется как раз для жизненной борьбы. У невротика с соматоформными расстройствами соматовегетативные симптомы явны, тогда как психопатологические замаскированы. При этом морфологические изменения тканей не обнаруживаются, что и отличает их от психосоматических заболеваний. В.В. Марилов (1993) предлагает концепцию единого процесса — психосоматоза, на одном полюсе которого находится психогенно обусловленная функциональная патология, а на другом — органическая. Он выделяет четыре этапа психосоматоза: психическую депрессию; психосоматические реакции; психосоматические циклы; психопатизацию [3].

Большим событием для клиницистов стало появление в 1986 году монографии В.Д. Тополянского и М.В. Струковской «Психосоматические расстройства», которая сразу стала медицинским бестселлером. Книга написана не общепринятым научным языком. Эмоциональный накал, тщательность подбора иллюстраций, прекрасный язык и стиль изложения материала, убежденность авторов выдвинули ее в ряд выдающихся. Книга акцентировала проблему, как бы переориентировала огромный фактический материал, накопленный клиницистами практически всех специальностей, в толковании причин заболеваний в сторону психического начала. Известное высказывание Е.К. Краснушкина (1934) о том, что внутренняя речь эмоций — это функция органов, как в норме, так и в патологии, было развито и великолепно проиллюстрировано.

Когда нейрохимические процессы через врожденные программы вызывают комплексные мимические и соматические проявления, а с помощью обратной связи они становятся осознанными, появляется отдельная фундаментальная эмоция. В роли посредника между центральной нервной системой (читай: эмоцией) и внутренними органами выступает вегетативная нервная система. Особая «ранимость» вегетативной нервной системы, которая практически не контролируема волей (без специальной и весьма длительной подготовки) и крайне неустойчива в своем равновесии, проявляется не только при

достаточной интенсивности аффекта; висцеровегетативные реакции выступают в ходе адаптации и в ответ на слабые эмоциональные стимулы, соответствующие даже чрезвычайно тонким интеллектуальным процессам. Вегетативная нервная система обеспечивает всеобщность и слитность психического с соматическим. Этот биологический факт определяет, в конечном счете, всю жизнедеятельность человеческого организма как в норме, так и в патологии. Вариантом акцентации именно на участии вегетативной нервной системы, являющейся лишь одной частью триединого комплекса, стало появление достаточно популярной «вегето-сосудистой дистонии». При появлении у пациента жалоб не только на головную боль, разбитость, лабильные колебания артериального давления, но и раздражительность, тревогу диагноз звучит как «психовегетативный синдром».

Академиком П.К. Анохиным в середине прошлого (XX) века была разработана биологическая теория функциональных систем как замкнутого контура автоматической регуляции с постоянной сигнализацией о результатах действия для получения определенного приспособительного эффекта, необходимого в данный момент в интересах целостного организма. Любая качественно очерченная эмоция рассматривается в свете этой теории как целостная функциональная система со всеми присущими ей закономерностями. Включение эмоций в содержание функциональной системы определяется их биологической ролью, которая филогенетически направлена прежде всего на удовлетворение потребности в сохранении телесного и психического постоянства «Я». Эмоции выступают первым звеном в общей цепи приспособительных реакций, которые, сменяя друг друга, охватывают весь организм почти мгновенно, без первичной оценочной составляющей, и позволяют отвечать на любые воздействия окружающей среды еще до установления их конкретных параметров. Таким образом, эмоции выступают как абсолютный и мгновенный сигнал полезности и вредности любого воздействия, что определяет их исключительное значение по отношению ко всем другим механизмам адаптации.

Эмоция висцерального происхождения возникает как следствие «встречи» исходного интегрированного возбуждения, обусловившего определенный периферический эффект, и сложного потока афферентной импульсации от органов действия. Малейшее рассогласование этой возвратной импульсации с данными так называемого акцептора действия немедленно вызывает чувство неудовлетворенности и беспокойства, какого-то соматического неблагополучия в организме. Сигнал, или затянувшаяся эмоция, вовлекает в страдание всю вегето-эндокринную систему. Усиленное функционирование не только симпато-адреналовой, но и всей нейроэндокринной системы сопровождается все большей дезинтеграцией физиологических механизмов, лежащих в основе координированной приспособительной деятельности целостного организма. Крайние степени дезинтеграции нейрофизиологических процессов ставят организм под угрозу острого психосоматического поражения какого-либо органа и даже скоропостижной смерти.

По П.К. Анохину, одновременно происходят обработка, взаимодействие и образование акцептора действия четырех составляющих: доминирующей в настоящий момент мотивации, обстановочной афферентации, пусковой афферентации и памяти жизненного опыта индивида. Всякое изменение порядка и последовательности или даже простая задержка одного из этих интегративных процессов приводит к дезорганизации данной функциональной системы и переходу эмоции удовольствия в эмоцию отрицательного знака. В роли пускового фактора могут быть и внушенная идея или страх болезни, и необычные стимулы от внутренних органов, и всевозможные поводы, сопряженные так или иначе с прежним жизненным опытом личности.

Физиологическими коррелятами негативных эмоций становятся повышение системного артериального давления и/или учащение дыхания, изменение тонуса мочевого пузыря или секреторной и моторной активности пищеварительного тракта, напряжение скелетной мускулатуры и увеличение свертываемости крови.

Если стресс не протекает по естественному пути аффективной разрядки — крик, бегство, драка и пр., происходит фрустрация «я» и формируется постоянное эмоциональное возбуждение отрицательного знака — психосоматическая депрессия. Достаточная сложность разделения стрессорных и эмоциональных проявлений, конечно, со временем разрешится. Пока же мы имеем факты, ждущие своего объяснения. Например, обезьяны, которых систематически пугали

во время еды, получали язву желудка; других после сильной физической нагрузки заставляли сидеть неподвижно, что приводило к развитию гипертонии.

Что это: подверженность стрессу тех функциональных систем, которые работали с наибольшим напряжением, до упора, или это разные стрессы?

Чем сильнее и продолжительнее воздействие отрицательной эмоции, тем более значительны и стойки висцеро-вегетативные нарушения, тем больше оснований для психосоматических расстройств (болезней) и, соответственно, ипохондрического развития личности.

Долговременная память — это всегда эмоциональная память, стойко запечатлевшая следы однократного психофизиологического состояния, возникшего вследствие психогенного или соматогенного воздействия и бывшего по тем или иным причинам экстремальным. И фактом является «сверхбыстрое извлечение из памяти той же самой нейрохимической трассы» в ответ на стимул, явно не соответствующий тяжести стрессовой ситуации.

Уникальность каждого человека определяет бесконечную вариабельность как психического, так и соматического проявления возникающих расстройств.

Ахиллесову пяту каждого человека создает не только и даже не столько изначальная, конституциональная готовность какого-либо органа к избирательному поражению или возможная недостаточность его вследствие перенесенного в прошлом заболевания либо повреждения, сколько известная настороженность на него центральной нервной системы. Центром тяжести психосоматического страдания оказывается всегда орган, наиболее уязвимый и важный в представлении индивида для жизнедеятельности индивида и его жизнедеятельности вообще. Своеобразным выражением принципиально новых качеств, которыми обогащается эмоция в процессе накопления индивидуального опыта, становится функциональная патология по типу условного рефлекса. Формируется все более отчетливая тенденция по все более стереотипному реагированию на любые внешние и внутренние стимулы. Приступы кардиальной гипервентиляции или гемикрании стереотипно воспроизводятся сначала в определенной ситуации, потом — под влиянием какого-либо раздражителя, связанного с этой ситуацией хотя бы косвенно или неосознанно, затем — при малейшем волнении и расстройстве и, наконец, при любом неприятном или неблагоприятном для организма воздействии вообще.

В то же время самоуглубленные, мнительные, тревожные и эмоционально неустойчивые интраверты реже страдают некоторыми видами рака. У тех, кто по складу личности наиболее подвержен сердечно-сосудистым расстройствам, рак встречается реже, чем у уравновешенных людей. Периодические острые стрессы, часто переживаемые экстравертами, способствуют развитию карциномы. Как будто иммунная система при хроническом стрессе приобретает навыки противораковой борьбы и не успевает отреагировать при остром стрессе.

Н.П. Бехтеревой была сформулирована теория устойчивых патологических состояний, исходя из которой для преодоления неопределенности/нестабильности (один из самых стрессорных агентов) формируется и закрепляется новая матрица памяти, ограничивающая резкие колебания возможных реакций ответа с формированием своеобразного нового патологического гомеостаза.

Одним из путей прогрессирования данного, казалось бы устойчивого, созданного по законам адаптации состояния становится переход в фазу дестабилизации со значительным нарушением не только функции, но уже и структуры органа.

Рассмотренная здесь схема развития психосоматических расстройств включает в себя преходящие состояния устойчивые психопатологические проявления соматизированной депрессии и их органные — системные — эквиваленты, наконец, конкретные болезни с известной симптоматикой. Преходящие депрессивные состояния, наверное, нужно считать вариантом нормы в развитии жизни любого человека. Это — состояния, которые он смог преодолеть и выйти победителем. Другое дело, каковы количество и качество «депрессива». Р. Киплинг, подвергнувшийся в детстве жестокому прессингу воспитательницы, стал слепнуть. Изменение обстановки и последующая благоприятная жизнь сделали из него Киплинга. Но зрение восстановить полностью он не смог [5].

Устойчивая соматогенная депрессия чрезвычайно вариабельна по яркости и акцентации индивида на психических проявлениях либо на болезни органов. Авторы отмечают все большую

соматизацию депрессий (депрессий без чувства подавленности и тоски), отмечаемую во всех цивилизованных странах.

Кардинальные вопросы психосоматики сегодняшнего дня мало отличимы от общих вопросов этиопатогенеза и включают в себя поиск пускового механизма патологического процесса, меру индивидуальной реактивности в виде выраженной эмоциональной реакции и комплекса специфических вегето-висцеральных сдвигов (или полного отсутствия таковых) и специфичности проявления заболевания.

По T.H. Holmes, R.H. Rahe (1967), в течение года человек переживает около ста пятидесяти заметных жизненных изменений. При возрастании их числа в 2 раза развитие психосоматического заболевания увеличивается до 80 % [6].

Выделяют следующие психосоматические заболевания: гипертоническую болезнь, синдром артериальной гипотензии, ишемическую болезнь сердца, язвенную болезнь, неспецифический язвенный колит, бронхиальную астму, тиреотоксикоз, сахарный диабет, неспецифический хронический полиартрит, заболевания кожи, хроническую боль. В список не включены заболевания, являющиеся, по мнению древних, болезнями «омраченности», неправильного поведения: агрессия, переедание, алкоголизм, курение и пр.

В то же время трудно не согласиться с мнением А.Л. Гройсмана о значительном расширении представленного перечня и не включить в него синдром раздраженной толстой кишки, рефлюксы — прямой путь к раку желудка и пищевода, дискинезии желчного пузыря, выливающиеся в наиболее частую на сегодняшний день хирургическую патологию — желчнокаменную болезнь со всеми ее осложнениями, и бич современной хирургии — панкреатит/панкреонекроз. Среди ста двадцати причин возникновения последнего в настоящее время наиболее значима одна, связанная с кровоснабжением поджелудочной железы. Классические опыты по созданию желчной гипертензии в панкреатических путях, возникающие в естественных условиях при обструкции их камнем, не давали стабильного развития панкреонекроза, тогда как перевязка какой-либо панкреатической вены обеспечивала гарантированное его развитие. Дистонический механизм начала заболевания, спровоцированный любой из упомянутых ста двадцати причин, на наш взгляд, наиболее вероятен.

В кардиологии и ангиологии — это кардиалгии функциональной природы, аритмии, вегетодистонии и нейроциркуляторные расстройства.

В эндокринологии — гипотиреоидная реакция, гормональные дисфункции.

В настоящее время выделяют десять заболеваний как основных причин преждевременной смерти в развитых странах: болезни сердца и сосудов (ишемическая болезнь сердца, инфаркт миокарда), инсульты (гипертоническая болезнь, атеросклероз, болезни сердца), атеросклероз (сахарный диабет, гипертоническая болезнь), бронхиальную астму, сахарный диабет, нефриты и нефрозы, грипп и пневмонию, рак, цирроз печени, несчастные случаи. И если три последних группы заболеваний можно включить в психосоматику с оговоркой (также как господствующий сейчас в хирургии панкреонекроз), то генез семи остальных вполне укладывается в психосоматическую концепцию.

С известной долей допуска можно принять психосоматическую концепцию как универсальную. В.И. Гарбузов, соединяя воззрения китайской и тибетской медицины на взаимоотношения и взаимовлияния не связанных (на наш взгляд) между собой органов и их болезней с современными взглядами на связку «психовегетативный — психоастенический — соматодепрессивный синдром — психосоматическая болезнь», считает последние «бичом XX века».

Сегодняшний язык интерпретаций заболеваний выдвинул иммунологию в качестве всеобъясняющего понятия. Сама иммунология до настоящего времени не имеет прочной теоретической базы, но такое словосочетание, как сниженный иммунитет, понятно абсолютно всем.

Данные, полученные и клиницистами, и экспериментаторами, по взаимосвязи социо-психических факторов с иммунными процессами богаты и однозначны. Стрессорные события — быстрые или длительно протекающие — непосредственно определяют частоту заболевания раком и инфекциями, аллергическими и аутоиммунными проявлениями. К последним относят болезнь Грейвса и Хашимото, ревматоидные артриты, болезнь Крона, системную красную волчанку, псориаз, нейродермиты, миастению. Проще было бы сказать, что трудно выявить заболевание, тем или иным образом не связанное с психическими проявлениями, особенностями личностного реагирования.

Ясность и понятность психосоматики абсолютно не означает практическое приятие ее в клинике. Ни один великий врач не мог отойти от представления, что, по существу, вся медицина является психосоматической. Но в нынешней «доказательной медицине», ориентированной на фармакотерапию, о психосоматической компоненте болезни зачастую вспоминают лишь при ее пограничных проявлениях. К тому же «психо» также тесно переплетено с «социо», как и с соматикой. Отсюда неизбежный вывод о том, что спасение утопающих — дело рук самих утопающих. Но, быть может, это не стена, а выход?!

Возьмем самый простой вариант: давление, язва, диабет, астма, ишемия миокарда и пр. уже дают о себе знать. Терапия — строгая или от случая к случаю — уже проводится.

Ишемия миокарда, даже на фоне стенокардических приступов, может быть компенсирована длительными динамическими физическими нагрузками (бег трусцой, плавание, даже обычные приседания, длительная быстрая ходьба), естественно при медленном постепенном возрастании нагрузки и без перерывов на плохую погоду, настроение и пр.

А как же инфаркт или инсульт? Да, могут быть, если пациент не обращает внимание на предупреждение симптомов и вовремя не проводит профилактическую коррекционную работу. Когда-то поразили воспоминания марафонца, который пришел к бегу через тяжелую стенокардическую инвалидность в 60-е годы. Бегать он просто не мог. Рекомендация врача — ложку водки (расширение сосудов) — пробежка: терять было нечего. И так пьяный, шатаясь, от дерева к дереву, человек убегал от смерти.

Пранаяма — древнейшая индийская система управления праной (энергией), практическое руководство по управлению дыханием, в котором «расширению» и углублению дыхания (бхастрика) отводится небольшое место. Основа пранаямы — упражнение по задержке дыхания. Вдохнул — задержал дыхание — выдохнул — задержал. Просто до неприятия. Противопоказаний никаких, особых условий тоже. Попробуйте — и вы быстро войдете во вкус, если хватит терпения месяца 2–3 заниматься пранаямой по 10 минут два раза в день.

Диабет — болезнь гиподинамии и неправильного, вернее, обильного питания. Развитие диабета в детском возрасте и молодости, имеющее, скорее всего, антигенную природу, не превалирует в общей структуре больных с диабетом.

Так вот, Ф. Шаляпину в эпоху отсутствия заместительной терапии рекомендовали колоть дрова перед едой. А о том, что вкусная обильная пища под хорошее вино была важна в жизни, пишет сам великий певец. Сейчас рекомендации по лечению диабета тотально подчинены диете — хорошо. Но физическая нагрузка — бег, плавание, даже приседание — фактор не менее значимый, помогающий не только излечить диабет 2-го типа, но «соскочить» с инсулина.

Бронхиальная астма. Многочисленные теории происхождения бронхиальной астмы — от воспалительно-антигенной до перераздражения трахеи и бронхов «жестким» воздухом при нарушениях аэродинамики носовых ходов — имеют под собой научное обоснование. Но вот практическая реализация в лечении...

Гиперкапническая терапия (методы Бутейко — Стрельниковой, Фролова, Малахова), снимающая бронхоспазм, реальна в своих результатах по лечению заболевания. Но принимать антибиотики и бронхолитики гораздо проще. Интересный факт: у многих выдающихся спортсменов выявляют бронхиальную астму. Одним из объяснений служит то, что это — естественная реакция на многочасовую гипокапнию, развивающуюся у марафонцев.

Если принять предлагаемую нами концепцию природы психической энергии за основу, то вполне естественно признать, что соматическая природа психических функций эволюционировала именно в трех первокачествах: негативном, позитивном и нейтральном.

«Негативная психическая энергия» есть отражение природы неразрешимого конфликта, она, по сути, есть внешнее отражение глубины погружения или степени глубины вытеснения конфликта в бессознательное. По существу, такая ситуация есть ни что иное, как соматоформный вариант развития конфликта, или его материализация.

На уровне материи вполне естественны лишь механизмы закрепления и сохранения таких процессов или функций, что служит своего рода дисадаптивным приспособлением целостной системы к степени дисстресса (давлению стрессовых факторов). Это своего рода гибкая стратегия психосоматической адаптации через глубину соматических изменений. В традиционной трактовке

оно есть поле активации патофизиологических механизмов и процессов в организме человека как целостной психофизической системе.

Однако существует и совершенно противоположный вектор, если признать наличие «позитивной психической энергии». Эволюция природы психосоматической целостности человека происходила не только с позиций формирования инструментов защиты через развитие гибкости и приспособления, но и с позиций формирования инструментов выживания через преодоление дистрессового, или негативного, внешнего давления на организм человека.

Материал, предоставленный в данной статье, является попыткой разрешить одну из фундаментальных проблем психосоматического здоровья современного человека, а также развить теоретическую идею о значимой роли адаптивных процессов и систем в условиях напряженной жизнедеятельности современного человека. Исследование проблемы психосоматической целостности человека требует дальнейшего изучения. Это объясняется ростом динамики социально-экономических событий, а также увеличением количества людей, страдающих от невротических и психосоматических расстройств. Актуальность и недостаточная разработанность данной темы определили выбор направления обобщения существующих эмпирических и практических знаний с целью развития исследования заявленной проблемы.

Резюмируем изложенное в статье:

1. Психосоматическое здоровье зависит от личностных факторов, которые определяют целостное отношение к здоровью как к универсальной ценности, целостности личности как дополнительного адаптивного ресурса, состояния функциональных систем и способствуют оптимальному (приспособительному) разрешению сбоев в системе, возникающих в результате стресс-воздействий и противоречий.

2. Критериями психосоматического здоровья могут быть свойства иерархической модели организации индивидуального здоровья в рамках психодинамической энергоинформационной модели сопряжения психических и соматических особенностей личности.

3. Коррекционная работа с людьми, подвергающимися воздействию разнообразных стрессорных факторов, должна предусматривать работу с социально-психологическими факторами окружающей среды и состоянием внутреннего «Я» человека, а с другой стороны, — комплексную работу с механизмами физической саморегуляции.

4. В результате комплексного психофизиологического (психологическое, физиологическое) воздействия на образ жизни субъекта достигается положительная динамика свойств индивидуальности личности и взаимосвязи уровневых структур с параметрами психосоматического здоровья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Саракул, А.Г.** Инновационный подход на основе теории психодинамической билатеральности к оценке и коррекции психоэмоциональной устойчивости человека в современных условиях жизнедеятельности [Текст]: дисс. ... док. филос. в обл. псих. / А.Г. Саракул.— СПб.: МУФО, 2011. — 67 с.

2. **Быков, К.М.** Кортико-висцеральная патология [Текст] / К.М. Быков, И.Т. Курцин.— М., 1960.— 575 с.

3. **Марилов, В.В.** Общая психопатология [Текст] / В.В. Марилов.— М., Академия, 2002.— 209 с.

4. **Александер, Ф.** Психосоматическая медицина [Текст] / Ф. Александер.— М.: ГЕРРУС, 2000.— 296 с.

5. **Юнг, К.Г.** Психологические типы [Текст] / К.Г. Юнг / Пер. Софии Лорие / Под ред. В. Зеленского.— СПб.:Азбука, 2001.— 711 с.

6. **Саракул, А.Г.** Психосоматическое здоровье и воздействие экстремальных факторов. Метод и технология анализа, коррекции и развития [Текст] / А.Г. Саракул, В.В. Лесничий // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур.— СПб., 2009. № 3.— С. 230–239.

7. **Сущенко, В.П.** Методика использования физических упражнений в сочетании с приемами психоэмоционального самоуправления и оценка эффективности ее применения в психологической подготовке военнослужащих подразделений специального назначения [Текст] / В.П. Сущенко, А.Г. Саракул // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур.— СПб., 2009. № 4.— С. 252–257.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АГЕЕВ Вячеслав Олегович – *научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории системологии факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 550-5820
agvo@nm.ru

АДАЛЁВ Алексей Сергеевич – *кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-72
adalev@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Георгий Александрович – *профессор кафедры метрологии и управления качества Санкт-Петербургского минерально-сырьевого университета «Горный».*
199106. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2
(812) 555-92-81
AlexGA06@yandex.ru

АЛЕШИНА Алена Сергеевна – *аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297 49 90
as_aleshina@mail.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович – *доктор технических наук заведующий кафедрой технологии металлов и металловедения СПбГПУ.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-93-02

АНИКИНА Ирина Дмитриевна – *студент кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297 49 90
ia.88@mail.ru

АРАСЛАНОВ Алексей Владимирович — *ассистент кафедры управления проектами факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 550-5820
sbor_aav@mail.ru

БАЛАГУЛА Юрий Моисеевич – *ассистент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-72
ybalagula@eu.spb.ru

БЕЛЯЕВ Михаил Алексеевич – *кандидат технических наук доцент кафедры электрических машин и электропривода Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*
196601. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2
(812) 476-44-44 доб. 254

БОГОВ Игорь Александрович – *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой турбиностроения и средств автоматики, декан турбиностроительного факультета Института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный работник высшей школы РФ.*
195197. г. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ
(812)540-30-48
iabog@mail.ru

БОДРОВ Андрей Игоревич – *кандидат технических наук доцент кафедры турбиностроения и средств автоматики Института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195197. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ

(812) 540-30-48

bodrov@turbotectspb.com

БОРОНИН Виталий Николаевич – *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-75-72

БРАТЦЕВ Александр Николаевич – *кандидат технических наук заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики РАН*

191186. г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18, ИЭЭ РАН

(812)571-54-10

БУЛГАКОВ Сергей Алексеевич – *заместитель генерального директора ОАО НПО «Русский электропривод»*

196247. Санкт-Петербург, Ленинский пр., 160, оф. 719

(812) 244-15-18

info@ruselprivod.ru

ВАРУЛИН Павел Алексеевич – *аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-85

oldmerin190@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВ Александр Николаевич – *кандидат физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-67-50

a.n.vasilyev@gmail.com

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич – *доктор технических наук академик РАН, президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, профессор кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-62-40

vieg@cef.spbstu.ru

ВОРОБЬЁВА Татьяна Владимировна – *доцент кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

194021. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 17, корп. 3, к. 76.

(812) 552-77-90

tvoryeva@spbstu.ru

ВОХМЯНИН Сергей Михайлович – *доктор технических наук профессор кафедры турбиностроения и средств автоматики Института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195197. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ

(812) 540-30-48

smv.nv@mail.ru

ГАЛЫШЕВ Юрий Витальевич – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-85

galyshev57@yandex.ru

ГЛУХОВ Владимир Викторович – *доктор экономических наук профессор проректор по организационной и экономической деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-75-13

vicerector.me@spbstu.ru

ГОЛОВАЩЕНКО Сергей Федорович – *доктор технических наук профессор, заместитель начальника технологического отдела «Исследовательский центр Форда» Мичиган, США.*

Ford Motor Company, Scientific Research Laboratory, 2101 Village Road, Dearborn, Michigan 48124

1-313-3373738

ГОРОБЕЙ Наталья Николаевна – *доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-90

n.gorobey@mail.ru

ГОРЮНОВ Валерий Павлович – *доктор философских наук профессор заведующий кафедрой философии гуманитарного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-87-01

goryunov42@mail.ru

ДМИТРИЕВ Михаил Викторович – *кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812) 552-50-72
mvdm@ya.ru

ЕРОХИН Владимир Анатольевич – *доктор физико-математических наук начальник НИО «Центр перспективных исследований» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, координатор НКТ «Идеи» Европейского исследовательского совета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-95-13

ЗАЙЦЕВ Алексей Борисович – *кандидат технических наук доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-77-85
abzaytsev@mail.ru

ИВАНОВА Маргарита Александровна – *доктор психологических наук профессор доцент кафедры Математики Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28
(812) 606-62-24

ИВАНОВА Татьяна Викторовна – *кандидат технических наук, ученый секретарь ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»*
195220. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.
(812) 493-93-63
IvanovaTV@vniig.ru

ИВАШИНЦОВ Дмитрий Александрович – *доктор технических наук профессор главный научный сотрудник-консультант ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», Заслуженный деятель науки РФ.*
195220. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.
(812) 534-96-34
ivashintsov@gmail.com

ИДРИСОВА Джамиля Идрисовна — *ассистент кафедры безопасность жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 545-42-84
jamila-idrisova@yandex.ru

КАЧАНОВА Тамара Леонидовна — *доктор технических наук профессор кафедры управления проектами факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-2124
kachanova-tamara@mail.ru

КИБАРДИН Алексей Сергеевич – начальник отдела по разработке электроприводов ОАО НПО «Русский электропривод»
196247. Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 719
(812) 244-15-18
info@ruselprivod.ru

КИРИЛЛОВ Николай Борисович – *доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-37, 552-93-02
mmftkm@yandex.ru

КИЯТКИНА Маргарита Родионовна – *аспирант кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-50-72
margarita_kiyatkina@mail.ru

КОЗЫРЕВ Сергей Васильевич – *кандидат физико-математических наук директор «Центра перспективных исследований» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, руководитель НКТ «Идеи» Европейского исследовательского совета, член Координационного совета Санкт-Петербургского союза ученых.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-95-13
cas@spbstu.ru

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич – *доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-69
z1dehy97@mail.wplus.net

КОРАБЛЕВ Вадим Васильевич – *доктор физико-математических наук профессор, советник ректората Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-20-88
korablev@spbstu.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович – *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-72

КОРОТКИХ Михаил Тимофеевич – *доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-93-02
mmftkm@yandex.ru

КРИВОШЕЕВ Сергей Иванович – *доктор технических наук профессор кафедры электроэнергетики, техники высоких напряжений» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 555-42-86
ksi.mgd@rambler.ru

КРУГЛИКОВ Виктор Николаевич – *доктор педагогических наук, доцент кафедры инженерной педагогики и психологии гуманитарного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-66-22

КУЗНЕЦОВ Вадим Алексеевич – *кандидат технических наук старший научный сотрудник Института электрофизики и электроэнергетики РАН*
191186. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18, ИЭЭ РАН
(812)571-54-10

КУЗНЕЦОВ Павел Алексеевич – *кандидат технических наук профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-95-30
mtomd@mail.ru

КУЧИНСКИЙ Владимир Георгиевич – *доктор технических наук, профессор кафедры электрических и электронных аппаратов электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 555-42-93
vladkuchinsky@mail.ru

ЛАВРОВСКИЙ Сергей Константинович — *доктор технических наук, профессор кафедры технологий комплексных инноваций факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 708-48-39
lavrov@acea.neva.ru

ЛАПШИН Кирилл Леонидович – *доктор технических наук профессор кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
kirill.lapschin@gmail.com

ЛЕСНИЧИЙ Валерий Владимирович – *кандидат медицинских наук старший научный сотрудник Военно-медицинской академии.*
195000. Санкт-Петербург, ул. Боткинская, д. 2, ВМА им. С.М. Кирова
lesnichy2@yandex.ru

ЛИСЯНСКИЙ Александр Степанович – *кандидат технических наук главный конструктор паровых турбин филиала ОАО «Силовые машины» ЛМЗ.*
195197. Санкт-Петербург, Кондратьевский просп, 13 (завод ЛМЗ)
(812) 326-76-28
a.s.lisjanski@lmz.ru

ЛУКЬЯНЕНКО Александр Сергеевич – *доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-77-90
alex.lukyan@rumbler.ru

МАМУТОВ Александр Вячеславович – *кандидат технических наук доцент (Окландский университет, Мичиган, США)*
Oakland University, 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309
1-313-2482473

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович – *доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 5529530
vmamutov@mail.ru

МАНЖУЛА Константин Павлович – *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-84-01

МАЗИЛКИНА Наталья Сергеевна – *аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 555-42-93
mns27@mail.ru

МАСЛИКОВ Владимир Иванович – *доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
vmaslikov@list.ru

МЕЛЬКЕР Александр Иосифович – *профессор кафедры физики прочности и пластичности материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-76-60

МЕРТЕНС Карл Карлович – *доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт- Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ СПбГПУ
(812) 552-95-30
mtomd@mail.ru

МЕТЕЛЕВ Андрей Александрович – *аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, магистр техники и технологии.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812)-552-85-80
petmet@mail.ru

МОЛОДЦОВ Дмитрий Владиславович – *ассистент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт- Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ СПбГПУ
(812) 297-59-28
d.molodtsov@cef.spbstu.ru

НИКИТКОВ Николай Валентинович – *доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Санкт- Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ СПбГПУ
(812) 552-76-64
nnvnvi@mail.ru

НОСКОВА Татьяна Николаевна – *доктор педагогических наук профессор факультета информационных технологий Российского педагогического университета им. А.И. Герцена.*
Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
(812)571-10-03
info@fit-herzen.ru

ОЛЕННИКОВА Марина Васильевна – *кандидат психологических наук доцент кафедры инженерной педагогики и психологии гуманитарного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ СПбГПУ
(812) 552-66-22

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич – *доктор технических наук заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий Санкт- Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ СПбГПУ
(812) 335-58-52

ПАВЛОВА Татьяна Борисовна – *кандидат педагогических наук доцент факультета информационных технологий Российского педагогического университета им. А. И. Герцена*
Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
(812)571-10-03
info@fit-herzen.ru

ПАЛЬМОВ Владимир Александрович — *доктор физико-математических наук профессор заведующий кафедрой механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 535-76-20
vpalmov@bk.ru

ПАНКРАТОВ Юрий Михайлович – *доктор технических наук, профессор кафедры гибких автоматизированных комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 534-13-88
mmfgak@mail.ru

ПЕТРОВ Сергей Николаевич – *кандидат химических наук доцент кафедры функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 335-58-45

ПОМАЗОВ Владимир Сергеевич – *аспирант кафедры электроэнергетики, техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 555-42-86

ПОПОВ Виктор Евгеньевич – *кандидат технических наук заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики РАН*
191186. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18, ИЭЭ РАН
(812)571-54-10

ПОПКОВ Евгений Николаевич – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-50-72
enpopkov@gmail.com

ПОПОВ Сергей Дмитриевич – *кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики РАН.*
191186. . Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18, ИЭЭ РАН
(812)297-42-26

ПОРШНЕВ Геннадий Павлович – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-48-28
pte.enmf@mail.ru

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и металловедения, декан механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-66-23

РАССОХИН Виктор Александрович – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

РУТБЕРГ Филипп Григорьевич – *доктор технических наук академик РАН, директор Института электрофизики и электроэнергетики РАН*
191186. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18, ИЭЭ РАН
(812)315-17-57

РЫЖАКОВА Мария Геннадьевна – *аспирант кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
Marie86Graf02@yandex.ru

САРАКУЛ Андрей Георгиевич — *гранд-доктор философии в области психологии, директор «центра психологической помощи семье».*
194044. Санкт-Петербург, Крапивный пер., 4, оф. 212.
A_Sarakul@list.ru

СЕМАКИНА Елена Юрьевна – *кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
g.semakinalena@gmail.com

СЕРГЕЕВ Виталий Владимирович – *доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-49-90

СИДЕЛЬНИКОВ Борис Викторович – *доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-85-30

СИДОРЕНКО Геннадий Иванович – *доктор технических наук профессор кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-77-71
sidorenko@cef.spbstu.ru

СКУЛКИН Сергей Валерьевич – *аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-49-90

СЛАСТЕНКО Владимир Константинович – *кандидат технических наук проректор по капитальному строительству Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-67-12
vicerector.ce@spbstu.ru

СОЙКИН Владимир Федорович – *начальник проектно-конструкторского отдела ОАО НПО «Русский электропривод»*
196247. Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 719
(812) 244-15-18
info@ruselprivod.ru

СТАРОВОЙТОВ Сергей Анатольевич — *доцент кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
194021. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 17, корп. 3, к. 76.
(812) 552-77-90
starovoitov@phmf.spbstu.ru

СТЕЛЬМАКОВА Надежда Олеговна — *инженер технический директор ЗАО «Турботект Санкт-Петербург».*
190005. Санкт-петербург, ул. 3-я Красноармейская, д. 10/7, литер А.
(812) 380-20-77
stelmakova@turbotectspb.com

СУВОРОВ Игорь Леонидович – *инженер Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*
196601. г. Пушкин, Петербургское шоссе, дом 2
(812) 476-44-44 доб. 254
ia-suvorov@mail.ru

СУРОВ Александр Викторович – *кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики РАН*
191186. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д.18, ИЭЭ РАН
(812)297-42-26

СУЩЕНКО Валерий Петрович – *доктор педагогических наук профессор кафедры физического воспитания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.27, СПбГПУ
docent-07@mail.ru

ТАРАБАНОВ Виктор Николаевич – *доктор технических наук профессор доцент кафедры защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 294-22-62
tarabanov.vik@mail.ru

ТАРХОВ Дмитрий Альбертович – *доктор физико-математических наук профессор доцент кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-67-50
dtarkhov@gmail.com

ТИСЕНКО Виктор Николаевич – *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой систем качества Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ
(812) 552-7221
tisenko@acea.neva.ru

ТОЛМАЧЕВ Валерий Вячеславович – *аспирант, доцент кафедры турбиностроения и средства автоматики Института машиностроения, Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195197. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ЛМЗ-ВТУЗ
(812) 540-30-48,
pim_tolm@mail.ru

ТУРАЛЬЧУК Константин Анатольевич – *заведующий учебной лабораторией кафедры компьютерных и интеллектуальных технологий в проектировании факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ desafinade@gmail.com

УМАНЕЦ Владимир Николаевич – *доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28

УШОМИРСКАЯ Людмила Алексеевна – *доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-93-02
mmftkm@yandex.ru

ФЕДИН Дмитрий Владимирович – *старший преподаватель военной кафедры военно-воздушных сил факультета военного обучения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 5528729
lafine@mail.ru

ФИЛИМОНОВ Андрей Андреевич – *кандидат биологических наук директор департамента управления делами Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 294-42-86
afil@spbstu.ru

ФИЛЬЧКОВ Андрей Иванович – *инженер-проектировщик 1-й категории ОАО НПО «Русский электропривод».*

196247. Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 719
(812) 244-15-18
info@ruselprivod.ru

ФОМИН Борис Федорович – *доктор технических наук профессор кафедры управления проектами факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 550-58-20
fomin@acea.neva.ru

ФОМИН Дмитрий Юрьевич – *аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и металловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-93-02
DmitryFMN@yandex.ru

ФОМИН Олег Борисович — *научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории системологии факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 550-58-20
ofomin@acea.neva.ru

ФРИДЛЯНОВ Владимир Николаевич – *доктор экономических наук профессор, председатель совета Российского гуманитарного научного фонда*

123557. Москва, ул. Пресненский вал, д. 17
(499)702-85-54

ФРОЛОВ Валерий Владимирович – *кандидат технических наук доцент кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-54-60,
vvf@cef.spbstu.ru

ФУКС Михаил Дмитриевич – *аспирант инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*

191015. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49;
(812) 274-16-19

ХАРЗЕЕВА Светлана Элезаровна – *доктор педагогических наук профессор заведующий кафедрой педагогики и психологии Юго-Западного государственного университета.*

305040. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94, ЮЗГУ
(4712)504411
KGTUP@mail.ru

ХОДАК Виктор Викторович – *студент-дипломник факультета инноватики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-88-49
khodak_victor@list.ru

ЧАЙКА Валерий Михайлович – *начальник сектора систем питания отдела по разработке электроприводов ОАО НПО «Русский электропривод».*

196247. Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 719
(812) 244-15-18
info@ruselprivod.ru

ЧЕРЕМИСИН Алексей Владимирович – *кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
laksacher@yandex.ru

ЧЕРНИКОВ Виктор Александрович – *кандидат технических наук профессор кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
chern@pef.spbstu.ru

ЧУСОВ Александр Николаевич – *кандидат технических наук доцент заведующий кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
chusov17@mail.ru

ШАБАНОВ Александр Юрьевич – *кандидат технических наук доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812)-552-85-80
aush2003@mail.ru

ШАДРИН Александр Давыдович – *доктор технических наук профессор кафедры систем качества Санкт-Петербургского политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 552-7221

ШНЕЕРСОН Герман Абрамович – *доктор технических наук член-корреспондент РАН, профессор кафедры электроэнергетики, техники высоких напряжений сгорания Санкт-Петербургского политехнического университета.*

195251. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ
(812) 555-42-86

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Фридлянов В. Н., Ерохин В. А., Козырев С. В., Кораблев В. В. О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ФОРМ ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИИ И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ.

В работе проанализированы последние тенденции в области поддержки фундаментальной науки в Европейском союзе. Проведены параллели между процессами, происходящими в Европейском союзе и России. Рассмотрены основные проблемы, стоящие перед европейской наукой, и меры, принимаемые для их решения. Дан обзор европейской практики использования формальных (библиографических) показателей для экспертной оценки научных проектов.

ПРОРЫВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. НАУЧНАЯ ПОЛИТИКА. РАМОЧНЫЕ ПРОГРАММЫ. ЕВРОПЕЙСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ. УТЕЧКА МОЗГОВ. ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА. ИНДЕКС ЦИТИРОВАНИЯ

Рутберг Ф. Г., Братцев А. Н., Кузнецов В. А., Попов В. Е., Попов С. Д., Суров А. В. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.

Статья посвящена процессу плазменной газификации углеродосодержащего сырья. Наряду с кратким обзором реализованных пилотных и промышленных проектов рассмотрены особенности процесса в отношении нетрадиционных видов топлив. Подробно описаны генераторы плазмы переменного тока. Описан экспериментальный стенд ИЭЭ РАН. Представлены методики проведения и результаты экспериментов по воздушно-плазменной газификации.

ПЛАЗМА. ГЕНЕРАТОР ПЛАЗМЫ. ПЛАЗМЕННАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ. БИОМАССА. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Галышев Ю. В., Зайцев А. Б., Варулин П. А. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ.

В статье представлены результаты расчетного исследования применения двухфазной подачи топлива в четырехтактном дизеле с наддувом. Объект исследования — автотракторный дизель ЯМЗ-238НБ. Описана методика расчета тепловыделения при двухфазном впрыске. Представлены результаты эксперимента, проведенного для получения действительных параметров рабочего процесса, и настройки комплекса программ расчета. Расчетное исследование показало достаточную эффективность применения двухфазной подачи топлива для снижения токсичности и повышения экономичности дизеля.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. АВТОТРАКТОРНЫЙ ДИЗЕЛЬ. ДВУХФАЗНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДАЧИ ТОПЛИВА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

Лапшин К. Л. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ТУРБИНЫ, ПОЛУЧЕННАЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФУЗОРА ЗА ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНЬЮ.

Рассмотрено одномерное адиабатное течение совершенного газа в проточной части последней ступени турбины и следующем за ней диффузоре. Получена простая инженерная формула для оценки дополнительной мощности турбины за счет применения диффузора за последней ступенью.

ТУРБИНА. ПОСЛЕДНЯЯ СТУПЕНЬ. ДИФФУЗОР.

Лисянский А. С., Рассохин В. А., Семакина Е. Ю., Черников В. А. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНОГО ПАТРУБКА ЦНД МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Исследованы характеристики выходного патрубка ЦНД мощной паровой турбины. Приведены результаты экспериментального определения коэффициента потерь для двух вариантов конструкции патрубка. Выполнен анализ структуры течения и даны рекомендации по снижению сопротивления патрубка.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА. ВЫХОДНОЙ ПАТРУБОК. КОЭФФИЦИЕНТ ПОТЕРЬ. ОСЕРАДИАЛЬНЫЙ ДИФФУЗОР. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНОГО ТРАКТА.

Бодров А. И., Вохмянин С. М., Богов И. А., Поршнев Г. П., Стельмакова Н. О. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОЕДИНЕНИЯ ВОЗДУХОВОДА С ПАТРУБКОМ КОМПРЕССОРА ГТЭ-160 НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И РАБОТУ СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ.

Дается сравнительный анализ структуры потока во всасывающем патрубке компрессора газотурбинной установки ГТЭ-160 ЛМЗ при двух различных конструкциях узла соединения воздуховода с патрубком. Исследуются траектории капель жидкости, впрыскиваемой форсунками для промывки на ходу проточной части компрессора от загрязнения. Данные для анализа получены с использованием программы вычислительной газодинамики Fluent.

ВСАСЫВАЮЩИЙ ПАТРУБОК. ВОЗДУХОВОД. СТРУКТУРА ПОТОКА. ПРОМЫВКА КОМПРЕССОРА. ТРАЕКТОРИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ. FLUENT.

Адалев А. С., Булгаков С. А., Кибардин А. С., Кучинский В. Г., Сойкин В. Ф. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.

В статье представлена высокооборотная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 5000 кВт и частотой вращения 8000 об/мин. Рассмотрены принципиальные технические решения, направленные на повышение механической прочности ротора и снижение потерь и позволяющие получить удельные показатели машины, которые превосходят существующие аналоги на основе асинхронных и синхронных машин.

ВЫСОКООБОРОТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ. КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ. РАДИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ РОТОРА. КОЛЛЕКТОРНАЯ КОНСТРУКЦИЯ РОТОРА. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ. ПРОЧНОСТЬ. МАССАГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Галышев Ю. В., Шабанов А. Ю., Зайцев А. Б., Метелев А. А. МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ В ТЕЧЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Статья посвящена разработанной новой методике проведения ускоренных испытаний моторных масел на изменение их свойств в течении срока эксплуатации. Приведено расчетно-экспериментальное обоснование методики на примере испытания серии моторных масел.

МОТОРНОЕ МАСЛО. ИСПЫТАНИЯ МАСЕЛ. ЭКСПЕРТИЗА. РЕСУРС. ИЗНОС. СВОЙСТВА МАСЛА. БРАКОВОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ.

Васильев Ю. С., Сидоренко Г. И., Фролов В. В. МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.

Дано формализованное описание задачи обоснования параметров малых ГЭС. Разработана методика и алгоритмы обоснования параметров малых ГЭС.

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА. МАЛАЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ПАРАМЕТРЫ. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ. МЕТОДИКА. АЛГОРИТМ.

Толмачев В. В., Богов И. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ЗАПАЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ГОРЕЛОЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК.

Рассмотрены проблемы надежности систем розжига камер сгорания и топок котлов турбоустановок. Представлены результаты исследования характеристик горелочного модуля, полученные в стендовых условиях, и даны рекомендации по его конструктивному исполнению и практическому применению.

ИССЛЕДОВАНИЕ. ЗАПАЛЬНЫЕ И СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ГОРЕЛКИ. СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ. КАМЕРА СГОРАНИЯ. ТУРБОУСТАНОВКА.

Аникина И. Д., Поршнев Г. П., Сергеев В. В., ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ.

Представлена методика вычисления теплопотерь через наружные конструкции зданий. Теплопотери вычисляются на основе данных, полученных при тепловизионных обследованиях зданий. Методика основана на моделировании процессов конвективного и лучистого теплообмена.

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ТЕПЛОПОТЕРИ. ОГРАЖДАЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ.

Адалев А. С., Кучинский В. Г., Мазилкина Н. С., Попков Е. Н., Фильчков А. И., Чайка В. М. ОТКЛЮЧЕНИЕ МЕЖФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.

В статье приводятся результаты исследования режимов короткого замыкания в обмотках шестифазной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 5 МВт, а также обсуждаются оптимальные алгоритмы отключения этих режимов с помощью вакуумных выключателей.

ШЕСТИФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ. ВАКУУМНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ. ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

Ивашинцов Д. А., Иванова Т. В. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

Рассмотрены общие вопросы взаимодействия гидротехнических объектов и природно-технической системы. Показано, что наиболее полный учет социально-экологического фактора возможен в аспекте решения проблем безопасности. Рассматриваются вопросы устойчивости ПТС.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ, ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (ПТС), УСТОЙЧИВОСТЬ ПТС.

Алешина А. С., Поршнев Г. П., Скулкин С. В. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Приведены основные положения системы энергетического менеджмента. Рассмотрен международный стандарт ISO 50001:2011. Приведены результаты анализа трех наименее затратных способов сокращения удельного энергопотребления на предприятиях промышленности.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ.

Панкратов Ю. М. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБОРЕЗНЫХ ДОЛБЯКОВ.

Рассмотрен пример работы программы для расчета долбяков, в том числе и отображение хода расчета в графической форме на дисплее, которое позволяет не только выбирать рациональные проектные параметры, но и дает возможность визуально оценивать их близость или удаленность от недопустимых значений.

ДОЛБЯК. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. КОЛЕСО. ПОДРЕЗАНИЕ. ЗАОСТРЕНИЕ.

Головащенко С. Ф., Мамутов А. В., Мамутов В. С. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА LS-DYNA ДЛЯ РАСЧЕТА КАНАЛА РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ.

Для компьютерного расчета электрогидроимпульсной штамповки в конечно-элементном комплексе LS-DYNA 971 разработана модель плазменного канала при электрическом разряде в воде. Для проверки корректности моделирования создана тестовая численная модель одномерной цилиндрической гидродинамики сжимаемой жидкости. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА. КАНАЛ РАЗРЯДА В ВОДЕ. КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA 971. ТЕСТОВАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА.

Лавровский С. К., Ходак В. В. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ PLM.

Приведены практические рекомендации по организации информационно-управляющей среды, ориентированной на конструкторско-технологический цикл машиностроительного предприятия на основе концепции PLM.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. PLM. КОНСТРУКТОРСКАЯ ПОДГОТОВКА. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА.

Коротких М. Т., Ушомирская Л. А., Кириллов Н. Б. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНО-ДУГОВОГО МЕТОДА.

Разработан высокопроизводительный метод механической обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов. В его основу положены электрофизические процессы. Параметры процесса представлены на примере нескольких деталей. Технология используется на металлургических и горных предприятиях.

ТЕХНОЛОГИЙ ПРОЦЕСС. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНО-ДУГОВОЙ МЕТОД.

Мамутов А. В., Мамутов В. С. РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЛЕКСА LS-DYNA.

Показаны возможности конечно-элементного комплекса LS-DYNA для компьютерного моделирования листовой штамповки подвижными средами. Рассмотрены особенности задания параметров давления. Разработан подход для оценки параметров задаваемого давления при статической нагрузке, обеспечивающий сходимость волнового решения к статическому решению.

ШТАМПОВКА ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗАДАВАЕМОГО ДАВЛЕНИЯ.

Алексеев Г. А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА.

В статье рассматрены вопросы обеспечения качества образования прецизионного регулярного микрорельефа различными методами. Исследована устойчивость процесса формообразования в делительных машинах.

МИКРОРЕЛЬЕФ. РЕЗЦОВОЕ УСТРОЙСТВО. ПРОФИЛИРОВАНИЕ. ИНДЕНТОР. СВЯЗАННОСТЬ.

Манжула К. П. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТВЕРДОСТИ С ПРЕДЕЛОМ ВЫНОСЛИВОСТИ МЕТАЛЛА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ.

Представлены результаты исследования корреляционной связи твердости по Виккерсу с пределом выносливости околошовной зоны сварных соединений из стали 09Г2С и 10ХСНД. Определены пределы выносливости основного металла и металла околошовной зоны сварного соединения.

ТВЕРДОСТЬ МЕТАЛЛА. ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СВЯЗЬ. УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

Панкратов Ю.М. УНИФИКАЦИЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБКАТНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.

Изложен алгоритм, позволяющий для всех форм описания исходного профиля зубчатых деталей вычислять координаты точек, углы наклона касательных и орты нормалей в единообразной форме, что намного упрощает профилирование обкатных инструментов.

АППРОКСИМАЦИЯ. ОБКАТКА. ИНСТРУМЕНТ. НОРМАЛЬ. СПЛАЙН.

Радкевич М. М., Фомин Д. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК.

Показаны возможности применения полугорячей деформационно-термической обработки при штамповке круглых в плане поковок и поковок удлиненной формы. Предложены рациональные режимы термомеханического воздействия, обеспечивающие высокий комплекс механических свойств готовых изделий.

ПОЛУГОРЯЧАЯ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. РЕЖИМЫ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. МИКРОСТРУКТУРА. УПРОЧНЕНИЕ.

Мамутов В. С. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ.

Представлена методика применения пьезоэлектрических датчиков с акустическим стержнем для измерения импульсных давлений в процессах электрогидроимпульсной штамповки. Показаны особенности конструирования, тарировки и применения датчиков в условиях сильных электромагнитных наводок. Приведены примеры измерения давления.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ. КОНСТРУКЦИЯ И ТАРИРОВКА. ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЙ.

Воробьева Т. В., Мелькер А. И., Старовойтов С. А. ТЕПЛОТА, ТЕМПЕРАТУРА, ЭНТРОПИЯ.

Рассмотрена эволюция понятий теплота, температура, энтропия. Эти понятия возникли и уточнялись как в связи с потребностями техники, так и в ходе развития науки о тепле. Даны примеры из различных разделов математики, оказавшие влияние на эволюцию этих понятий. Подробно рассмотрен вывод распределений Максвелла и Больцмана. Обсуждается трагедия пионеров в этой области, вызванная консерватизмом и непониманием современников.

ТЕПЛОТА. ТЕМПЕРАТУРА. ЭНТРОПИЯ.

Горобей Н. Н., Лукьяненко А. С. К ВЕРОЯТНОСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.

Квантовый принцип наименьшего действия, сформулированный в предыдущих работах, положен в основу вероятностной интерпретации одночастичной релятивистской квантовой механики. В новом подходе вероятность «течет» в пространстве Минковского с изменением некоторого внутреннего параметра времени частицы, которое мы интерпретируем как ее время жизни. С помощью дополнительного условия стационарности квантового действия это время жизни определяется как функция наблюдаемых параметров реального эксперимента.

ВРЕМЯ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА. ДЕЙСТВИЕ. АМПЛИТУДА ПЕРЕХОДА. ВЕРОЯТНОСТЬ.

Пальмов В. А. К ДВУХСОТЛЕТИЮ ФОРМУЛЫ КОШИ.

Статья посвящена знаменитой формуле Коши для вектора напряжений в сплошной среде, которая получена Коши с использованием рассуждения о равновесии тетраэдра. Вот уже двести лет рассуждение Коши воспроизводится во всех книгах по механике сплошной среды. Автор заявляет, что рассуждение Коши нельзя принять за доказательство формулы Коши, и приводит усовершенствованное доказательство.

ВЕКТОР НАПРЯЖЕНИЙ. НОРМАЛЬ К ПОВЕРХНОСТИ. ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ.

Воробьева Т. В., Мелькер А. И., Старовойтов С. А. ИНФОРМАЦИЯ, ЭНТРОПИЯ, ТЕМПЕРАТУРА.

Рассмотрена эволюция в XX-м веке таких понятий как теплота, температура, энтропия. Наряду с этим обсуждаются новые родственные понятия, возникшие в связи с потребностями информационной техники и в результате появления новых направлений науки (компьютерное моделирование физических процессов, теория нелинейных колебаний, радиационная физика твердого тела). Приведены примеры из различных разделов физики и математики, оказавшие влияние на эволюцию этих понятий. Подробно рассмотрены соотношение между научной неопределенностью и информацией, метод молекулярной динамики, температура твердого тела и кратко — один из примеров самоорганизации хаоса.

ИНФОРМАЦИЯ. ЭНТРОПИЯ. ТЕМПЕРАТУРА. САМООРГАНИЗАЦИЯ.

Сидельников Б. В., Беляев М. А., Суворов И. Л. ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

Рассмотрена возможность использования частотно-асинхронного электропривода турбомеханизмов при работе электродвигателя с меньшими потерями и с максимальным КПД. Проведены исследования АД при различных законах управления и насыщения.

ТУРБОМЕХАНИЗМЫ. ЧАСТОТНО-АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД. МАКСИМАЛЬНЫЙ КПД ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.

Дмитриев М. В., Кияткина М. Р. ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ.

В настоящее время в электрических сетях 6–500 кВ широко используются одножильные кабели, имеющие металлические экраны. Для борьбы с токами, которые наводятся в экранах, применяют так называемую транспозицию экранов. Статья посвящена исследованию случаев, когда транспозиция экранов может оказаться неэффективной.

ОДНОЖИЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЭКРАН. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ. ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ. НАВЕДЕННЫЙ ТОК.

Кривошеев С. И., Помазов В. С., Шнеерсон Г. А. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА СКИН-СЛОЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕГАГАУСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.

Генерация сверхсильного магнитного поля сопровождается экстремально высокими значениями линейной плотности тока в проводнике. При этом наблюдается гидродинамическое течение, осложненное нелинейной диффузией магнитного поля и электрическим взрывом поверхностного слоя проводника. В статье представлены результаты анализа процессов в скин-слое для характерных режимов.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ. УДАРНАЯ ВОЛНА. СКИН-СЛОЙ.

Мертенс К. К., Кузнецов П. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ.

Представлены результаты экспериментальных исследований динамической сжимаемости, коэффициента трения и бокового давления при импульсном нагружении металлических порошков. Установлена эффективность использования разработанных методик и устройств. Получены конкретные значения исследованных свойств для порошков на основе железа и меди.

ПРЕССОВАНИЕ ПОРОШКОВ. ДИНАМИЧЕСКАЯ СЖИМАЕМОСТЬ. БОКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ. ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЕ ПРЕССОВАНИЕ.

Орыщенко А. С., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Фукс М. Д., Петров С. Н. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 2: ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВЫДЕРЖКИ.

Исследована структурная стабильность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Выявлены значительные качественные и количественные изменения всех структурных составляющих и отдельных фаз сплава в интервале времени выдержки до 100 ч. Установлено, что наибольшая интенсивность диффузионных процессов в сплаве наблюдается в начальный период выдержки до ~ 2 ч.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. МИКРОСТРУКТУРА. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ. ЛИКВАЦИЯ. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ.

Кривошеев С. И., Сластенко В. К. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ.

На базе структурно-временного критерия разрушения проведено обобщение экспериментальных результатов по разрушению образцов в различных схемах нагружения. Эксперименты выполнены с применением магнитно-импульсного способа, который позволяет достоверно определять параметры воздействующего на материал импульса давления. Полученные данные демонстрируют не только пороговой характер разрушения, но и существенное увеличение основных характеристик процесса разрушения — разрушающей нагрузки и энергии образования новых поверхностей при нагружении в микросекундном диапазоне. Связь этих параметров позволила определить критический размер (масштаб) разрушения.

ИМПУЛЬСНАЯ ПРОЧНОСТЬ. ИМПУЛЬСНОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ РАЗРУШЕНИЯ. РАЗМЕР (МАСШТАБ) РАЗРУШЕНИЯ.

Мертенс К. К., Кузнецов П. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ.

Представлены результаты экспериментальных исследований комбинированных процессов электрогидроимпульсного прессования и предварительного прессования заготовок в жестких пресс-формах виброформованием и гидростатическим прессованием. Установлена эффективность использования комбинированных процессов для получения высокоплотных изделий из керамических и металлических порошков. В среднем плотность изделий и прочность увеличиваются на 20–25 %. Разработаны новые перспективные схемы комбинированного прессования.

ПРЕССОВАНИЕ ПОРОШКОВ. КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ. ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЕ ПРЕССОВАНИЕ.

Масликов В. И., Чусов А. Н., Черемисин А. В., Рыжакова М. Г. ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ПОЛИГОНОВ ТБО ДЛЯ ВЫБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ.

Статья посвящена оценке геоэкологического риска загрязнения атмосферного воздуха газовыми эмиссиями полигонов ТБО. Показано, что в условиях отсутствия натурных данных о состоянии полигонов ТБО целесообразно использовать методы математического моделирования образования газовых эмиссий и их распространения в атмосферном воздухе при естественном разложении отходов, а также в случае пожаров. Выполненная оценка рисков загрязнения атмосферного воздуха вредными веществами от действующего полигона подтверждает опасность для населения, проживающего вблизи санитарной зоны полигона, даже диффузных выбросов биогаза, которая резко возрастает в случае возгорания отходов. Это подтверждает необходимость создания системы сбора и утилизации биогаза при планировании работ по рекультивации полигона с целью минимизации геоэкологического риска загрязнения атмосферного воздуха и возникновения пожаров.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЫБРОСЫ ПОЛИГОНОВ ТБО. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК. МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ.

Балагула Ю. М., Боронин В. Н., Коровкин Н. В. РЕГИСТРАЦИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ.

Предложена методика регистрации двигательной активности рыб на основе компьютерной обработки видеозаписей и фрактального анализа временных рядов для изучения вопроса о влиянии различных электромагнитных воздействий на живые организмы. В статье описана архитектура соответствующего программно-аппаратного комплекса и приведены значения фрактальной размерности, характеризующие двигательную активность рыб.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭКОЛОГИЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ. ДВИГАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ РЫБ. ВИДЕОРЕГИСТРАЦИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ.

Филимонов А. А.. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ БОТАНИЧЕСКИХ САДОВ.

В статье представлены результаты исследования взаимосвязи между социо-экономическими индикаторами (ВВП, уровень ВВП на душу населения, численность городского и сельского населения, плотность населения) и числом ботанических садов (БС) в странах мира.

Высказано предположение о том, что созданию БС предшествуют осознание потребности в повышении престижа (личного либо государственного) и/или оформившиеся запросы со стороны образования (науки). Как следствие этого, время и способы создания БС в разных странах могут существенно варьироваться в зависимости от их географического положения и культурно-исторического «фона», в том числе мощности экономики.

БОТАНИЧЕСКИЕ САДЫ. ВВП. ИЧР. СОХРАНЕНИЕ ВИДОВ РАСТЕНИЙ. РАЗВИТИЕ ЭКОНОМИКИ.

Уманец В. Н. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖКХ. ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

Дан анализ геоэкологических проблем при строительстве и обращении с отходами. Изложена история становления и развития геоэкологических исследований. Детализированы вопросы геоэкологических исследований в отрасли строительства и ЖКХ. Определен круг основных научно-практических задач строительной геоэкологии.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ГЕОСФЕРЫ ЗЕМЛИ. ЛИТОСФЕРА. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ. СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Масликов В. И., Чусов А. Н., Молодцов Д. В., Рыжакова М. Г. ЗОНАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИЙ БИОГАЗА НА ПОЛИГОНЕ ТБО ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОТХОДОВ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ.

Предложено оценку состояния полигона ТБО и выбор технологии рекультивации производить на основе определения зональной эмиссии биогаза на его участках. На примере крупного полигона ТБО города Санкт-Петербурга произведен расчет эмиссии биогаза на его участках и выполнено обоснование целесообразности зонального управления процессами разложения отходов. Показано преимущество управляемого режима разложения отходов, позволяющего более полно использовать биогазовый потенциал и ускорить минерализацию отходов.

ПОЛИГОН ТБО. БИОГАЗ. УПРАВЛЕНИЕ РАЗЛОЖЕНИЕМ ОТХОДОВ. РЕКУЛЬТИВАЦИЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИГОНА.

Тархов Д. А., Васильев А. Н., Идрисова Д. И. НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.

В статье рассмотрены проблемы нейросетевого моделирования систем мониторинга загрязнения атмосферы и параметров воздуха рабочей зоны на рабочих местах в строительстве.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА. ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ. УСЛОВИЯ ТРУДА. ВОЗДУХ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ. СТРОИТЕЛЬТВО.

Тархов Д. А., Васильев А. Н., Тарабанов В. Н., Идрисова Д. И. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ.

Рассмотрены задачи нейросетевого моделирования систем обеспечения безопасности труда на строительных машинах в условиях вечной мерзлоты.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МОНИТОРИНГ. БЕЗОПАСНОСТЬ. УСЛОВИЯ ТРУДА.СТРОИТЕЛЬСТВО.

Никитков Н. В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРЕН АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.

В статье рассмотрены вопросы аналитического определения величины износа вершин режущих алмазных зерен в кругах. Предложены зависимости для вычисления значений износа зерен в кругах при различных режимах шлифования твердых хрупких материалов.

МОДЕЛЬ. ИЗНОС ЗЕРЕН. АЛМАЗНЫЕ КРУГИ. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ИЗНОСА.

Адалев А. С., Кучинский В. Г., Попков Е. Н., Фильчков А. И., Чайка В. М. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ШЕСТИФАЗНОЙ ВЕНТИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.

Предложена имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов, эквивалентирующая машину в фазных координатах относительно внешних зажимов статорных обмоток и позволяющая выполнять моделирование электромагнитных процессов с учетом состояния магнитной системы машины.

ШЕСТИФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА. ВЕНТИЛЬНАЯ МАШИНА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МАШИННО-ВЕНТИЛЬНАЯ СИСТЕМА. ИДЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ СТАТОРНЫХ ЦЕПЕЙ.

Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ: ГЕНЕРАЦИЯ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ.

Информационные технологии физики систем автоматически генерируют достоверное теоретическое системное знание, используя для этого данные и знания, накопленные эмпирической наукой. Генерация знания производится автоматически без контакта с экспертами.

СИСТЕМНОЕ ЗНАНИЕ. ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОММУНИКАТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ. РЕСУРСЫ РЕШЕНИЙ. СИСТЕМНАЯ ОНТОЛОГИЯ. ПРЕДМЕТНАЯ ОНТОЛОГИЯ.

Агеев В. О., Арасланов А. В., Качанова Т. Л., Туральчук К. А., Фомин Б. Ф., Фомин О. Б. ГЕНЕРАЦИЯ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ В РЕГИОНАХ РОССИИ.

В статье на основе региональной статистики методами физики систем получено на уровне системной онтологии знание о социальной напряженности в регионах РФ. Это знание представляется в виде информационного, интеллектуального, когнитивного, технологического ресурсов решений социальных проблем. Ресурсы автоматически генерированы из эмпирического описания системы технологиями физики систем.

ФИЗИКА СИСТЕМ. СИСТЕМНОЕ ЗНАНИЕ. РЕСУРСЫ РЕШЕНИЙ. СИСТЕМНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ. СИСТЕМНАЯ ЭКСПЕРТИЗА. СИСТЕМНЫЙ ДИЗАЙН.

Кругликов В. Н., Оленникова М. В. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТИВАЦИИ И ПРОБЛЕМЫ МОТИВИРОВАНИЯ.

В работе обсуждаются теоретические проблемы мотивирования персонала, дается обоснование необходимости учета динамических характеристик мотивации при разработке систем мотивирования, предложены концептуальные основы создания таких систем.

МОТИВАЦИЯ. МОТИВАЦИЯ ЧЕЛОВЕКА. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТИВАЦИИ. ПОДБОР ПЕРСОНАЛА. СИСТЕМА МОТИВАЦИИ ПЕРСОНАЛА. МОТИВАЦИОННОЕ ПОЛЕ. МОТИВАЦИОННАЯ НАПРАВЛЕННОСТЬ.

Глухов В. В., Тисенко В. Н., Шадрин А. Д. ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТОВ МЕНЕДЖМЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ.

В статье рассмотрены проблемные вопросы применения стандартов менеджмента в работе образовательных учреждений. Обращено внимание на необходимость правильного использования термина «качество», а также на использование современных разработок системного анализа для «измерения» качества.

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА. СТАНДАРТЫ. КАЧЕСТВО. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ.

Горюнов В. П. ГУМАНИТАРНЫЙ СТЕРЖЕНЬ СОВРЕМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ.

Рассмотрена связь возникновения новой социальной реальности в России и изменения системы образования, в том числе его гуманитаризации. Показано содержание и роль гуманитаризации в инженерном образовании. Выдвинут тезис о социальной сущности техники, которая составляет относительно самостоятельное содержание технических наук, а научное исследование законов материально-технического развития в значительной мере относится к сфере гуманитарных и общественных наук. Сформулирован вывод о гуманитаризации как переходе к системному образованию, предметом которого является общество.

НАУКА. ТЕХНИКА. ОБРАЗОВАНИЕ. ИДЕОЛОГИЯ. СОЦИАЛЬНОСТЬ. ИНЖЕНЕР. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС.

Носкова Т. Н., Павлова Т.Б. НОВЫЕ ПРИОРИТЕТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ СОВРЕМЕННОГО ВУЗА.

Анализируется деятельность педагога в образовательной среде современного вуза с широким применением сетевых информационных технологий и электронных образовательных ресурсов. Обозначено проявление новых информационных и коммуникационных приоритетов, вызывающих изменения в характере педагогической деятельности. Подчеркнута роль педагога в процессе формирования информационной образовательной среды вуза. Высокое качество образовательных услуг может быть достигнуто, если педагог будет динамично реагировать и трансформировать свою деятельность в соответствии с изменениями, происходящими в российском и глобальном образовательном и информационном пространстве.

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ. ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА. СЕТЕВАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ КОММУНИКАЦИЯ. СЕТЕВАЯ КОММУНИКАЦИЯ. КОММУНИКАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.

Федин Д. В. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА — СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ.

В статье рассмотрены вопросы практического применения программы прогнозирования, модели учебно-методической работы преподавателя-куратора и комплекса практических рекомендаций с начала обучения студентов в вузе. Раскрыты значение и актуальность всестороннего изучения и совершенствования учебно-методической и учебно-воспитательной работы, за счет разработки и апробации экспериментальной модели учебно-методической деятельности куратора с целью повышения эффективности образовательного процесса.

ОБРАЗОВАНИЕ. МОДЕЛЬ. МЕТОДИКА. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. УЧЕБНАЯ УСПЕВАЕМОСТЬ. АТТЕСТАЦИЯ.

Кругликов В. Н. ИНТЕРАКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ.

В статье дается определение, рассматриваются роль, значение, формы и принципы реализации технологий интерактивного обучения в практике вузов. Актуальность статьи связана с введением в образовательные стандарты обязательного требования об использовании форм интерактивного обучения при аудиторной работе.

ИНТЕРАКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ. АКТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ. КООПЕРАТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ. ФОРМЫ. МЕТОДЫ. ПРИНЦИПЫ ОБУЧЕНИЯ. МОДЕЛИ ОБУЧЕНИЯ. КОЛЛЕКТИВНОЕ ВЗАИМООБУЧЕНИЕ. ЭЛЕКТРОННОЕ ОБУЧЕНИЕ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА.

Иванова М. А. СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ АРАБСКИХ СТУДЕНТОВ ИЗ СТРАН БЛИЖНЕГО ВОСТОКА.

Социологический портрет арабских студентов из стран Ближнего Востока включает факторы, влияющие на степень готовности студентов к обучению в российских вузах и темпы их адаптации к новым социальным условиям.

СОЦИОЛОГИЯ. СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ. СТУДЕНТ. АРАБСКИЕ СТУДЕНТЫ. БЛИЖНИЙ ВОСТОК. СТРАНА. СОЦИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ.

Харзеева С. Э. ПОНИМАНИЕ КАК КОГНИТИВНЫЙ ПРОЦЕСС И КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ЗНАНИЙ В КОМПЕТЕНТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ.

Понимание представлено как процесс взаимодействия между поступающей информацией и ментальными смысловыми концептуальными структурами субъекта. Авторские когнитивные модели категориальных и межкатегориальных структур индивидуального знания представляют собой системы смысловых элементов с их фреймами и смысловых связей между ними.

ПОНИМАНИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЗНАНИЯ. КОГНИТИВНЫЕ СМЫСЛОВЫЕ СТРУКТУРЫ.

Сущенко В. П., Саракул А. Г., Лесничий В. В. ТЕОРИЯ ЦЕЛОСТНОЙ ЛИЧНОСТИ И ПСИХОСОМАТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА (ОБЗОР КЛИНИКО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ).

В статье сделана попытка обобщения существующих концепций и теорий психосоматической медицины с позиций теории целостной личности с целью развития ресурсного подхода к деятельности современного человека и коррекции психосоматического здоровья. Предлагаемый материал является первой попыткой поиска доказательной базы гипотезы о трех ведущих психических функциях (самоорганизация, саморегуляция и саморазвитие), приносящих изнутри «ресурс целостности» для естественного преодоления человеком проблем внутреннего «Я» и психосоматического здоровья.

ПСИХОСОМАТИКА. САМОРЕГУЛЯЦИЯ. ПСИХИЧЕСКАЯ ЦЕЛОСТНОСТЬ ЛИЧНОСТИ. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ОСОЗНАННОСТИ. СИМВОЛИЧЕСКИЙ ЯЗЫК ОРГАНОВ. ПСИХОАНАЛИЗ. БЕССОЗНАТЕЛЬНОЕ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Fridlyanov V. N., Yerokhin V. A., Kozyrev S. V., Korablev V. V. ON THE IMPROVEMENT OF METHODS OF THE SCIENTIFIC RESEARCH SUPPORT IN RUSSIA AND EUROPEAN UNION.

In this work, we analyze the recent trends in the scientific research support in the European Union. Parallels are drawn between the processes in the European Union and in Russia. We discuss the main challenges facing the European science and steps that are taken in order to deal with them. The European experience of using the formal (bibliographical) criteria in evaluation of the scientific projects is reviewed.

FRONTIER RESEARCH. SCIENCE POLICY. FRAMEWORK PROGRAMS. EUROPEAN RESEARCH COUNCIL. BRAIN DRAIN. PEER REVIEW. CITATION INDEX.

Rutberg Ph. G., Bratsev A. N., Kuznetsov V. A., Popov V. E., Popov S. D., Surov A. V. RENEWABLE ENERGY SOURCES BASING ON PLASMA PROCESSES.

The paper deals with the plasma gasification of carbonaceous feedstock. It comprises brief review of existing pilot and industrial projects and characteristic features of alternative fuels processing. AC plasma torches are described in details. IEE RAS experimental installation is described. Experimental procedures and results on air plasma gasification are represented.

PLASMA. PLASMA TORCH. PLASMA GASIFICATION. BIOMASS. RENEWABLE ENERGY.

Galyshev J. V., Zaytsev A. B., Varulin P. A. CALCULATIONS CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE FUEL TO IMPROVE PERFORMANCE AUTOMOTIVE DIESEL.

The paper presents the results of calculation research use two-phase characteristics of the fuel in the four-cycle diesel with supercharging. The object of research - automotive diesel JAMZ-238NB. Technique is described calculating the heat in the two-phase injection. The results of an experiment conducted to obtain the real parameters worker process and configuration of the complex calculation programs. The calculated research has shown sufficient efficacy of the two-phase fuel to reduce toxicity and increase the efficiency of diesel engines for example, JAMZ-238NB.

SIMULATION. AUTOMOTIVE DIESEL. TWO-PHASE CHARACTERISTICS OF FUEL. ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE.

Lapschin K. L. EXTRA TURBINE POWER THROUGH THE USE OF DIFFUSER AFTER THE LAST STAGE. Considered a one-dimensional adiabatic flow of a perfect gas in the flow part of the last turbine stage and the diffuser, which located after it. Obtained a simple engineering formula to measure an additional power of the turbine through the use of the diffuser, which is located behind the last stage.

TURBINE. THE LAST STAGE. DIFFUSER.

Lisyanskii A. S., Rassokhin V. A., Semakina E. Yu., Chernikov V. A. OPTIMIZATION OF THE EXHAUST PIPE OF LOW-PRESSURE CYLINDER POWERFUL STEAM TURBINE BASED ON EXPERIMENTAL RESEARCH.

This article is concerned with characteristics of outlet pipe LPC for powerful steam turbine. The results of experimental determination of the loss factor for the two design options are presented. The flow structure analysis performed and recommendations for reducing the pipe resistance are made.

STEAM TURBINE. OUTLET PIPE. LOSS FACTOR. AXIAL-RADIAL DIFFUSER. THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF OUTFLOW TRACT.

Bodrov A. I., Vokhmyanin S. M., Bogov I. A., Porshnev G. P., Stelmakova N. O. ANALYSES OF THE GTE-160 COMPRESSOR SUCTION INLET FASTENER DESIGN INFLUENCE ON THE STREAM STRUCTURE AND ON THE COMPRESSOR WASHING SYSTEM

The comparative analysis of the path structure in the compressor intake inlet of the gas turbine unit GTE-160 LMZ on two difference designs of air duct with intake inlet connection is given. Trajectories of the liquid drops, injected by atomizers for the compressor's flow path on-line washing from fouling are investigated. Data for the analysis are received with CFD (Computational Fluid Dynamics), Fluent program usage.

INTAKE INLET. AIR DUCT. STREAM STRUCTURE. COMPRESSOR WASHING. TRAJECTORIES OF THE LIQUID DROPS. FLUENT.

Adalev A., Bulgakov S., Kibardin A., Kuchinsky V., Soikin V. DESIGN FEATURES OF THE HIGH-SPEED ELECTRIC MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS.

The present paper treats a high-speed permanent magnet machine with the power of 5000 kW and the rotation frequency of 8000 rpm. Principal technical solutions intended for increase of rotor mechanical strength and for decrease of power loss are discussed. These solutions allow to obtain specific characteristics of the machine that are predominate those for synchronous and induction machines.

HIGH-SPEED ELECTRIC MACHINE. ELECTRIC MACHINE EXCITED WITH PERMANENT MAGNETS. MAGNETIC SYSTEM CONFIGURATION. RADIAL ROTOR. COLLECTOR ROTOR. HEAT-TRANSFER CALCULATION. STRENGTH CALCULATION. STRENGTH. MASS-DIMENSIONAL CHARACTERISTICS.

Galishev U. V., Shabanov A. U., Zaitsev A. B., Metelev A. A. METHOD OF ACCELERATED TESTING OF MOTOR OIL TO CHANGE THEIR PROPERTIES DURING THE TERM OF USE.

In clause the developed new technique of realization of the accelerated tests of motor oils on change of their properties is submitted during term of operation. The settlement - experimental substantiation of a technique on an example of test of a series of motor oils is given.

MOTOR OIL. TESTS OF OILS. EXAMINATION. RESOURCE. DETERIORATION. PROPERTIES OF OIL. REJECTION PARAMETERS.

Vasiliev Ju. S., Sidorenko G. I., Frolov V. V. THE TECHNIQUE FOR A PARAMETERS SUBSTANTIATION OF SMALL POWER PLANTS.

The formalized description of a task of parameters optimization of small power plants is given. The technique and algorithms for a parameters substantiation of small power plant is developed.

HYDROPOWER. SMALL HYDROPOWER PLANT. PARAMETERS. FORMALIZED DESCRIPTION. TECHNIQUE. ALGIRITHM.

Tolmachov V. V., Bogov I. A. EXPERIMENTAL STUDY OF VORTEX GLOW-STABILIZING BURNERS MODULE FOR TURBINES использовать это название!!

Some problems of the ignition systems reliability in the combustion chambers and in the boilers of steam turbines are examined in the article. Findings of technical characteristics investigation in burner's modulus on the test stand presented in the article simultaneously with useful recommendations on its embodiment and practical application.

RESEARCHE. FLAME-STABILISING IGNITERS. FIRING SYSTEMS. COMBUSTION CHAMBER. TURBINE-INSTALATION.

Anikina I. D., Porshnev G. P., Sergeev V. V. HEAT MONITORING OF BUILDINGS.

The methodology of calculating heat losses through exterior building constructions was shown. The heat losses are calculated using the test data according to heat monitoring of buildings. The technology is based on process modeling of heat convection and heat-radiating exchange.

HEAT MONITORING. ENERGY SAVINGS. HEAT LOSSES. PROTECTING CONSTRUCTION

Adalev A.S., Kuchinsky V. G., Mazilkina N. S., Popkov E. N., Filchkov A. I., Chaika V. M. BREAKING OF INTERPHASE SHORTS IN AN ELECTRIC MACHINE WITH THE PERMANENTS MAGNETS EXCITATION.

The paper presents briefly a study of shorts in the windings of a six-phase electric 5MW machine excited by permanent magnets. Optimal algorithms of cutting-off short currents with vacuum breakers are revealed.

SIX-PHASE ELECTRIC MACHINE. PERMANENT MAGNETS. VACUUM BREAKER. THREE-PHASE SHORT CIRCUIT.

Ivashintsov D. A., Ivanova T. V. GENERAL ISSUES OF COOPERATION BETWEEN HYDROPOWER PLANTS AND NATURAL-TECHNICAL SYSTEM.

The article deals with the general issues hydropower plants and natural-technical system cooperation. It is shown, that estimation of social-economical factors is possible in aspects of solving safety problems. The questions of natural-technical system stability are described.

HYDROPOWER PLANTS. NATURAL-TECHNICAL SYSTEM. STABILITY OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEM.

Aleshina A. S., Porshnev G. P., Skulkin S. V. ENERGY EFFICIENT MANAGEMENT IN INDUSTRY.

The main tasks of energy management system are set. The international standard ISO 50001:2011 is considered. The results of analysis of three ways to decrease unit energy consumption which require the least expenses are described.

ENERGY EFFICIENCY. ENERGY SAVING POTENTIAL. ENERGY MANAGEMENT SYSTEM

Pankratov Yu. M. AUTOMATED DESIGN GEAR CUTTER.

Set forth an example of the program for the calculation of shaping cutters, representing him, including a graphical display that allows you to choose not only the rational design parameters, but also allows a visual assessment of their proximity or distance from the invalid values.

RAM. DESIGN. INTERFERENCE. WHEEL. CROPPING. SPECIAL

Golovashchenko S. F., Mamutov A. V., Mamutov V. S. USING LS-DYNA CODE FOR COMPUTER SIMULATION OF DISCHARGE CHANNEL AT ELECTROHYDROIMPULSE STAMPING.

The model of the plasma discharge channel in water for computer simulation of electrohydroimpulse stamping using finite-element code LS-DYNA 971 is developed. The test numerical hydrodynamic model for validation of computer simulation is created. Results of computer simulation are confirmed experimentally.

ELECTROHYDROIMPULSE STAMPING. DISCHARGE CHANNEL. COMPUTER SIMULATION. FINITE-ELEMENT COMPUTER COMPLEX LS-DYNA 971. TEST NUMERICAL MODEL. CONFIRMED EXPERIMENTALLY.

Lavrovsky S. K., Khodak V. V. DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION ENGINEERING COMPANY BASED ON THE CONCEPT OF PLM.

Practical recommendations about the organization of the information-operating environment focused on technological and design cycle of the engineering company based on the concept of PLM.

INFORMATION TECHNOLOGY. DESIGN. PRODUCTION. PLM. CONSTRUCTION PREPARATION. TECHNOLOGICAL PREPARATION.

Korotkikh M. T., Ushomirskaya L. A., Kirillov N. B PROCESS OF MANUFACTURING EFFICIENCY OF DIFFERENT PARTS OF THE USE ELECTROCONTACT-ARC METHOD.

Developed a high-performance method for machining difficult-to steels and alloys. It is based on the electrical processes. The parameters of the process on the example of several parts. The technology used in the metallurgical and mining enterprises.

TECHNOLOGY PROCESS. ELECTRIC-ARC METHOD.

Mamutov A. V., Mamutov V. S. COMPUTER SIMULATION OF METALFORMING BY MOVABLE MEDIA USING LS-DYNA CODE.

Features of finite-element LS-DYNA code for computer simulation of technological problems of sheet metal stamping using movable stamping media are shown. The approach for estimation of parameters of defined pressure at static loading, which provide convergence from a wave-dynamic solution to a static solution, is developed.

SHEET METAL STAMPING. MOVABLE STAMPING MEDIA. COMPUTER SIMULATION. FINITE-ELEMENT LS-DYNA CODE. ESTIMATION OF PARAMETERS OF DEFINED PRESSURE.

Alexeyev G. A. ENSURING THE QUALITY OF THE FORMATION OF PRECISE REGULAR MICRORELIEF.

The article reviews the issues of providing the quality of precision regular micro relief formation with various methods. Researching stability of micro relief formation process in dividing machines.

MICRO RELIEF. CUTTING TOOL. PROFILING. INDENTOR. COHESION.

Manzhula K. P. RELATIONSHIP HARDNESS AND FATIGUE LIMIT HEAT AFFECTED ZONE METAL WELDS STEEL BUILDING.

The results of the study of correlation of the Vickers hardness with a limit of endurance of heat-affected zone of welded joints of steel 09G2S and 10HSND. The limits of endurance of the base metal and the metal heat-affected zone of welded joint.

HARDNESS OF THE METAL. THE ENDURANCE LIMIT. CORRELATION. FATIGUE TESTS.

Pankratov Yu. M. UNIFICATION OF PROFILING TOOLS FLOW FORMING.

The algorithm, which allows for all forms of description of the initial profile of gear parts to calculate the coordinates of points, angles of inclination of the tangent and normal vectors in a uniform manner, which greatly simplifies the profiling of flow forming tools.

APPROXIMATION. BREAK-IN. TOOL. NORMAL. SPLINE.

Radkevich M. M., Fomin D. U. APPLYING OF SEMIHOT DEFORMATION-THERMAL FORGING OF STEEl PIECES.

Possibilities of application of semihot deformation-thermal processing under forging steel pieces, which is round in plan and the extended form were shown. The rational conditions of thermo-mechanical process providing a high complex of mechanical properties of finished steel pieces are offered.

SEMIHOT DEFORMATION-THERMAL TREATMENT. CONDITIONS DEFORMATION-THERMAL TREATMENT. MECHANICAL PROPERTIES. MICROSTRUCTURE. STRENGTHENING.

Mamutov V. S. MEASUREMENT OF PRESSURE IN PROCESSES OF ELECTROHYDROIMPULSE STAMPING.

The procedure of application of piezoelectric probes with an acoustic rod for measuring of impulse pressures in processes of electrohydroimpulse stamping is presented. The features of design, calibration and application of probes under conditions of strong electromagnetic noise are shown. The examples of measurement are given.

ELECTROHYDROIMPULSE STAMPING. MEASURING OF IMPULSE PRESSURES. PIEZOELECTRIC PROBES. DESIGN. CALIBRATION AND APPLICATION OF PROBES.

Vorobyeva T. V., Melker A. I., Starovoitov S. A. HEAT, TEMPERATURE, ENTROPY.

The history of such notions as heat, temperature, and entropy is considered. The notions were created and evolved both with technique's requirements and during the advancement of heat science. Some examples from different fields of mathematics which had a great impact on the notion evolution are given. The deduction of Maxwell and Boltzmann distributions is fully considered. The tragedy of pioneers who worked in this filed is also discussed.

HEAT. TEMPERATURE. ENTROPY.

Gorobey N. N., Lukyanenko A. S. ON A PROBABILISTIC INTERPRETATION OF RELATIVISTIC QUANTUM MECHANICS.

Quantum Action Principle that has been formulated earlier is used as a ground for a probabilistic interpretation of one-particle relativistic quantum mechanics. In the new approach the probability «flows» in the Minkowsky space being dependent on an inner time parameter, which we interprete as the particle life time. By means of an additional stationarity condition for the quantum action the life time is determined as a function of observable parameters of the real experiment.

TIME. RELATIVISTIC MECHANICS. ACT. TRANSITION AMPLITUDE. PROBABLY.

Palmov V. A. TWO HUNDRED YEARS ANIVERSARY OF CAUCHY FORMULAE.

Article is devoted to famous Cauchy formulae for stress vector in continuous medium. Cauchy constructed this formulae using reasoning about equilibrium of tetrahedron. Two hundred years this motivation is reproduced in any book on continuum mechanics. Author declares that Cauchy motivation can't be admitted as proof and presents improved motivation.

STRESS VECTOR. UNIT NORMAL TO THE SURFACE. STRESS TENSOR.

Vorobyeva T. V., Melker A. I., Starovoitov S. A. INFORMATION, ENTROPY, TEMPERATURE.

The evolution of such notions as heat, temperature, and entropy in the twentieth century is considered along with new relative notions. The new notions were created in connection with the demands of informatics as well as a result of the appearance of new scientific lines (computer simulation of physical properties, theory of nonlinear oscillations, radiation solid state physics). Some examples from different fields of physics and mathematics which had a great impact on the notion evolution are given. The relation between scientific uncertainty and information, molecular dynamics method, temperature of a solid are considered in detail. An example of chaos self-organization is briefly discussed.

INFORMATION. ENTROPY. TEMPERATURE. SELFORGANIZATION.

Sidelnikov B. V., Belyaev M. A., Suvorov I. L. FREQUENCY CONTROL OF ASYNCHRONOUS MOTOR IN ORDER TO MAXIMIZE EFFICIENCY.

The possibility of using frequency-asynchronous electric turbomehanizmov when the motor with lower losses and maximum efficiency. Investigations of blood pressure control for different laws and saturation.

TURBOMEHANIZMY. FREQUENCY-ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE. THE MAXIMUM EFFICIENCY OF THE MOTOR.

Dmitriev M. V., Kiyatkina M. R. CABLE SCREEN TRANSPOSITION.

Now in electric networks 6-500 kV the power cables with metallic screens are widely used. For struggle against induced currents in screens, apply a so-called screen transposition. Article is devoted research of cases when the screen transposition can appear inefficient.

POWER CABLE. METALLIC SCREEN. SCREEN GROUND CONNECTION. SCREEN TRANSPOSITION. INDUCED CURRENT.

Krivosheev S. I., Pomazov V. S., Shneerson G. A. DISTINCTIONS OF SKIN LAYER ELECTRIC EXPLOSION AND THE SHOCK WAVE FORMING IN THE MULTIMEGAGAUSS MAGNETIC FIELD.

At extremely high linear current density a conductor is under action of megagauss magnetic field. As consequence of it hydrodynamic flow, nonlinear field diffusion and electrical explosion of boundary layer occur. Results of analysis of processes in skin-layer are presented in the paper.

HYDRODYNAMIC FLOW. SHOCK WAVE. SKIN LAYER.

Mertens K. K., Kuznetcov P. A. INVESTIGATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF POWDERS UNDER IMPACT LOADING.

Results of experimental investigations of the dynamic compressibility coefficient of friction and lateral pressure under impact loading of metallic powders are presented. Effectiveness of the developed methods and devices is established. Specific values of the investigated properties of powders based on iron and copper were obtained.

COMPACTION OF POWDERS. DYNAMIC COMPRESSIBILITY. LATERAL PRESSURE. COEFFICIENT OF FRICTION. ELECTRIC HYDRAULIC IMPULSE PRESSING.

Orischenko A. S., Kondratyev S. Yu., Anastasiadi G. P., Fuks M. D., Petrov S. N. FEATURES OF STRUCTURAL CHANGES IN HEAT-RESISTANT ALLOY 45Х26Н33С2Б2 AT OPERATING TEMPERATURES. RECORD 2. EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE EXPOSURE.

Investigated was the structural stability of the cast heat-resistant alloy 45Х26Н33С2Б2 at the temperature of 1150°C. Significant qualitative and quantitative changes in all structural components and the individual phases of the alloy in the range of exposure time to 100 hours were found. It was detected that the highest intensity of diffusion processes in the alloy is observed in the initial period of exposure up to ~ 2 h.

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. MICROSTRUCTURE. PHASE COMPOSITION. LIQUATION. HEAT TREATMENT. STRUCTURAL STABILITY.

Krivosheev S. I., Slastenko V. K. FEATURES OF PROCESS OF FRACTURE UNDER DYNAMIC LOADING.

The generalization of experimental results on destruction of samples in various schemes of loading is carried out on the basis of structural - temporal criterion of destruction. Experiments are executed with application of the magnetic-pulse method which allows to define the parameters of influencing a material of pressure pulse authentically.

The received data demonstrate not only threshold character of destruction but also essential increase of the basic characteristics of process of destruction such as the rupture stress and the surface energy of destruction under microsecond range loading. Interconnection of these parameters has allowed to determine the critical size (scale) of destruction.

THE PULSE STRENGTH. PULSE LOADING. THE SURFACE ENERGY OF FRACTURE. THE SIZE (SCALE) FRACTURE.

Mertens K. K., Kuznetcov P. A. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COMBINED PRESS POWDERS ELEKTROGIDROIMPULSNOGO.

The results of experimental researches of combined processes electrohydraulicpulse compression and pre-extrusion billets in rigid compression moulds by vibration formation and hydrostatic pressing are presented. The efficience of the use of combined processes for high-density products of ceramic and metal powders is established. The average density of the products and the durability increased by 20–25 %. New perspective schemes of the combined pressing are developed.

COMPRESSING POWDERS. COMBINED PROCESSING ELECTROHYDRUAL ICPULSE PRESSING.

Maslikov V. I., Chusov A. N., Cheremsin A. V., Ryzhakova M. G. ASSESSMENT OF GEO-ECOLOGICAL RISK OF ATMOSPHERE POLLUTION BY MSW LANDFILLS EMISSIONS FOR CHOICE OF MEASURES FOR AFTERCARE PHASE.

There is considered in the article a problem of geo-ecological risk assessment of atmospheric air pollution by gas emissions from municipal solid waste (MSW) landfills. It has been shown that in the case of absence of full-scale data about MSW landfills conditions it is expedient to use methods of mathematical modeling of gas emissions formation and their distribution in atmospheric air when natural decomposing waste, and also in case of fires. The carried out assessment of risks of atmospheric air pollution by harmful substances from operating landfill confirms a danger for the population living near to a sanitary zone of landfill even from diffusive emissions of biogas. This danger sharply increases in a case of ignition of waste. It confirms necessity of construction of biogas collection and utilization system when scheduling aftercare works at landfill for the purpose of minimization of geo-ecological risk of pollution of atmospheric air and occurrence of fires.

MATHEMATICAL MODELING. MSW LANDFILLS EMISSIONS. ATMOSPHERE AIR POLLUTION. GEO-ECOLOGICAL RISK. MEASURES FOR AFTERCARE PHASE.

Balagula Yu. M., Boronin V. N., Korovkin N. V. REGISTRATION OF AQUATIC ORGANISMS MOTIONAL ACTIVITY FOR THE PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC ECOLOGY.

An automated method for continuous registration of motional activity of fish, based on the fractal analysis of time series derived from a videosignal, is suggested. The installation to investigate electromagnetic impact on fish is described. The fractal dimensions related to the Goldfish motional activity are presented.

ELECTROMAGNETIC ECOLOGY. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. FISH MOTIONAL ACTIVITY. VIDEO-BASED REGISTRATION OF MOTIONAL ACTIVITY. FRACTAL ANALYSIS.

Filimonov A. A. GLOBAL BOTANIC GARDENS NETWORK: CORRELATION ANALYSIS.

In this paper, we report the results of the study of the relationship between socio-economic indicators and the number of botanic gardens (BGs) in different countries.

Finally the possible relationship between economic development and worldwide foundation of BGs is discussed.

BOTANIC GARDENS. GDP. HDI. PLANT CONSERVATION. ECONOMIC DEVELOPMENT.

Umanets V. N. GEOECOLOGICAL RESEARCH IN THE FIELD OF CONSTRUCTION AND HOUSING. HISTORY, CURRENT STATUS AND PROSPECTS.

The analysis of geoecological problems in the construction and the Treatment Research Institute of Waste Management. Shows the history of formation and development of geoecological researchdetailed questions of geo-ecological research in the field of Construction and Housing. The range of major scientific and practical problems of building Geoecology.

GEOECOLOGY. GEOSPHERE OF THE EARTH. THE LITHOSPHERE. ECOLOGICAL FUNCTIONS. BUILDING COMPLEX. GEOECOLOGICAL PROBLEMS. GEOECOLOGICALRESEARCH.

Maslikov V. I., Chusov A. N., Molodtsov D. V., Ryzhakova M. G. THE AREA-BASED DETERMINATION OF BIOGAS EMISSION FROM MSW LANDFILL FOR THE GEOECOLOGICAL CONDITIONS ASSESSMENT AND SUBSTANTIATION OF MANAGEMENT OF WASTE DECOMPOSITION IN THE PROCESS OF RECULTIVATION.

It is proposed to assess the landfill's condition and the choice of a recultivation technology perform based on the area-based determination of biogas emission from MSW landfill. The case of a big landfill of St. Petersburg, a calculation of biogas emissions from various waste disposal areas has been made. The substantiation for the area-based management of waste decomposition has been made. The area-based management of waste decomposition allows fuller use of potential energy from MSW landfill and accelerates the mineralization of the waste.

MSW LANDFILL. BIOGAS. MANAGEMENT OF WASTE DECOMPOSITION. RECULTIVATION. USE OF POTENTIAL ENERGY FROM MSW LANDFILL.

Tarkhov D. A., Vasilyev A. N., Idrisova D. I. NEURAL NETWORK MODELING OF AIR POLLUTION MONITORING SYSTEM AND OF SECURING SAFE WORKING CONDITIONS IN CONSTRUCTIONAL INDUSTRY.

In this article problems of neural network modeling of air pollution monitoring system and monitoring of workspace air in construction industry are considered

NEURAL NETWORK MODELING. AIR POLLUTION MONITORING SYSTEM. WORKING CONDITIONS. WORKSPASE AIR. CONSTRUCTIONSL INDASTRY.

Tarkhov D. A., Vasilyev A. N., Tarabanov V. N., Idrisova D. I.. APPLICATION OF NEURAL NETWORK MODELING FOR SECURING SAFE WORKING CONDITIONS AT WORK BY CONSTRUCTIONAL EQUIPMENT IN PERMAFROST ZONE.

In this article problems of neural network modeling of working conditions securing system at work by constructional equipment in permafrost zone are considered

NEURAL NETWORK MODELING. MONITORING. SAFYTY. WORKING CONDITIONS. CONSTRUCTIONSL INDASTRY.

Nikitkov N. V. MATHEMATICAL MODEL OF DETERIORATION OF THE CONTACT SURFACE OF GRAINS OF DIAMOND CIRCLES AT GRINDING FIRM FRAGILE MATERIALS.

In clause questions of analytical definition of size of deterioration of tops of cutting diamond grains in circles are considered. Dependences for calculation of values of deterioration of grains in circles are offered at various modes of grinding of firm fragile materials.

MODEL. DETERIORATION OF GRAINS. DIAMOND CIRCLES. CALCULATION OF VALUES OF DETERIORATION.

Adalev A., Kuchinsky V., Popkov E., Filchkov A., Chaika V. SIMULATION MODEL OF A SIX-PHASE CONVERTER DRIVEN ELECTRIC MACHINE EXCITED WITH PERMANENT MAGNETS.

A simulation model of a six-phase converter-driven electric machine excited with permanent magnets is presented. The model is based on the phase coordinate characteristics introduced relative to external terminals of the stator windings. The model allows simulation of electromagnetic processes taking into account actual states of the machine magnetic system.

SIX-PHASE ELECTRIC MACHINE. CONVERTER DRIVEN MACHINE EXCITED WITH PERMANENT MAGNETS. SIMULATION MODEL IN PHASE COORDINATES. DIGITAL SIMULATION. MACHINE-CONVERTOR SYSTEM. MAGNETIC FIELD IDEALIZATION. EQUIVALENT CIRCUIT OF STATOR WINDINGS.

Kachanova T. L., Fomin B. F. PHYSICS OF OPEN SYSTEMS: GENERATION OF SYSTEM KNOWLEDGE.

Information technologies of Physics of Open Systems automatically generate reliable, theoretical, system knowledge using the data and knowledge which are collected by the empirical science. The knowledge generation is being performed automatically, without experts.

SYSTEM KNOWLEDGE. ONTOLOGICAL MODELING. COMMUNICATIVE MODELING. STATES MODELING. SOLUTIONS RESOURCES. SYSTEM ONTOLOGY. SUBJECT ONTOLOGY.

Ageev V. O., Araslanov A. V., Kachanova T. L., Turalchuk K. A., Fomin B. F., Fomin O. B. GENERATION OF SYSTEM KNOWLEDGE ON THE PROBLEMS OF SOCIAL TENSION IN RUSSIA'S REGIONS.

In the paper, the knowledge on the social tension in Russia's regions is obtained at the level of system ontology by the methods of the Physics of Systems, on the basis of regional statistics. This knowledge is represented as informational, intellectual, cognitive and technological resources for the solutions of social problems. The resources are automatically generated from the empirical description of the system by the technologies of the Physics of Systems.

PHYSICS OF SYSTEMS. SYSTEM KNOWLEDGE. RESOURCES OF SOLUTIONS. SYSTEM RECONSTRUCTIONS. SYSTEM EXAMINATION. SYSTEM DESIGN.

Kruglikov V. N., Olennikova M. V. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MOTIVATION AND MOTIVATION PROBLEMS.

In work theoretical problems of motivation of the personnel are considered, justification of need of the accounting of dynamic characteristics of motivation by motivation development of systems is given, conceptual bases of creation of such systems are offered

MOTIVATION. THE MOTIVATION OF MAN. THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MOTIVATION. RECRUITMENT. EMPLOYEE INCENTIVE SYSTEM. THE FIELD OF MOTIVATION. MOTIVATIONAL ORIENTATION.

Glukhov V. V., Tisenko V. N., Shadrin A. D. APPLICATION OF STANDARDS OF MANAGEMENT FOR IMPROVEMENT OF QUALITY OF SPECIALIST'S TRAINING.

Problem questions of application of standards of management in work of educational establishments are considered in the article. It is paid attention to necessity of correct use of the term «quality», and also on use of modern development of the system analysis for «measurement» of quality

QUALITY MANAGEMENT. STANDARDS. QUALITY. COMPLEX PARAMETER.

Goryunov V. P. HUMANITIES CORE OF MODERN EDUCATION.

The connection between new social reality in Russia and changes in the education system, including its humanization, are considered. The contents and the role of humanization in engineering education are shown. The thesis about the social nature of technology which is relatively independent of technical content of science is proposed. The scientific research of the laws of the material and technological development is largely related to the humanities and social sciences. Conclusions about the humanization as a means of transition to system education, the subject of which is a society, are made.

SCIENCE. TECHNOLOGY. EDUCATION. IDEOLOGY. SOCIAL STATUS. ENGINEER. ENGINEERING. TECHNOLOGICAL PROGRESS.

Noskova T. N., Pavlova T. B. NEW PRIORITIES IN PEDAGOGICAL ACTIVITY IN THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF MODERN HIGHER EDUCATION.

The article is devoted to activity of the teacher in the educational environment of modern higher education institution with wide application of network information technologies and electronic educational resources. The new information and communication priorities causing changes in nature of pedagogical activity are shown. The role of the teacher in the course of formation of the information educational environment of higher education institution is underlined. High quality of educational services can be reached, if the teacher transforms the activity according to the changes occurring in the Russian and global educational information space.

INFORMATIZATION OF EDUCATION. INFORMATION AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT. THE NETWORK LEARNING ENVIRONMENT. EDUCATIONAL COMMUNICATION. NETWORK COMMUNICATION. COMMUNICATION.

Fedin D. V. THE EDUCATIONAL AND METHODICAL WORK AS MODERN TOOLS OF MANAGEMENT OF EDUCATIONAL PROCESS.

This article consider issues of practical applications, forecasting programs, tutor's educational and methodical work models and a set of practical recommendations since the beginning of training students in a high school. The importance and relevance of comprehensive studying and improvement of methodical and academic work were determined thought the developing and testing tutor's educational and methodical experimental model to increase the efficiency of educational process.

EDUCATION. MODEL. METHODIC. FORECASTING. ACADEMIC ACIEVEMENT. ATTESTATION.

Kruglikov V. N. INTERACTIVE LEARNING IN HIGHER EDUCATION.

In article definition is made, the role, value, forms and principles of realization of technologies of interactive training in practice of higher education institutions are considered. The urgency of article is connected with introduction in educational standards of the obligatory requirement about use of forms of interactive training at auditorny work.

INTERACTIVE TRAINING. ACTIVE LEARNING. COOPERATIVE LEARNING. FORMS. METHODS. PRINCIPLES OF TEACHING. TRAINING MODELS. COLLECTIVE MUTUAL LEARNING. E-LEARNING. EFFECTIVE METHOD.

Ivanova M. A. A SOCIOLOGICAL PORTRAIT OF ARAB STUDENTS FROM THE MIDDLE EAST.

A sociological portrait of Arab students from the Middle East include the factors affecting the readiness of students to study at Russian universities and their rates of adaptation to new social conditions.

SOCIOLOGY. SOCIOLOGICAL PORTRAIT. STUDENT. ARAB STUDENTS. MIDDLE EAST. COUNTRY. SOCIAL CONDITIONS.

Kharzeeva S. E. UNDERSTANDING AS COGNITIVE PROCESS AND AS KNOWLEDGE DESCRIPTION IN COMPETENCE EDUCATIONAL MODEL.

The understanding as interaction process between incoming information and subject's mental semantic conceptual structures is presented. The author's cognitive models of categorical and intercategorial structures of individual knowledge are the systems of semantic elements with their frames and semantic connections among the elements.

UNDERSTANDING. INDIVIDUAL KNOWLEDGE MODELING. COGNITIVE SEMANTIC STRUCTURES.

Sushchenko V. P., Sarakul A. G., Lesnichiy V. V. THEORY OF THE WHOLEPERSON AND PSYCHOSOMATIC MEDICINE.

The paper attempts to generalize existing concepts and theories of psychosomatic medicine in terms of the theory of whole person in order to develop the resource approach to modern man and the correction of psychosomatic health. The proposed material is a first attempt to find evidence of the three leading hypotheses about mental functions (self-organizing, self-regulation and self-development), bringing the inside «life of integrity» to overcome the natural man with internal «I» and psychosomatic health.

PSYCHOSOMATICS. SELF-REGULATION. MENTAL INTEGRITY PERSON. PHENOMENOLOGY OF KNOWLEDGE. SYMBOLIC LANGUAGE OF PSYCHOANALYSIS. THE UNCONSCIOUS.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 2-1 (147) 2012

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция

академик РАН *Ю.С. Васильев* – председатель редакционной коллегии
д-р ист. наук профессор *Р.В. Дегтярева* – заместитель председателя
д-р техн. наук профессор *В.Н. Боронин* – заместитель председателя
канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова* – научный редактор, корректор
Н.П. Измайлова – помощник выпускающего редактора
О.А. Матенёв – технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Подписано в печать 31.05.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 49,0. Тираж 1000. Заказ 157.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ» Серия «Наука и образование»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Госкомпечати РФ (свидетельство № 013165 от 23.12.94) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; СТРОИТЕЛЬСТВО; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Журнал выпускается в пяти сериях:

1. Физико-математические науки.
2. Экономические науки.
3. Наука и образование.
4. Информатика. Телекоммуникации. Управление.
5. Гуманитарные и общественные науки.

Периодичность выхода серии журнала «Наука и образование» – 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рекомендация на имя заместителя главного редактора журнала, подписанная научным руководителем автора и/или руководителем структурного подразделения. Рекомендация должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы.

Все материалы должны быть представлены по электронной почте: e-mail: **ntv-nauka@spbstu.ru**

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:

(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович) или по e-mail: **ntv-nauka@spbstu.ru**