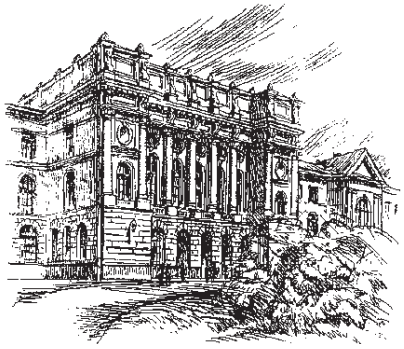
3-2(154)/2012



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

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

Журнал зарегистрирован в 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

Саркисов А. А. *Феномен восприятия общественным сознанием опасности, связанной с ядерной энергетикой* 9

Окрепилов В.В. *Семья Нобель и Д.И.Менделеев* 21

Арсеньев Д.Г. *Участие ученых и преподавателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в деятельности профессиональных международных обществ и ассоциаций* 29

Энергетика. Электротехника

Басс М.С., Батухтин С.Г., Кубряков К.А. *Годовые характеристики систем теплоснабжения* 39

Батухтин А.Г., Пинигин В.В., Кобылкин М.В. *Анализ методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения* 45

Безрукова Я.В., Донской В.И., Щербаченко Л.А., Барышников Д.С., Ежова Л.И., Васильев С.А. *Особенности процессов релаксации электретных зарядов в гидратированных силикатах* 51

Киселёв В.Г. *Влияние ёмкости двойного электрического слоя на скорость коррозии на границе раздела фаз* 56

Моренов В.А. *Применение попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя* 61

Ельшин А.В., Абдуллаев А.М. *Соотношение взаимности для плотности потока и ценности нейтронов на границе квадратной ячейки при использовании восьми пробных функций* 66

Рыбалко В.В. *Диагностирование объектов промышленной энергетики* 70

Севастьянова А.В. *Разработка алгоритма для анализа схемно-режимных особенностей энергосистем* 77

Соловьев Ю.В., Тонконогов Е.Н. *О влиянии эксплуатационных характеристик защищенных проводов ВЛ 6-35 кВ на отключающую способность коммутационного оборудования* 80

Шакиров М.А. *Теория трансформаторов. Часть 1. Идеализированный трансформатор с тонкими обмотками* 85

Степанов Е.Ю., Долиновская Р.В., Шабалин С.А. *Экспериментальное исследование процессов горения электрической дуги в плазмотронах переменного тока с изменением рода и расхода плазмообразующей среды* 110

Барилович В.А. *Расчет теплообменников теплового насоса* 114

Машиностроение

Бортяков Д.Е., Соколов В.П. *Учет трения в шарнирах многозвенных механизмов* 121

Кукаленко Б.Д., Чулкин С.Г. *Исследование и расчет основных статических нагрузок баллонов шинно-пневматических муфт* 125

Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю., Герасимов И.М. *К вопросу построения математической модели теплового цикла двигателей внутреннего сгорания* 132

Барышников С.О. *Сложный изгиб обшивки судна* 137

Металлургия и материаловедение

Рудской А.И., Анастасиади Г.П. , Орыщенко А.С. , Кондратьев С.Ю. , Фукс М.Д. *Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений* 143

Митрофанов Ю.А., Попов И.О. *Исследования комплексного флюса на основе феррит-натриевого силиката в процессах огневого рафинирования меди* 150

Никитков Н.В., Ковеленов Н.Ю., Шабалин Д.Н. *Расчет режимов резания при алмазном шлифовании заготовок из твердых хрупких материалов* 155

Ганзуленко О.Ю. , Кириллов Н.Б. , Петкова А.П. , Яковицкая М.В. *Повышение водородостойкости аустенитных коррозионно-стойких хромоникелевых сталей для высокотемпературных технологических систем энергетических установок* 159

Титова Т.И., Цеменко В.Н., Ратушев Д.В., Шкляев С.Э., Чижик Т.А. *Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства высокохромистой стали мартенситного класса* 166

Кузнецова О.С., Сычёв С.В., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. *Применение акустической эмиссии для исследования изнашивания хрупких материалов* 174

Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования

Кортиков Н.Н., Кривоносова В.В. *Зависимости для расчета гидравлического сопротивления и интенсификации теплообмена в каналах со столбиками-турбулизаторами и вихревой матрицей* 178

Сычёв С.В., Кузнецова О.С., Фадин Ю.А., Чулкин С.Г. *Исследование процесса приработки поверхности износостойких керамик* 185

Елистратов В.В., Конищев М.А., Давыдов К.И. *Лабораторные энергетические исследования низконапорного блока микро-ГЭС* 189

Бухарцев В.Н., Петриченко М.Р. *Трансляционная инвариантность формулы Дюпюи и определение высоты промежутка высачивания* 194

Колгатин С.Н. *Критическая точка, бинодаль, спинодаль и отрицательные давления на примере уравнения Ван-дер-Ваальса* 199

Дюльдин М.В., Панфилов А.А., Столяров Н.В. *Методы измерения ветрового потока при проектировании ветроэлектрических станций* 205

Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. *Анализ структур и функциональных возможностей манипуляционных систем космического назначения* 211

Иванов А.В., Ваганов В.В., Котов К.А. *Выбор состава технологического оборудования полиграфического предприятия на основе программно-алгоритмического обеспечения* 219

Голуб Ю.А., Матенёв О.А. *Проектирование структуры базы данных для мониторинга и оценки процессов наукоемкого кластерного развития: анализ подходов и методов* 222

Васильев Б.Ю. *Повышение эффективности алгоритмов управления электроприводами методами нечеткой логики* 229

Васильева Л.К., Воловей А.Г., Иголкин Б.И., Мехтиев В.С. *Устройство для изучения электрофизических свойств растительных масел* 233

Техносферная безопасность

Соколов В.П. *О достоверности расчетов надёжности сложных технических систем (на примере Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга)* 237

Туманов А.Ю. *Автоматизированная система количественной оценки риска и безопасности объектов энергетики для прогнозирования и предотвращения развития аварий* 240

Гуменюк В.И., Доброборский Б.С., Федосовский М.Е. *О проблеме количественного учета человеческого фактора при чрезвычайных ситуациях на объектах энергетики* 249

Авакян С.В., Воронин Н. А., Дубаренко К.А. *Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи* 253

Природопользование

Улыбин В.Б., Ефремов С.В., Романцова О.В. *Сравнительный анализ различных методов получения пероксида водорода* 267

Гуменюк В.И., Тихонов М.Н., Федосовский М.Е. *Постфукусимский синдром: проблемы и решения* 273

Строительство

Жгутов В.М. *Метод конструктивной анизотропии для подкрепленных оболочек с учетом переменной жёсткости ребер и различных свойств материалов* 286

Вопросы образования

Шамахов В.А. *Модель управления развитием Северо-Западного института Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации* 295

Лифшиц Е.А. *Анализ уровня мотивации обучающихся в вузах* 299

Гуменюк В.И., Доброборский Б.С., Федосовский М.Е. *Определение эффективности обучения персонала энергетических объектов путем количественного учета человеческого фактора* 308

Афанасьева И.Б., Димент Л.И, Меркулова О.В. *Формирование пространственных представлений студентов в обучении начертательной геометрии* 312

Дьяченко В.А. *Условия подготовки конструкторов-машиностроителей широкого профиля* 317

Хроника событий

Кесаманлы Ф.П. *Ученые – политехники, прославившие нашу страну. Академик Сергей Николаевич Вернов* 322

Шульдешев Л.С. *Традиции чествования героев Великой Отечественной войны — вечны* 328

Сведения об авторах. Контактные данные 330

Аннотации. Ключевые слова 337

Contents

Sarkisov A.A. *The phenomenon of perception of public opinion risks associated with nuclear power* 9

Okrepilov V.V. *Family Nobel and D.I. Mendeleev* 21

Arseniev D.G. *The participation of scientists and teachers of St. Petersburg State Polytechnic University of the international professional societies and associations* 29

Power engineering and electrical engineering

Bass M.S., Batuhtin S.G., Kubryakov K.A. *Annual characteristics for heat supply systems* 39

Batuhtin A.G., Pinigin V.V., Kobilkin M.V. *Analysis methods to increase the efficiency of district heating systems* 45

Bezrukova Ya.V., Donskoy V.I., Scherbachenko L.A., Baryshnikov D.S., Yezhova L.I., Vasiliev S.A. *Features of the relaxation of electret charges in hydrated silicates* 51

Kiselev V.G. *The influence of the electric double layer capacitance at the rate of corrosion at the phase boundary* 56

Morenov V.A. *Application of associated petroleum gas as an energy carrier* 61

Elshin A.V., Abdullaev A.M. *Reciprocity relation between neutron distribution and neutron importance at square cell boundary with usage of eight trial functions* 66

Ribalko V.V. *Diagnosing objects of industrial of energy* 70

Sevastyanova A.V. *Development of algorithm for analysis of schematic perculiarities and operational conditions of power systems* 77

Solovyev Yu.V., Tonkonogov E.N. *On the influence operational characteristics protected wires for overhead lines 6–35 kV breaking capacity of switching equipment* 80

Shakirov M.A. *Theory of transformers. Part 1. Idealized transformer windings with thin* 85

Dolinovskaya R.V., Stepanov E.U., Shabalin S.A. *Experimental investigation of processes of electric arch ac plasma generators operation with different flow rates of plasma forming gases* 110

Barilovich V.A. *Calculation of heat exchangers of the heat pump* 114

Mechanical engineering

Bortyakov D.E., Sokolov V.P. *Allowance for friction in hinges of multijoined gears* 121

Kukalenko B.D., Chulkin S.G. *The study and calculation of the main steady-state loads balloon bus-pneumatic muffs* 125

Rusinov R.V., Dobretsov R.U., Gerasimov I.M. *On construction of mathematical models heat cycle internal combustion engines* 132

Baryshnikov S.O. *Complex bending of ships shell* 137

Metallurgy and materials technology

Rudskoy A.I., Anastasiadi G.P., Orischenko A.S., Kondratyev S.Yu., Fuks M.D. *Features of structural changes in heat-resistant alloy 45Х26Н33С2Б2 at operating temperatures. Record 3: Mechanism and kinetics of phase transformations* 143

Mitrofanov Yu.A., Popov I.O. *A complex Studies of flux-based ferrite-sodium silicate in the process of fire refining of copper* 150

Nikitkov N.V., Kovelenov N.Yu., Shabalin D.N. *Calculation mode cuttings under diamond cutting stocking up from hard frail material* 155

Ganzulenko O.Yu., Kirillov N.B., Petkova A.P., Yakovitsky M.V. *Increase vodorodostoykosti austenitic corrosion-resistant chromium-nickel steel high technological systems for power plants* 159

Titova T.I., Tsemenko V.N., Ratushev D.V., Shkliaev S.E., Chizhik T.A. *Influence of modes heat treatment on the structure and properties of high-chromium steel martensite class* 166

Kuznetsova O.S., Sychev S.V., Fadin Yu.A., Chulkin S.G. *The applying of acoustic emission in study of brittle material's wear* 174

Mathematical Methods. Modeling. Experimental studies

Kortikov N.N., Krivonosova V.V. *Correlations for prediction of flow resistance and heat transfer enhancement in channals with pin fins and lattice matrix* 178

Sychev S.V., Kuznetsova O.S, Fadin Yu.A., Chulkin S.G. *Investigation of the surface running-in process* for wear resistant ceramics 185

Elistratov V.V., Konishchev M.A., Davydov K.I. *Practical methods of wind measurements for wind power plant development* 189

Bukhartsev V.N., Petrichenko M.R. *Translational invariance formula Dupuis and height determination period of seeps* 194

Kolgatin S.N. *Critical Point, Binodal, Spinodal and Negative Pressures on the Example of Van-der-Waals Equation* 199

Dyuldin M.V., Panfilov A.A., Stolyarov N.V. *Practical methods of wind measurements for wind power plant development* 205

Dyachenko V.A., Timofeev A.N. *Analysis of the structures and functionalities manipulation systems of space appointment* 211

Ivanov A.V., Vaganov V.V., Kotov K.A. *The choice of process equipment polygraphic enterprise based on program and algorithmic providing* 219

Golub Yu. A., Matenev O.A. *The design of database structure for monitoring and evaluation process of science cluster development: analysis of approaches and methods* 222

Vasiliev B.Yu. *Improving the efficiency of motor control algorithms, fuzzy logic methods* 229

Vasilieva L.K., Volovey A.G., Igolkin B.I., Mekhtiev V.S. *Device for the study of electrophysical properties of vegetables oils* 233

Technosphere safety

Sokolov V.P. *About reliability of estimates of reliability of complex technical systems (on example, the complex of protective structures of St. Petersburg)* 237

Tumanov A.Yu. *Automated system for the quantitative risk assessment and security of energy facilities for the prediction and prevent accidents* 240

Gumenyuk V.I., Dobroborsky B.S., Fedosovsky M.E. *On the problem of quantifying the human factor in emergency situations used by power utilities* 249

Avakian S.V., Voronin N.A., Dubarenko K.A. *The contribution of magnetic storms in the accident rate on systems of power engineering, automatics and communications* 253

Nature Management

Ylibin V.B., Efremov S.V., Romantsova O.V. *Comparative analysis of various methods of receiving hydrogen peroxide* 267

Gumenyuk V.I., Tikhonov M.N., Fedosovsky M.E. *Postfukusima syndrome: problems and solutions*..... 273

Construction

Zhgutov V.M. *The method of constructional anisotropy for the supported shells taking into account various ribb rigidity and different material properties* 286

Educational issues

Shamakhov V.A. *Control model development of the North-West Institute of the Russian Academy of national economy and public administration under the President of the Russian Federation* 295

Lifshits E.A. *Analysis of the level of motivation of students in higher education* 299

Gumenyuk V.I., Dobroborsky B.S., Fedosovsky M.E. *Determine the effectiveness of training personnel energy facilities by quantifying records human factors*..... 308

Afanas'eva I.B., Diment L.I., Merkulova O.V. *The development of spatial representations of students in teaching of descriptive geometry* 312

Dyachenko V.A. *Conditions for the preparation constructors engineering a wide profile*..... 317

Chronicle of events

Kesamanly F.P. *Scientists-politechniki, glorified our country. Academician Sergei Nikolaevich Vernov* 322

Shuldeshov L.S. *Tradition of of honoring the heroes of the Great Patriotic War — are eternal*..... 328

About the authors. Contact information..... 330

Abstracts. Keywords 345

УДК 621.039

А.А. Саркисов

ФЕНОМЕН ВОСПРИЯТИЯ ОБЩЕСТВЕННЫМ СОЗНАНИЕМ ОПАСНОСТИ, СВЯЗАННОЙ С ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

В ряду ценностных предпочтений человеческого сообщества особое место занимает безопасность. По мере развития цивилизации четко прослеживаются две разнонаправленные тенденции. С одной стороны, влияние различных факторов, угрожающих существованию человеческих сообществ, приводило к качественным изменениям в образе жизни и характере организации общественного производства. В результате возрастала защищенность человека от природных воздействий, эпидемий, голода и других негативных факторов. С другой стороны, одновременно создавались технические системы, совокупное действие которых уже сегодня способствует не снижению угроз для жизни людей, а их увеличению. Опасность техносферных явлений в категориях ущерба стала не только соизмеримой, но нередко и превосходящей негативные для человека природные воздействия, о чем свидетельствуют события последних десятилетий.

Крупнейшей в мире аварией за всю историю существования гидроэлектростанций был прорыв плотины китайского водохранилища Банкло в 1975 году во время тайфуна. Под напором воды были разрушены основная плотина и боковые дамбы, что привело к затоплению территорий ниже по течению и гибели более 170 тысяч человек.

В результате аварии 1984 года на химкомбинате в индийском городе Бхопале сразу погибли 3 тысячи человек на месте аварии и еще 15 тысяч умерли в результате отравления. Кроме того, около 200 тысяч человек получили несмертельные отравления различной степени тяжести.

При аварии в Башкирии, под Уфой, в 1989 году в момент прохождения двух пассажирских поездов произошел мощный взрыв легких углеводородов, вытекших через трещину из проложенного рядом трубопровода «Сибирь — Урал — Поволжье». Погибло 645 человек, ранено более 600.

В августе 2009 года произошла техногенная катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС, в результате которой погибло 75 человек, нанесен существенный ущерб оборудованию и помещениям станции. Работа станции по производству электроэнергии приостановлена. Последствия аварии отразились на экологической обстановке акватории, прилегающей к ГЭС, социальной и экономической сферах региона.

В апреле 2010 года в Мексиканском заливе взорвалась принадлежащая компании «BP» буровая платформа «Deepwater Horizon». В результате началась крупнейшая за всю мировую историю утечка нефти в океан с негативными последствиями для экосистемы региона на многие десятилетия вперед. Вследствие утечки 700 тыс. т нефти в открытый океан более 57000 квадратных миль площади залива закрыты для рыболовства. Компания «BP» уже потратила на борьбу с ущербом от разлива нефти 13,5 млрд долл., что составляет лишь небольшую часть от общей величины нанесенного региону ущерба.

Огромное количество человеческих жизней уносит обычный автотранспорт. По данным ВОЗ в автомобильных авариях ежегодно гибнет более 1 млн 200 тыс. человек и еще 50 млн получают травмы. Это значит, что ежедневно на дорогах погибает свыше 3 тысяч человек, большая часть которых — молодые люди в возрасте от 15 до 44 лет.

Если говорить о ядерной энергетике, то в течение относительно короткой истории своего существования она подверглась трем экстре-

мальным испытаниям: аварии на втором энергоблоке АЭС «Three Mile Island» (США, 1979 г.), аварии на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.) и, наконец, аварии на АЭС «Фукусима — Даичи» (Япония, 2011 г.).

Чернобыльская авария была крупнейшей за всю историю ядерной энергетики. В СССР к началу 1998-го года прямой ущерб, включая затраты на ликвидацию последствий, составил по разным данным от 10 до 12,6 млрд долл. В последующие годы на программы преодоления последствий аварии была потрачена значительная часть национальных бюджетов, особенно в Республике Беларусь и Украине. Из-за различия применяемых методик существует большой разброс в оценках косвенных потерь, связанных с сокращением производства электроэнергии, выводом из оборота сельскохозяйственных земель, свертыванием строительства новых АЭС и другими мероприятиями. Если размеры прямых потерь от чернобыльской аварии в трех наиболее пострадавших государствах — Белоруссии, России и Украине — исчисляются десятками миллиардов долларов, то косвенные потери составляют на порядок больше. Такая оценка качественно совпадает с результатами исследования потерь от гипотетической аварии на современной французской АЭС с выбросом в окружающую среду около 1 % ядерного топлива [1]. Полная сумма прямых и косвенных потерь от подобной аварии может составить до 400 млрд евро.

Культура и философия безопасности

До освоения и широкого использования ядерной энергетики обеспечение безопасности объектов техносферы ограничивалось применением различных технических средств. Специфика атомной энергетики потребовала более широкого подхода, который получил название «культуры безопасности». Это понятие появилось в процессе анализа причин чернобыльской аварии, а в научно-техническую терминологию оно вошло после публикации «Итогового доклада послеаварийной обзорной конференции по чернобыльскому реактору», подготовленного Международной консультационной группой по ядерной безопасности (INSAG).

Культура безопасности — новое для инженерной практики понятие, смысл которого заключается в отношении человека к проблемам безопасности при выполнении служебных обязанностей. Согласно принятым INSAG определениям, это набор характеристик и особенностей деятельности организаций и отдельных лиц, в котором безопасность работы АЭС обладает высшим приоритетом. Эта непреложная истина должна быть принята к руководству на всех без исключения уровнях управления в государстве. Культура безопасности имеет особенности, выделяющие ее из ряда других принципов безопасности:

культурой безопасности должна быть пронизана деятельность всех организаций, предприятий и отдельных лиц, участвующих на всех этапах жизненного цикла АЭС — от разработки технико-экономического обоснования сооружения АЭС до вывода ее из эксплуатации;

культура безопасности адресована непосредственно человеку, что отличает ее от других принципов безопасности, которые направлены на решение научных, инженерно-технических и медико-биологических проблем обеспечения безопасности АЭС.

Формирование культуры безопасности — это воспитание у каждого человека, имеющего отношение к атомной энергетике, такого состояния, при котором он окажется просто неспособным сделать какой-то шаг в ущерб безопасности, даже если вероятность опасности в этом случае чрезвычайно мала.

В документе «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (ОПБ-88/97) дано определение: «Культура безопасности — квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности АЭС является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к самоосознанию ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ, влияющих на безопасность».

Обеспечение безопасности при эксплуатации АЭС — главная и общая задача всего персонала атомной станции и персонала предприятий, выполняющих работы и оказывающих услуги в области атомной энергетики. Поэтому в эксплуатирующей организации большое внимание уделяется формированию культуры безопасности как составляющей 1-го уровня глубокоэшелонированной защиты, на-

правленного на обеспечение нормальной эксплуатации АЭС.

Для формирования культуры безопасности используется следующее:

проведение необходимого подбора, обучения и подготовки персонала в каждой сфере деятельности, влияющей на безопасность;

установление и строгое соблюдение дисциплины при четком распределении персональной ответственности руководителей и исполнителей;

разработка и строгое соблюдение требований действующих инструкций по выполнению работ и их периодическому обновлению с учетом накапливаемого опыта.

Культура безопасности обеспечивается:

структурой управления и контроля за деятельностью по безопасной эксплуатации атомных станций;

высоким уровнем квалификации персонала при выполнении им обязанностей, предусмотренных в установленном порядке.

Выражение «культура безопасности» относится к очень общему понятию приверженности и личной ответственности всех лиц, занимающихся любой деятельностью, которая влияет на безопасность АЭС. Очень важно проявление необходимого внимания к вопросам безопасности и соответственно к культуре безопасности в деятельности руководства эксплуатирующих организаций и атомных станций.

Эти вопросы особенно важны для эксплуатирующих организаций и персонала, непосредственно занимающегося эксплуатацией АЭС.

В коллективах АЭС и поддерживающих организаций необходимо формировать атмосферу открытости, обеспечивающую свободную передачу персоналом информации, относящейся к безопасности, а особенно следует поощрять признание ошибок в работе, которые были совершены, в том числе и тех ошибок, которые не привели к серьезным последствиям. Таким образом, достигается всеобщая психологическая настроенность на безопасность, которая предполагает самокритичность и самопроверку, исключает благодушие и предусматривает развитие чувства персональной ответственности и общего саморегулирования в вопросах безопасности.

Основу культуры безопасности составляют три уровня приверженности ей:

уровень эксплуатирующей организации;

уровень руководства АЭС;

индивидуальный уровень.

Первые два уровня представляют собой необходимые рабочие условия в организации и относятся к сфере ответственности руководства на этих уровнях.

Деятельность в области культуры безопасности, как и любую деятельность коллектива или отдельного человека, можно и необходимо постоянно оценивать и совершенствовать. Очевидно, что оценку состояния культуры безопасности необходимо выполнять через систематический анализ коренных причин событий на АЭС, таких, как нарушения в работе и отказы систем и оборудования.

Особенно тщательно должны анализироваться случаи произошедших и потенциальных нарушений, связанных с человеческим фактором.

Экспертами признано, что отсутствие культуры безопасности стало одной из причин чернобыльской аварии. Многолетний опыт эксплуатации атомных станций и других радиационно опасных объектов показывает, что возникновение большинства аварий и инцидентов так или иначе связано с поведением людей, их отношением к своим обязанностям и обеспечению безопасности.

На современном этапе развития цивилизации проблемы безопасности техносферы приобрели подлинно глобальный характер. Непрерывное увеличение энергопотребления и единичных мощностей энергогенерирующих объектов, повышение плотности и интенсивности использования транспортных коммуникаций, механизация всех сфер хозяйственной деятельности и быта человека — все это с неизбежностью приводит к росту энергонасыщенности техносферы. Объективная потребность в более широком толковании безопасности привела к появлению, наряду с понятием «технологической безопасности», таких новых понятий, как «энергетическая безопасность», «экологическая безопасность», «продовольственная безопасность», «информационная безопасность» и т. п.

В современных условиях подходы к обеспечению безопасности, определяемые концепцией культуры безопасности, утрачивают исчерпывающую роль и становятся недостаточными. Обеспечение безопасности техносферы требует

еще более универсального и широкого подхода, который должен базироваться на положениях новой области знаний — философии безопасности.

Философия безопасности определяет безопасность как ценностную категорию в сознании человека, приобретающую все большее значение и актуальность. Возникла насущная необходимость в глубоком и всестороннем осмыслении этой философской категории, что требует привлечения к анализу всего многообразия формирующих ее технологических, социальных, экономических, психологических, духовно-гуманитарных и других факторов. Начальными ориентирами в понимании содержания безопасности может служить перечень, включающий следующие актуальные направления:

место безопасности на шкале человеческих ценностей и эволюция отношения человеческих сообществ к безопасности в историческом аспекте;

факторы, определяющие восприятие опасности техногенного, природного или социального характера, их относительная роль и взаимозависимость в процессе формирования стереотипов сознания и практического реагирования;

соотношение процессов и факторов индивидуального и коллективного восприятия внешних опасностей;

механизм и закономерности формирования в человеческом сознании представления о приемлемом уровне безопасности.

Не углубляясь далее в специальную философскую тематику, кратко остановлюсь лишь на последнем из перечисленных направлений.

Приемлемым принято считать такой уровень безопасности объектов техносферы, при котором связанные с ними угрозы для жизни или здоровья людей, а также возможный вред для окружающей среды не вызывают массового отторжения или протеста населения против использования этих объектов. Понятие приемлемого уровня безопасности отражает консолидированное отношение человеческих сообществ — стран, отдельных регионов в пределах страны, определенных контингентов или групп населения — к повседневному использованию тех или иных технологий и объектов техносферы. Изучение общественного мнения, а также реакция населения на аварии, катастрофы и стихийные бедствия убеждают в том, что приемлемый уровень безопасности — это скорее ощущение, формируемое на подсознательном уровне, чем осознанная рациональная категория. Приемлемый уровень безопасности объектов техносферы формируется в представлениях людей как продукт совокупного коллективного опыта человеческого сообщества, сложным образом трансформированного в подсознательное ощущение.

Например, несмотря на весьма неблагополучную статистику гибели и увечья людей в результате автомобильных и авиационных аварий, уровень безопасности, достигнутый в современном автомобиле- или авиастроении, в организации автомобильной и авиационной транспортных систем, признается обществом приемлемым. Об этом убедительно свидетельствует постоянное увеличение числа продаж автомобилей и рост пассажиропотоков на воздушных линиях.

В это же время научно обоснованная разработчиками АЭС очень малая вероятность (порядка 10^6–10^7 1/реактор-лет) так называемых запроектных аварий реакторов с выбросом радионуклидов в окружающую среду практически не влияет на устойчивое негативное отношение к атомной энергетике значительной части людей из многих стран мира. Другими словами, приемлемость того или иного уровня безопасности в большей степени связана с коллективным восприятием, нежели с индивидуальным осознанием реальных значений техногенных рисков той или иной природы. При этом уровень приемлемого риска формируется на основе компромисса между выгодой (экономия времени или средств, комфорт, получаемое удовольствие и т. д.) и потенциальной опасностью. Чем непосредственнее ощущение получаемой пользы, тем выше порог приемлемого обществом риска. Именно этим можно объяснить отсутствие массовых выступлений против использования автомобильного транспорта или авиации.

Феномены и причины гипертрофированного восприятия опасности атомной энергетики

Феномены и причины гипертрофированного риска определяют стратегию обеспечения безопасности. Для выстраивания эффективной

стратегии обеспечения безопасности техносферы принципиальное значение имеет ранжирование различных рисков по степени связанного с ними интегрального ущерба. Однако решение этой задачи затрудняется тем, что в отношении безопасности в общественном сознании часто наблюдаются труднообъяснимые аномалии и перекосы, а порою и удивительные парадоксы. Одним из широко известных парадоксов такого рода является гипертрофированное восприятие опасности, связанной с атомной энергетикой и, в частности, с последствиями аварий на АЭС.

Особенно наглядно этот феномен проявился во время недавней аварии на АЭС «Фукусима», произошедшей в результате катастрофического землетрясения в Японии и вызванного им цунами. Магнитуда землетрясения составляла 9 баллов, что является максимумом для Японии за весь период наблюдений. Высота волны цунами также была беспрецедентной — около 15 м. В результате исключительных по масштабу стихийных бедствий погибло или пропало без вести более 27 тыс. человек. Восстановление районов, разрушенных землетрясением и последовавшим за ним цунами, по оценке министра экономики Японии, обойдется в 184 млрд долл.

Сравним эти цифры с количеством человеческих жертв и экономическим ущербом от аварии реакторов АЭС «Фукусима». В результате водородного взрыва на станции погибло 2 человека и 11 человек получили различные ранения. Случаев опасного радиационного поражения людей в дни аварии зафиксировано не было. Затраты компании TEPCO, которой принадлежит эта АЭС, на компенсацию убытков пострадавшим в результате аварии людям и местному бизнесу могут составить 23,6 млрд долл. Еще около 10 млрд долл. компания потратит на запуск и эксплуатацию замещающих энергоагрегатов, работающих на органическом топливе. Таким образом, затраты, связанные с аварией АЭС «Фукусима», примерно на порядок меньше тех, которые необходимы для компенсации ущерба от землетрясения и цунами.

Несмотря на несопоставимость человеческих потерь и материального ущерба от землетрясения и цунами, с одной стороны, и от аварии на АЭС, с другой, внимание всех средств массовой информации было полностью приковано к событиям, которые разворачивались на аварийной станции.

В резонансе со средствами массовой информации формировались реакция населения и общественное мнение. Такое гипертрофированное отношение общества к опасности, исходящей от объектов атомной энергетики, не было чем-то неожиданным, оно наблюдается на протяжения всей истории развития этой отрасли. Факты, связанные с землетрясением в Японии и последовавшими за этим событиями на АЭС «Фукусима», позволили еще раз с предельной убедительностью продемонстрировать эту закономерность на поставленном природой масштабном эксперименте.

Мой многолетний опыт взаимодействия с общественностью по сопоставлению рисков атомной энергетики с рисками от других источников энергии показывает, что преодолеть этот перекос в массовом сознании традиционными методами (эпизодическая разъяснительная работа, использование телевидения, радио, печатных изданий и т. д.) невозможно. Стало очевидным, что без выявления истоков и причин такой реакции общества на аварии, связанные с ядерными объектами, нельзя обосновать и предложить эффективные методы и инструменты для коррекции этой аномалии, укоренившейся в массовом сознании. Замечу, что это формируемое на бессознательном уровне ощущение возникает в конкретной материальной среде и опосредованно опирается на вполне реальные факторы. Так, страх перед атомной энергетикой многократно усилился после аварии на Чернобыльской АЭС, а после недавней аварии на «Фукусиме» еще больше завладел умами людей во многих странах мира.

Корни этого феномена связаны с рядом как субъективных, так и объективных факторов. К числу первых следует отнести несколько укоренившихся в массовом сознании стереотипов.

Многие считают, что риски для населения от близости атомных электростанций много больше, чем от тепловых, поскольку атомная станция даже в штатном режиме эксплуатации наносит вред окружающей среде. Однако на самом деле атомные станции — это один из наиболее чистых источников энергии.

Другой устоявшийся стереотип состоит в том, что радиоактивность имеет техногенную

природу. В действительности же это — естественное свойство элементов. Во всех, даже в самых экологически чистых, местах земного шара есть свой радиационный фон, нередко существенно превышающий уровни, характерные для территорий технических радиационно опасных объектов. Например, на Алтае средняя годовая доза от природного фона составляет 6–7 мЗв (данные измерений за 2009 год). Другой пример: в Финляндии около 240 тыс. человек постоянно проживают на территории со среднегодовой дозой выше природного фона 6 мЗв. Для сравнения отметим, что связанная с профессиональной деятельностью средняя годовая доза, полученная в тот же период персоналом Госкомпании «Росатом», непосредственно работающим с источниками ионизирующих излучений, составила 1,59 мЗв [2].

Феномен и причины возможных разрушений, исходящих от атомной энергетики, существенно влияет на сознание опасности. В сознании людей атомная энергетика прочно ассоциируется с атомным оружием. Все хорошо помнят, что АЭС возникли как побочный продукт атомного оружейного комплекса. В отличие от многих других видов техногенной опасности, воздействие радиационных факторов (во всяком случае, на начальной стадии) незаметно, что формирует у людей представление об этой опасности как о чем-то таинственном и зловещем.

Если проанализировать хотя бы только перечисленные выше стереотипы, станет ясно, что в основе аномального восприятия радиационной опасности лежит недостаточная техническая осведомленность населения о безопасности атомной энергетики и, в частности, слабая информированность о средствах ее обеспечения на современных АЭС. Истоки этого также лежат в системе школьного образования. Уровень знаний выпускников школ в вопросах физики, в частности атомной, химии, математики и других точных наук часто бывает весьма низкий. Не вселяют оптимизма и планируемые новшества, а именно внедрение нового Федерального государственного образовательного стандарта, в котором такие базовые для подготовки специалистов атомной отрасли дисциплины, как физика, химия, информатика, алгебра и геометрия, вынесены в блок необязательных предметов.

Кроме всего прочего, неудовлетворительная подготовка выпускников школ по атомной физике, радиационной безопасности, радиоэкологии и общей энергетике в значительной степени объясняется низким качеством учебной литературы. Ни в одном из просмотренных мною многих школьных учебников я не обнаружил хотя бы очень краткого, но внятного изложения вопросов, касающихся безопасности техносферы и, в частности, такой остро воспринимаемой обществом проблемы, какой является проблема безопасности атомной энергетики. В этих учебниках также ничего не говорится о природе различных техногенных рисков и их ранжировании по степени опасности для человека и окружающей среды. Более того, некоторые авторы весьма тенденциозно, а порой недостаточно грамотно излагают вопросы, связанные с радиационной опасностью.

Неадекватная оценка опасности исходит также и от средств массовой информации. Не последнюю роль в формировании гипертрофированной реакции населения на атомную энергетику играют средства массовой информации и современные информационные технологии. Этот фактор особенно наглядно проявился после аварий на Чернобыльской АЭС и на японской АЭС «Фукусима». Это же самое следует сказать о некоторых произведениях литературы и искусства, к которым читатели относятся с большим доверием, чем к газетам, журналам, интернету, радио и телевидению. Это объясняется тем, что описание фактов, облеченное в художественную форму, убедительнее; оно глубже отражается в сознании и запоминается лучше, чем те же сведения, представленные средствами массовой информации. Поэтому ответственность деятелей искусства, обращающихся к такой деликатной проблеме, как безопасность атомной энергетики, должна быть особенно высокой.

Феномен психологии людей является еще одной причиной негативного восприятия частью населения атомной энергетики в связи с такой особенностью психологии массового сознания, как недоверие к власти, настороженное (заведомо критическое) отношение к ученым-атомщикам и вообще к работникам атомной отрасли. Большая часть населения воспринимает то, что говорят эти люди, с позиции презумпции их ви-

новности. Значительно охотнее обыватели прислушиваются к их оппонентам, т. е. к противникам атомной энергетики. В том числе к тем, кто сознательно вводит в заблуждение население по разным конъюнктурным соображениям, а также к далеким от этой области знаний добросовестно заблуждающимся дилетантам.

Одним из важнейших направлений в коррекции неадекватного восприятия опасности, связанной с техногенной сферой, является последовательная учебно-просветительская работа. В отношении к проблеме техногенной опасности, особенно к такой ее составляющей, как атомная энергетика, одинаково вредны обе крайности — недооценка и преувеличение риска. Уже на стадии школьного обучения должны закладываться основы грамотного и осознанного отношения к восприятию опасностей, исходящих от окружающей нас техносферы. После школы обучение нужно продолжать в вузе и на производстве. Просвещение должно охватывать все слои населения, в том числе и неработающих людей. Развитие атомной энергетики является одним из стратегических приоритетов государства, поэтому организацию образовательной и просветительской работы в этой области также следует считать задачей государственной важности на всех стадиях обучения и производственной деятельности наших сограждан.

Феномен и причины необъективности связаны с отношением к средствам обеспечения безопасности. В то же время имеются и объективные причины негативного отношения общества к атомной энергетике, которые связаны с особенностями, присущими работе только ядерных реакторов.

В ядерном топливе беспрецедентно высока концентрация энергии. При одном акте деления ядра урана выделяется в среднем 200 млн эВ энергии, в то время как при окислении одного атома углерода энерговыделение составляет лишь несколько электронвольт. Это соотношение особенно наглядно иллюстрируется широко известным примером: 1 кг ^{235}U по теплотворной способности эквивалентен загруженному углем железнодорожному составу из 70 платформ по 40 т. Если принять загрузку активной зоны реактора с водой под давлением в составе энергетического блока электрической мощностью 1 ГВт равной 70 т урана с обогащением 4 %, то легко подсчитать, что полная потенциальная энергия деления всех ядер ^{235}U составит гигантскую величину — $5{,}2\times10^{13}$ ккал. Конечно, даже при самой тяжелой аварии до разрушения активной зоны в результате теплового взрыва успеет разделиться лишь малая часть топлива. Если предположить, что к моменту разрушения зоны разделится только одна тысячная часть первоначальной загрузки, то есть 2,8 кг ^{235}U, то даже в этом случае высвобожденная в ходе неуправляемого цепного процесса энергия все еще будет очень большой — $5{,}2\times10^{10}$ ккал.

Для представления масштаба этой величины сравним ее с внутренней энергией пароводяной смеси в паровых котлах тепловой электростанции мощностью 1 ГВт, равной 10^5 ккал, или с энергией вращения роторов генераторов ГЭС такой же мощности — 10^6 ккал. В отношении ГЭС эта оценка качественно изменяется, если учитывать потенциальную энергию накопленной в водохранилище воды. Например, полезный объем водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС равен 15 км^3, высота плотины 240 м, энергия вращения роторов генераторов 10^{12} ккал, что значительно (на два порядка) превосходит упомянутую выше энергию деления одной тысячной части ^{235}U в активной зоне реактора мощностью 1 ГВт.

Опасное для целостности реакторной установки энерговыделение предотвращается системой управления и защиты реактора, а также оптимизацией физических свойств активной зоны, совокупность которых должна обеспечивать так называемую отрицательную обратную связь. При этом, чем быстрее растет мощность реактора, тем интенсивнее за счет изменения температур и плотностей компонентов активной зоны «гасится» цепная реакция [3, 4].

При нестационарных режимах работы ядерного реактора существует некоторое предельное состояние, за которым цепная реакция становится неуправляемой. В теории реакторов оно называется состоянием мгновенной критичности и может возникнуть за счет резкого извлечения стержней-поглотителей нейтронов или других действий, в результате чего реактивность (величина, характеризующая отклонение от состояния критичности) становится равной или превосходит суммарную долю всех запаздывающих

нейтронов (0,0064 для ^{235}U). В этом случае условия размножения нейтронов улучшаются настолько, что цепная реакция может идти на одних мгновенных (то есть рождающихся без задержки) нейтронах.

Крупнейшая за всю историю ядерной энергетики чернобыльская авария была следствием неуправляемой цепной реакции на мгновенных нейтронах, повлекшей за собой разрушительный тепловой взрыв реактора. Это произошло по причине грубейших нарушений эксплуатационного регламента и ошибок проектирования (недостатки конструкции стержней системы управления и защиты в сочетании с неудовлетворительными физическими характеристиками реактора).

Феномен и причины недоверия к гарантии безопасности. Одна из ключевых задач обеспечения ядерной безопасности в подобных ситуациях — ни при каких неисправностях и наложениях ошибок эксплуатирующего персонала условия размножения нейтронов не должны улучшаться настолько, чтобы поддерживать цепную реакцию на одних мгновенных нейтронах. Наиболее радикальной мерой обеспечения ядерной безопасности является выполнение условия, при котором в течение всего периода эксплуатации реактора запас реактивности не превосходил бы величину 0,0064. Это условие может быть реализовано, в частности, в жидкосолевых реакторах, а также в некоторых инновационных конструкциях реакторов на быстрых нейтронах.

Специфическая особенность реакторов — невозможность мгновенного выключения. После полного выключения в течение длительного времени в ядерном реакторе продолжает генерироваться тепло за счет радиоактивного распада накопившихся за время работы продуктов деления. Уровень этого остаточного тепловыделения зависит от мощности, на которой работал реактор, и продолжительности его работы до выключения. Так, в реакторе АЭС электрической мощностью 1000 МВт, работавшем в течение 200 суток на номинальной мощности, через 1 час после остановки остаточное тепловыделение составит 31,5 МВт, через 1 сутки после остановки — 13,5 МВт, через 10 суток — около 6 МВт, через месяц — 3,5 МВт. Далее тепловыделение продолжает спадать очень медленно, и ничто не может повлиять на скорость данного процесса.

На АЭС должен быть обеспечен бесперебойный отвод тепла из активной зоны не только при работе, но и после остановки реактора. Иначе в случае прекращения теплоотвода, как это произошло на АЭС «Фукусима» в результате землетрясения и последующего цунами, вероятно повреждение топливных сборок вплоть до их расплавления.

При работе ядерных реакторов образуются высокоактивные продукты деления урана, твердые и жидкие радиоактивные отходы. Многие образующиеся при работе реактора радионуклиды — высокотоксичные и долгоживущие. Период полураспада некоторых из них превосходит сотни и тысячи лет. Поэтому выход радионуклидов в атмосферу, почву и водоемы за пределами АЭС в случае аварии осложняет ее последствия и требует специфических подходов к дезактивации оборудования и радиоэкологической реабилитации загрязненных территорий.

Аварии на АЭС даже при относительно небольших выбросах радиоактивных веществ в определенном смысле являются глобальными, так как попавшие в результате утечки в атмосферу или воду радионуклиды могут переноситься атмосферными и океаническими течениями на большие расстояния от места аварии. Как правило, из-за уменьшения концентрации радионуклидов по мере удаления от аварийной АЭС они представляют все меньшую опасность для населения и окружающей среды. Однако сам факт обнаружения радионуклидов на больших расстояниях от места аварии становится поводом для усиления информационного бума и неадекватной реакции населения.

Основной способ уменьшения подобных рисков — это размещение оборудования реакторной установки в защитной оболочке, локализующей последствия аварий в случае их возникновения. Именно такая оболочка позволила минимизировать выход радиоактивных веществ во время аварии на АЭС «Three Mile Island», сопровождавшейся расплавлением части активной зоны.

Безопасность современных АЭС в сравнении с другими энергетическими объектами

Перечисленные выше характерные особенности в разной степени влияют на потенциаль-

ные риски, связанные с эксплуатацией объектов атомной энергетики. Физическая сущность всей совокупности этих имманентных особенностей ядерных источников энергии объективно обусловливает повышенные по сравнению с другими типами станций требования к обеспечению безопасности АЭС и определяет применительно к ним более высокие стандарты безопасности. Это наглядно характеризуется такими цифрами: расходы на обеспечение безопасности современных АЭС составляют в среднем 25–30 % капитальных расходов на их строительство, в то время как для теплоэлектростанций, работающих на органических топливах, эта величина не превосходит 10 %.

Полувековой опыт широкого использования атомной энергии во многих странах мира убедительно свидетельствует, что наука и инженерная практика оказались способными найти эффективные технические решения, которые позволили обеспечить атомным станциям самый высокий уровень безопасности в ряду других типов крупномасштабной энергетики.

Это утверждение основано на результатах многочисленных исследований по сопоставлению рисков от использования атомных, тепловых и гидроэлектростанций. Применяемые при этом методологии и процедуры оценки рисков не ограничивают анализ сравнением аварий только на самих электростанциях. Они предусматривают сопоставление рисков всех энергетических цепочек, включающих разведку, добычу, транспортировку, хранение топлива, выработку электроэнергии, обращение с отходами и их захоронение. Несмотря на то, что не все перечисленные этапы присутствуют в разных энергетических цепочках (например, при использовании ГЭС нет проблемы захоронения отходов), предложенный подход дает возможность количественно оценить и сопоставить риски от использования различных источников энергии.

Приведем некоторые данные подобного сравнения, которые получены швейцарским институтом им. Поля Шеррера [3]. Основным объектом исследований были крупные аварии, вызвавших наиболее сильную реакцию общества и оказавшие значительное влияние на энергетическую политику государств. Авария считалась крупной, если за короткий промежуток времени она привела к пяти и более жертвам. Исходя из этих критериев была создана база всемирных данных, содержащая информацию о числе смертельных случаев в результате крупных техногенных аварий в энергетике с 1969 по 2000 год. Общий масштаб потерь от крупных техногенных аварий в энергетической отрасли иллюстрирует диаграмма, представленная на рис. 1 [5].

В среднем жертвами аварий в энергетике ежегодно становятся более 1000 человек.

Еще больший интерес представляет сравнительный анализ потерь в технологических цепочках при разных способах получения энергии. Для такого анализа использовалось прямое сопоставление количества жертв крупных аварий, а также сравнение специальных индикаторов, определяемых как число летальных случаев на единицу произведенной энергии. Сводная информация за 1969–2000 годы о жертвах крупных аварий на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях (включая аварии на всех этапах соответствующих энергетических цепочек) представлена в табл. 1 [5]. Приведены сведения о 1768 авариях с пятью или более мгновенными жертвами, общее количество мгновенных жертв во всех энергетических цепочках составило 76396 человек. Вследствие различия в уровне технологического развития стран и несовпадения критериев безопасности все аварии в табл. 1 разделены на две группы. В первую группу включены аварии, произошедшие в 30 странах с высокоразвитой экономикой, входящих в Организацию по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР), а во вто-

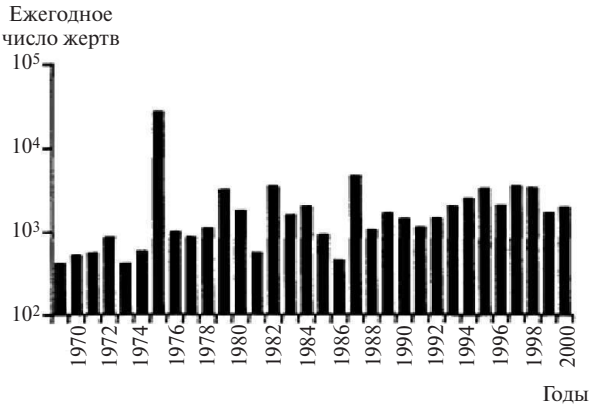


Рис. 1. Ежегодное число жертв в результате крупных техногенных аварий в энергетике

рую — аварии, случившиеся во всех остальных государствах.

Анализ табличных данных позволяет сделать вывод, что существенно меньшее число жертв и смертей на единицу произведенной энергии наблюдается в странах ОЭСР по сравнению с другими странами. Это объясняется главным образом более высоким уровнем технологического развития энергетических отраслей и большим вниманием к проблемам безопасности.

О высоком уровне травматизма в отечественной угольной промышленности наглядно свидетельствуют данные, приведенные на рис. 2 [6]. По уровню травматизма эта отрасль занимает первое место в производственной сфере. В среднем число пострадавших при несчастных случаях в отрасли составляет 25–30 человек на 1000 работающих. Каждый 60-й несчастный случай заканчивается смертельным исходом, из каждых 10 тысяч работающих шахтеров погибают четверо.

На фоне больших потерь людей в результате крупных аварий на всех этапах в секторе энергетики и в гидроэнергетике эксплуатация атомных станций выглядит более благополучно. За рассматриваемый период (1960–2000) в странах, входящих в ОЭСР, вообще не было крупных (с мгновенной потерей пяти или более человек) аварий на АЭС, а в остальных странах произошла только одна крупная авария — чернобыльская, в результате которой мгновенно погиб 31 человек. Однако, кроме мгновенных, есть еще так называемые отложенные жертвы. По оценкам, сделанным на основе текущих коэффициентов взаимосвязи доз и рисков, за 70 лет после чернобыльской аварии могут уйти из жизни от 9 до 33 тыс. человек, пострадавших от радиации.

При оценке рисков, связанных с эксплуатацией объектов тепловой энергетики, также необходимо учитывать возможные отложенные жертвы.

В экологическом обзоре [7] указывается: только в 2000 году причиной смерти примерно 960 тыс. человек стало загрязнение воздуха кодисперсными частицами (менее 10 мкм), которое на 30 % связано с выбросами в атмосферу продуктов сгорания при работе мощных тепловых электростанций.

Риски для здоровья, связанные с тепловой и особенно с угольной энергетикой, значительны как для российских, так и для более экологичных зарубежных ТЭС. Так, в США с выбросами тепловых электростанций, 70 % которых работают на угле, связывают около 24 тыс. преждевременных смертей ежегодно, из которых 2 вызваны раком легких [8]. Обобщенные данные по воздействию тепловых электростанций на здоровье населения США, кроме смертности, выражаются также следующими цифрами: ежегодно госпитализируются 21 850 человек, регистрируется около 600 приступов астмы и сердеч-

Таблица 1

Сводные данные о жертвах аварий в тепловой, атомной и гидроэнергетике [3]

Источники энергии	Страны ОЭСР			Остальные страны		
	Число аварий	Число жертв, чел.	Индикатор, чел./Вт	Число аварий	Число жертв, чел.	Индикатор чел./Вт
ТЭС (уголь)	75	2259	0,157	1044	18017	0,597
ТЭС (нефть)	165	3713	0,132	232	16505	0,897
ТЭС (природный газ)	90	1043	0,085	45	1000	0,111
ТЭС (сжиженный газ)	59	1905	1,957	46	2016	14,896
ГЭС	1	14	0,003	10	29924	10,285
АЭС	0	0	0	1	31	0,048

ных приступов, общее количество ежегодно теряемых рабочих дней превышает 3 млн.

По оценкам, выполненным российскими следователями [9] на основе данных мониторинга Росгидромета о загрязнении атмосферного воздуха, индивидуальные годовые риски смерти от загрязнения воздуха летучей угольной золой в российских городах с крупными электростанциями (Рефтинская ГРЭС в Асбесте, Ростовская ГРЭС в Новочеркасске и др.) находятся на уровне 10^4–10^3. Суммарный ущерб здоровью населения страны, обусловленный работой угольных ТЭС, оценивается в 5–7 тысяч дополнительных случаев смерти в год.

К факторам риска относится также радиационное воздействие тепловых электростанций, особенно работающих на угле, поскольку в нем всегда содержатся радиоактивные вещества (торий, изотопы урана и продукты их распада, в частности полоний, радий и радон, а также калий-40). При сгорании угля эти радиоактивные вещества частично попадают в атмосферу, а частично накапливаются в шлаковых отвалах тепловых электростанций. В 1 т шлаков от сгоревшего угля содержится примерно 100 г радиоактивных веществ. В результате вымывания дождями они проникают в почву и далее в продукты питания людей.

В отличие от ТЭС, атомные станции выбрасывают в атмосферу лишь очень незначительное количество короткоживущих нуклидов, обладающих невысокой радиоактивностью. Радиационные риски, обусловленные работой атомных станций, составляют 10^9–10^7 и оказываются на 4–5 порядков ниже рисков, связанных с работой угольных ТЭС аналогичной мощности [9]. Столь же велика разница в величине популяционных рисков.

Еще одним недостатком, присущим только ТЭС, является выброс в атмосферу большого количества оксидов серы, поскольку природное органическое топливо содержит от 1,5 до 4,5 % серы. При его сгорании образуются оксиды серы, которые вместе с другими продуктами сгорания выбрасываются в атмосферу. Там они вступают в реакцию с парами воды, в результате чего образуется слабый раствор серной кислоты. Тепловая электростанция мощностью 1 ГВт, работающая на угле с содержанием серы 3,5 %, даже при наличии средств очистки ежегодно выбрасывает в атмосферу около 140 тыс. т сернистого ангидрида, из которого образуется 280 тыс. т серной кислоты. Соизмеримое количество серной кислоты попадает в атмосферу и при сжигании мазута. Вместе с дождем серная кислота проникает в почву и наносит большой вред растительности, изменяет состав почвы, разрушает памятники архитектуры и негативно влияет на качество питьевой воды.

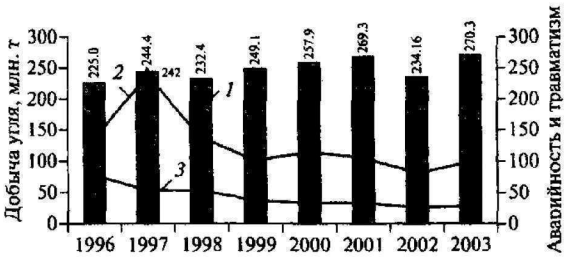


Рис. 2. Динамика добычи угля (*1*), травматизма со смертельным исходом (*2*) и аварийности в угольной промышленности России (*3*)

Перечисленные особенности электростанций, работающих на органическом топливе, не исчерпывают перечень негативных последствий их эксплуатации. Существенный экологический ущерб наносит потребление тепловыми станциями атмосферного кислорода и выброс огромного количества углекислого газа (табл. 2). При использовании АЭС эти негативные последствия полностью исключаются.

Известным проектом по оценке и сравнительному анализу ущерба здоровью человека и природной среде, который наносят разные виды производства электроэнергии, стал проект «External Costs of Energy» [10]. В усредненном виде (потерянные годы жизни, приходящиеся на 1 ТВт·ч выработанной электроэнергии) ущерб здоровью населения Европы составил 7 чел.-лет при производстве электроэнергии из ядерного топлива, 44 чел.-лет — из газа, 144 и 164 чел.-лет — соответственно из каменного и бурого угля. Приведенных данных достаточно, чтобы получить представление о том месте, которое занимает атомная энергетика в шкале рисков, связанных с применением различных технологий получения энергии.

Одна из наиболее характерных тенденций развития техносферы — поступательный рост ее энергетического потенциала и энерговооружен-

Таблица 2

Оценки некоторых экологических последствий годичной эксплуатации энергоблока мощностью 1 ГВт, работающего на разных видах органического топлива

Некоторые экологические последствия работы ТЭС	Величины воздействия ТЭС		
	на угле	на мазуте	на газе
Потребление атмосферного кислорода, млрд м^3	5,5	3,4	4,4
Выброс углекислого газа, млрд м^3	5	3	1

ности. Энерговооруженность первобытного человека ограничивалась его мускульными возможностями и составляла 100–150 Вт. В настоящее время средняя энерговооруженность человека в мире достигает 3–4 кВт, а в развитых странах — 10–15 кВт. Наиболее состоятельные представители современного общества потребления (с учетом принадлежащих им самолетов, яхт, машин и другой техники) могут «похвастаться» уровнем энерговооруженности 10–20 МВт.

Несмотря на то, что страны с высоким уровнем экономического развития в последние десятилетия предпринимают определенные усилия для сдерживания роста энергопотребления, в частности за счет повсеместного внедрения энергосберегающих технологий, мировое энергопотребление продолжает расти, что особенно интенсивно стимулируется бурным развитием экономик стран третьего мира. По всем прогнозам, отличающимся друг от друга лишь оценкой предполагаемых темпов роста, отмеченная тенденция будет сохраняться в течение всей обозримой перспективы. На отдаленную перспективу этот рост не может быть обеспечен углеводородными источниками энергии, так как природные запасы углеводородов не бесконечны. Что касается возобновляемых источников энергии (солнечная энергия, энергия ветра, приливы, биомасса, геотермальная и др.), то в обозримой перспективе их доля в общем производстве энергии по самым оптимистическим оценкам не сможет превысить 15–20 %.

Единственным реалистичным направлением обеспечения роста мировой выработки энергии остается широкомасштабное развитие атомной энергетики на базе использования реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого топливного цикла. Именно такая стратегия позволяет обеспечить атомную энергетику топливным сырьем на длительную перспективу и в наиболее полной мере решить проблемы повышения безопасности и нераспространения ядерных материалов. Стратегии и планы развития энергетики многих стран свидетельствуют о начале проявления этой генеральной тенденции.

Таким образом, человечеству предстоит жить в условиях, когда одним из основных источников энергоснабжения станут атомные электростанции. Поэтому в ряду важнейших задач энергетической стратегии государства должно стать создание безопасной, высокоэффективной по экономическим параметрам, широкомасштабной атомной энергетики. В связи с этим систематическое изучение и формирование общественного мнения в отношении АЭС, хорошо организованная эффективная система просвещения в области атомной энергетики, радиационной биологии, радиоэкологии и в других областях атомной науки и техники должны стать задачами государственного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclear Electricity Generation: What Are the Extern Costs? [Текст] // OECD. NEA4372.– Paris, 2003.

2. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъект Российской Федерации за 2009 год [Текст]: Государственный доклад.— М., 2010.

3. **Саркисов, А.А.** Физика переходных процессов в ядерных реакторах [Текст] / А.А. Саркисов, В.Н. Пучков.— М.: Энергоатомиздат, 1983.

4. **Саркисов, А.А.** Основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов [Текст] / А.А. Саркисов, Л.Б. Гусев, Р.И. Калинин. — М.: Наука, 2008.

5. Comparing Nuclear Accident Risks with Those fro Other Energy Sources [Текст] // OECD. NEA.— 2010. № 686.— P. 52.

6. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2005 году [Текст]: Государственный доклад.— М., 2006.

7. OECD Environmental Outlook [Текст] // OECD.— Paris, 2008.

8. Power Plant Emissions: Paniculate Matter-Relat Health Damages and the Benefits of Alternative Emision Reduction Scenarios [Текст] // Report prepared by Abt Asociates Inc. with Computer Sciences Corporation ai E.H. Pechan Associates Inc. for Clean Air Task For.— Boston.— June 2004.

9. **Арутюнян, Р.В.** Экология и устойчивое развитие региона размешения Нововоронежской АЭС [Текст] / Р.В. Арутюнян, Л.А. Большое, Л.М. Воробьева [и др.] // Атомная энергетика.— 2010. Т. 109, Вып. 2.— С. 109–114.

10. Externalities of Energy [Текст] // European Co-ramsion.— Brussels, 1999. Vol. 7.— DG XII, EUR/— 19083.

УДК 001:929

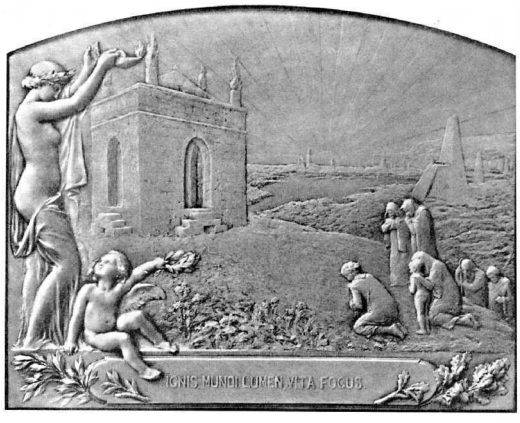
В.В. Окрепилов

СЕМЬЯ НОБЕЛЬ И Д.И. МЕНДЕЛЕЕВ

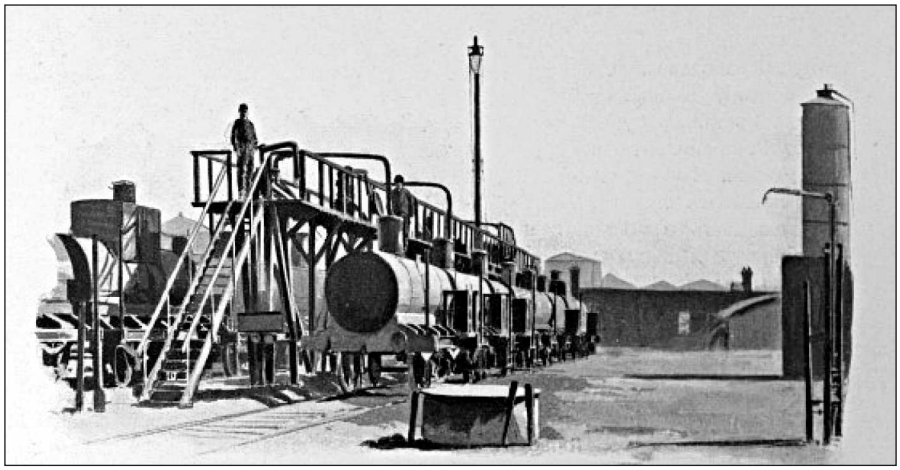
Многогранная деятельность семьи Нобель в России в конце XIX — начале XX веков по многими направлениям тесно переплеталась с деятельностью Д.И. Менделеева, который в этот же период проводил свои исследования в разных областях науки.

Одним из направлений совместной деятельности стало главное, без преувеличения, дело семьи Нобель — содействие развитию отечественной нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности. По оценке Д.И. Менделеева, «...особое оживление в ходе бакинских нефтяных дел наступило лишь тогда, когда в конце 70-х братья Нобель, особенно Л.Э. Нобель, имевший машинный завод в Петербурге, образовали большую компанию для эксплуатации бакинских запасов нефти. До тех пор все делалось с небольшими капиталами, а Т-во Нобелей вложило в дело более 20 млн руб., завело добычу в больших размерах, огромный завод на несколько миллионов пудов керосина в год, устроило нефтепровод с промыслов до завода и до пристани, обзавелось многими прекрасными паровыми наливными судами на Каспийском море и наливными баржами на Волге...».

О влиянии, которое братья Людвиг, Альфред и Роберт Нобели оказали на развитие отечественной нефтяной промышленности, можно судить по следующим примерам. Свою деятельность в Баку братья Нобель начали в середине 1870-х годов. Уже к 1883 году импорт керосина из Америки в Россию прекратился. Вскоре отечественный керосин потеснил американский продукт и на мировом рынке. К 1893 году промышленность развилась настолько, что Д.И. Менделеев после посещения Чикагской всемирной выставки писал: «Нашим... бакинским техникам нечему учиться у американцев относительно перегонки, можно если что позаимствовать, так это некоторые механические приспособления».



Медаль, отчеканенная в память добычи миллиарда пудов сырой нефти Товариществом братьев Нобель, символизирующая миссионерскую роль Нобелей в России



Наливная станция Товарищества братьев Нобель на Каспии

А к началу XX века Россия выходит на первое место в мире по объему нефтедобычи. В 1901 году на ее долю приходится 51 процент добываемой в мире нефти.

Во многом братья Нобели были новаторами. До них переработка нефти осуществлялась примитивным, кустарным способом и единственным продуктом был керосин, причем плохого качества. По многим аспектам изучения нефти они стали первыми. Организованные ими химические и технические лаборатории в Петербурге и Баку производили многочисленные опыты. Это позволило не только повысить качество выпускаемых нефтепродуктов, но и существенно расширить возможности их применения.

Д.И. Менделеев оказывал большую помощь братьям Нобель. Еще с начала 1860-х годов ученый пристально следил за развитием нефтепромышленности. В своих научных трудах он справедливо предвидел огромное значение этой отрасли. Широко известна его оценка использования нефти только как топлива: «Топить можно и ассигнациями». Д.И. Менделеев разрабатывал технологии переработки нефти, а во время своих неоднократных посещений Баку консультировал технологов заводов, выступал с лекциями.

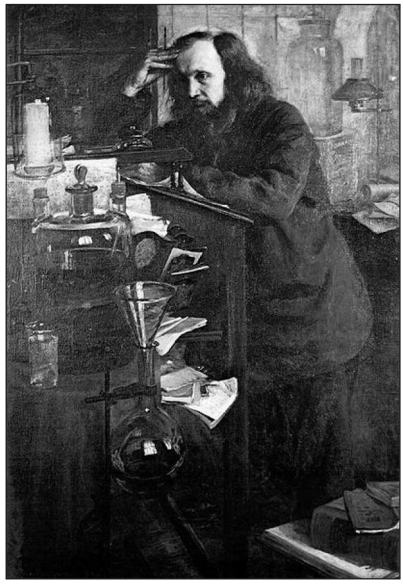
Тесно сотрудничал Д.И. Менделеев с братьями Нобель и при решении важнейших проблем государственной экономики. Например, успех отечественного керосина был бы невозможен без создания соответствующей законодательной базы. Еще в 1867 году Д.И. Менделеев возглавил борьбу за отмену нефтяных откупов, и с 1 января 1873 года откуп был заменен долгосрочной арендой и акцизным обложением. Однако впоследствии система акцизов стала создавать препятствия для развития нефтеобрабатывающей промышленности, и Д.И. Менделеев пришел к выводу о необходимости ее отмены. Во многом благодаря усилиям ученого в 1876 году была создана специальная комиссия для рассмотрения вопроса «О проекте акциза на нефть и развитии нефтяной промышленности». Большую активность в этом вопросе проявили и братья Нобель. В результате с 15 сентября 1877 года акциз на керосин был снят.

Такому исходу дела, безусловно, способствовал и высокий авторитет Д.И. Менделеева. Благодаря своим энциклопедическим знаниям, высочайшей квалификации, широкому кругозору, он к концу XIX века стал одним из признанных экспертов по многим вопросам, в том числе и по вопросам экономической политики. К его голосу прислушивалось правительство России. Как подлинный патриот своей страны, Д.И. Менделеев видел будущее России в развитии промышленности, подчеркивая, что индустриализация — это историческая необходимость. Как актуально звучат сегодня его слова о том, что «торговать сырьем может и дикарь». «Промышленность, — подчеркивал он, — необходимое звено современной жизни людей во всех их ступенях развития...».

«Мне говорят — ведь вы химик, а не экономист, зачем же входите не в свое дело? — писал Д.И. Менделеев. — На это необходимо ответить, во-первых, ... быть химиком не значит еще вовсе чуждаться заводов и фабрик и их положения в государстве, а следовательно, и сущности экономических вопросов, сюда относящихся, во-вторых, ... истинного, правильного решения экономических вопросов можно ждать только от приложения опытных приемов естествознания, для которых химия составляет одну из важнейших дисциплин, и, в третьих, в деле общей, народной и государственной пользы полезно и даже должно слышать голоса не только присяжных экономистов, но и всякие иные. Мой голос, я вижу и слышу, созвучит согласно с многими иными русскими. В научной деятельности очень часто рабочий, архитектор и творец совпадают ...».

Не случайно именно Д.И. Менделееву известный государственный деятель того времени, министр финансов России И.А. Вышнеградский, однокашник ученого, предложил подготовить проект нового таможенного тарифа по химическим продуктам. Углубившись в работу, Д.И. Менделеев понял, что рассмотрение тарифа только на отдельные виды импортных товаров вряд ли будет результативным. Поэтому он сформулировал и блестяще выполнил поистине титаническую задачу: в короткие сроки собрав и проанализировав огромный объем информации, он составил проект общего тарифа для всех ввозимых товаров, который и был введен в 1891 году. Результаты своей работы Д.И. Менделеев изложил в фундаментальном труде «Толковый тариф, или исследование о развитии промышленности России в связи с ее общим таможенным тарифом 1891 года». Книга представляла собой подробные комментарии к таможенному тарифу с экономическим обоснованием принятых ставок обложения по отдельным видам товаров, описанием состояния основных отраслей и выяснением перспектив их развития.

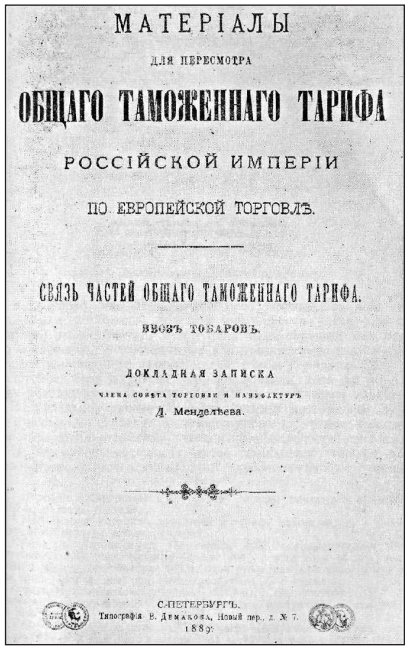
По сути, работа ученого произвела настоящую революцию в таможенном деле. До этого тариф рассматривался только как фискальная мера, предназначенная для пополнения казны за счет таможенных пошлин. Д.И. Менделеев же



Дмитрий Иванович Менделеев
Портрет работы Н.А. Ярошенко, 1886 г.

предложил с помощью тарифа управлять развитием экономики — устанавливать пошлины на ввозимые и вывозимые товары с учетом степени их влияния на развитие производительных сил России.

Разработанная ученым таможенная политика была принята на вооружение и осуществлялась Россией в конце XIX — начале XX веков,


МАТЕРІАЛЫ
ДЛЯ ПЕРЕСМОТРА
ОБЩАГО ТАМОЖЕННАГО ТАРИФА
РОССІЙСКОЙ ИМПЕРІИ
ПО ЕВРОПЕЙСКОЙ ТОРГОВЛѢ.
СВЯЗЬ ЧАСТЕЙ ОБЩАГО ТАМОЖЕННАГО ТАРИФА.
ВВОЗЪ ТОВАРОВЪ.
ДОКЛАДНАЯ ЗАПИСКА
Д. Менделѣева.
С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
1889.

обеспечив поддержку отечественного производителя и ограничив распространение зарубежных товаров на русском рынке. Тем самым были созданы условия для интенсивной индустриализации, что позволило решать вопрос экономической независимости державы.

Следует отметить, что предложенная Д.И. Менделеевым система таможенных пошлин носит очевидный протекционисткий характер. По его мнению, важнейшим средством для стимулирования промышленного развития России может стать ограждение русской промышленности от конкуренции иностранных предпринимателей с помощью увеличения ввозной пошлины. А поскольку частная инициатива слаба, то государство должно взять на себя руководство промышленным развитием страны, создав особое министерство. В 1905 году это предложение было наконец реализовано. Главной задачей нового Министерства торговли и промышленности было управление казенной промышленностью и надзор за частной промышленностью и торговлей.

Схожие взгляды высказывал и один из братьев Нобель — Людвиг, который видел в систематическом покровительстве средство для развития отечественной промышленности. Такой обоснованный и весьма необходимый протекционизм ограничивал бы конкуренцию заграничных производителей, а значит, способствовал созданию самостоятельных и устойчивых предприятий. Еще в 1867 году в своем выступлении на заседании Русского технического общества (РТО) Людвиг Нобель поставил три вопроса, которые и сегодня звучат весьма актуально: 1) можем ли мы при постройке машин конкурировать с иностранцами по цене; 2) надобно ли желать, чтобы машины строились в России; 3) если это надобно, то при каких условиях возможно развитие механических заводов. Эти вопросы в дальнейшем были обсуждены на особой комиссии РТО и стали темой ходатайства в правительство.

Позже Людвиг Нобель не раз выступал на заседаниях РТО с сообщениями о положении в механической промышленности. Одним из результатов этих выступлений стал созыв Всероссийского съезда деятелей по машиностроительной промышленности. Людвиг Нобель принял самое активное участие в работе этого съезда.

Это вполне соответствовало его характеру. По отзывам современников, это был промышленный деятель в самом широком смысле. Результаты работы бакинской нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности имели огромное научное значение. Именно видение перспективы развития, в частности, заставляло Людвига задуматься о подготовке квалифицированных кадров для своих предприятий. Уже в 1859 году он высказывал идею о создании в России общества, членами которого были бы исключительно ученые и промышленники и одной из задач которого могла бы быть подготовка рабочих в создаваемых обществом профессиональных школах и училищах. Поэтому неудивительно, что Людвиг Нобель стал в 1866 году одним из учредителей Императорского Русского технического общества, призванного содействовать развитию техники и промышленности в России, включая и развитие технического образования.

Д.И. Менделеев также входил в число соучредителей Русского технического общества и принимал самое активное участие в его работе, неоднократно выступая на заседаниях и съездах. Пользуясь возможностями РТО, в частности на совместных совещаниях с руководителями министерств, Д.И. Менделеев проводил в жизнь свои экономические идеи.

Участие Людвига Нобеля в работе общества не ограничивалось лишь выступлениями на заседаниях РТО. На протяжении многих лет он оказывал материальную помощь РТО на проведение научных исследований и в деле создания школ и училищ под эгидой РТО. В 1869 году он одним из первых пожертвовал денежные средства на создание школы железнодорожных мастеров, курсов при Сампсониевском уездном училище для рабочих своего Механического завода, учредил стипендию имени А. Баранова при Технической школе. В 1880 году он удостоился благодарности августейшего покровителя РТО великого князя Константина Николаевича «За труды и пожертвования по школам Технического общества».

Осознавая значение науки, Людвиг Нобель долгое время жертвовал по 2000–5000 рублей на научные исследования. Без финансовой помощи



Главный фасад Училища технического рисования
барона Штиглица (Санкт-Петербург),
на территории которого располагалось РТО

Нобелей не могли бы проводить свои научные исследования многие выдающиеся ученые того времени, включая и самого Д.И. Менделеева. Для Академии наук Людвигом Нобелем были построены три сейсмические станции в Баку и Красноводске. Эту традицию продолжил и сын Людвига — Эммануил Нобель. Например, вот что он писал в письме 6 марта 1915 года на имя временно исполняющего обязанности вице-президента Академии наук академика А.П. Карпинского: «Подтверждая получение Вашего почтеннаго письма от 1 марта сего года за № 596, позволяю при сем препроводить 5000 руб., составляющие последнюю треть пожертвованной мною суммы на издание трудов учрежденной при Академии Наук Комиссии по градусному измерению на островах Шпицбергена».

Большое содействие Людвиг Нобель оказал и введению в России метрической системы мер, идея использования которой была высказана Леонардом Эйлером еще в середине XVIII века. В 1876 году он выступил с докладом на заседании РТО, в котором обосновал необходимость скорейшего решения этого вопроса. Он прекрасно понимал, что необходимо радикально реформировать всю государственную систему мер и весов. Развитие промышленности настоятельно требовало совершенствования измерений. РТО создало комиссию, которая подготовила и внесла в правительство России проект постановления о введении метрической системы. Л. Нобель обеспечивал финансирование этих работ.

Введение метрической системы обязывали и международные договоренности — в 1875 году Россия в числе 17 экономически развитых стран мира подписала Метрическую конвенцию. Необходимо отметить, что заключению Конвенции во многом способствовала инициатива по созданию единообразных метрических эталонов для всех стран, выдвинутая известным русским физиком и электротехником Б.С. Якоби. Он входил в созданный в 1867 году на Всемирной выставке в Париже Комитет мер, весов и монет. В 1869 году вместе с академиками О.В. Струве и Г.И. Вильдом Б.С. Якоби подготовил доклад о необходимости изготовить новые международные прототипы метра и килограмма, причем для этой цели им были разработаны гальванопластические методы. От имени Петербургской академии наук доклад был направлен в Парижскую академию.

Как известно, горячим сторонником введения метрической системы был и Д.И. Менделеев. Можно сказать, что вклад его и Людвига Но-

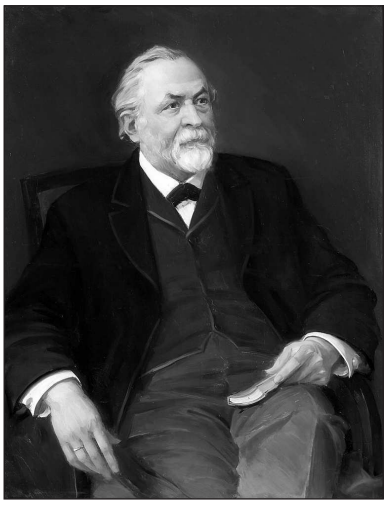


Академик Б.С. Якоби
(1801–1874 гг.), один из инициаторов унификации национальных метрических эталонов

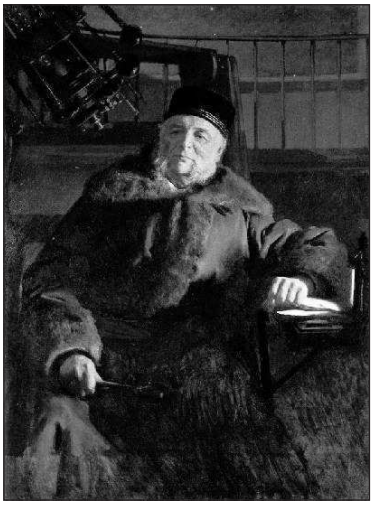
беля в решение этого вопроса был решающим. Еще в 1868 году в речи на Первом съезде русских естествоиспытателей ученый обосновывал необходимость введения десятичной системы мер и весов. И только благодаря его настойчивости и целеустремленности в 1899 году законом «Положение о мерах и весах» было разрешено факультативное применение метрических мер в России. Обязательное же ее применение было узаконено лишь в сентябре 1918 года.

Активно способствуя реформированию метрологической службы страны, Д.И. Менделеев стал инициатором создания сети поверочных палаток торговых мер и весов, первая из которых была открыта в Петербурге 23 (10 по ст.ст.) сентября 1900 года. Помещение для нее и необходимое финансирование предоставило РТО. Так начался отсчет истории той организации, прямым наследником и правопреемником которой сейчас является ФБУ «Тест — С.-Петербург». С первых дней своей работы Санкт-Петербургская Первая поверочная палатка стала основной базой для разработки и практического опробования новых метрологических приемов и методов, школой для многих будущих ученых и организаторов метрологической службы России.

Общеизвестно, что Д.И. Менделеев был выдающимся метрологом, входил в число европейских ученых-лидеров в этой области. Менее известен вклад в метрологию, сделанный Нобелями. А ведь, будучи талантливыми предпринимателями и инженерами, Нобели использовали комплексный, системный подход в реализации всех своих проектов. Именно поэтому они не могли не уделять самого пристального внимания обеспечению единства измерений и внедрению методов оценки качества как неотъемлемой части системного подхода. Нобели создали немало инновационных по тем временам методик



Академик Г.И. Вильд
(1833–1902 гг.), директор Петербургской геофизической обсерватории, член МКМВ с 1875 по 1895 год



Академик О.В. Струве
(1819–1905 гг.), директор Пулковской астрономической обсерватории, один из инициаторов унификации национальных метрических эталонов

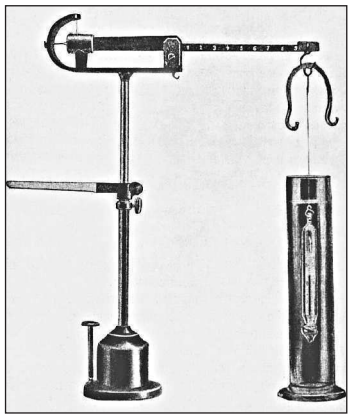


В помещении Санкт-Петербургской поверочной палатки

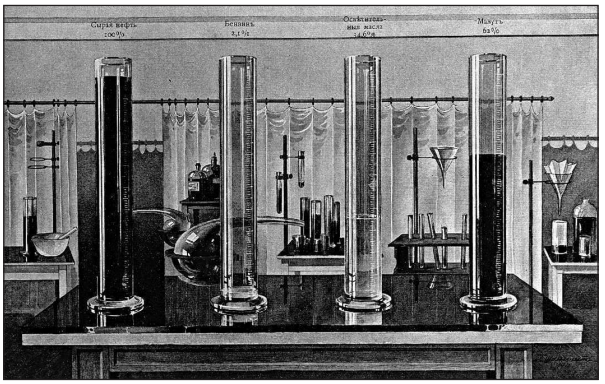
измерений и измерительных приборов. Например, Людвиг Нобель сконструировал такие приборы, как аппарат для определения жара в печи при горении топлива, прибор для определения силы освещения, «снаряд» для определения количества воды, вытекающей из какого-либо отверстия.

Но основная часть работ братьев Нобель в этой области, естественно, была связана с метрологическим обеспечением деятельности по добыче и переработке нефти. Так, ими был предложен новаторский способ обмера нефтепродуктов в железных резервуарах и земляных амбарах. В ходе дальнейших исследований Нобели смогли разработать способы определения важнейших характеристик качества нефтяных продуктов — вязкости, воспламеняемости, удельного веса, содержания воды и твердых механических веществ.

Помимо этого Людвиг Нобель изобрел прибор для определения взрывной силы пороха, который нашел широкое применение в промышленности. В связи с этим стоит отметить еще одно общее направление деятельности Д.И. Менделеева и семьи Нобель — это изучение взрывчатых веществ. Как известно, именно Альфред Нобель считается изобретателем динамита. И самая крупная фирма Германии в этой области носит его имя («Нобель динамит»). Д.И. Менделеев также занимался этой проблемой. По предложению Морского министерства он разработал технологию производства пироколлодия — основы бездымного пороха, который превосходил по своим характеристикам все иностранные (был безопасен для орудий всех калибров, давал одинаковые начальные скорости снарядов). К сожалению, межведомственные разногласия привели к тому, что пироколлоидный порох Менделеева не был принят на вооружение. Эта технология не была засекречена, и впоследствии, во время Первой мировой вой-



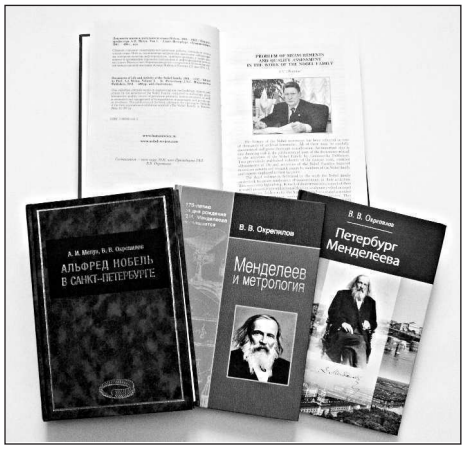
Определение плотностей (удельного веса) нефтяных продуктов посредством весов Вестфаля



Лаборатория Товарищества братьев Нобель.
Определение сравнительного количества погонов и остатков (мазута), получаемых из сырой нефти

ны Россия закупала в США огромное количество пороха, который, по существу, был пироколлоидным, то есть произведенным по методу Д.И. Менделеева.

Как уже отмечалось, братья Нобели были настоящими промышленниками, нацеленными на перспективу и думающими о подготовке высококвалифицированных кадров. Поэтому, кроме огромной помощи науке, они оказывали поддержку школам, училищам не только по линии РТО, но и многим другим учебным заведениям. Так, Людвигом Нобелем были учреждены именные стипендии в Горном и Технологическом институтах, ремесленном училище Цесаревича Николая, ремесленном 1-м реальном училище, ремесленном Императорском коммерческом училище, Нижегородской торговой школе, Нижегородском коммерческом училище, Царицынском городском училище, Бакинском реальном училище. Заботясь о достойных условиях проживания своих сотрудников, он строил для них дома около Баку. Эммануил Нобель построил в Петербурге целую колонию домов, снабженных водопроводом и центральным отоплением. Здесь же им были устроены так называемый Народный дом и школа для детей сотрудников. Не ограничиваясь рамками завода, Эммануил Нобель принимал самое активное участие в деятельности благотворительного общества «Маяк», нацеленного на помощь молодежи, распространение христианских идей и охрану окружающей среды. Много лет Эммануил избирался казначеем общества, осуществлял финансово-распорядительный контроль над его деятельностью.



Конечно, Нобели были предпринимателями, заботящимися об извлечении прибыли, но вместе с тем они, как и Д.И. Менделеев, были истинными патриотами, заботящимися о развитии отечественной промышленности, науки и образования. К ним вполне применимы слова Д.И. Менделеева о том, что любовь к Отечеству составляет «одно из возвышеннейших отличий развитого, общежитийного состояния людей от их первоначального». Эффективная совместная деятельность Нобелей и Д.И. Менделеева на благо России до сих пор служит хорошим примером для всех.

В России чтут память выдающихся деятелей отечественной истории. Постоянно пополняется и расширяется экспозиция нашего музея, наглядно представляющая деятельность Д.И. Менделеева и семьи Нобель в России. Отдавая дань уважения их важной исторической роли, ФБУ «Тест — С.-Петербург» стал инициатором выпуска книг по этой тематике, в том числе «Альфред Нобель в Санкт-Петербурге», «Петербург Менделеева», «Д.И. Менделеев и метрология», трехтомника «Д.И. Менделеев и наука об измерениях», третьего тома «Документов жизни и деятельности семьи Нобель». Мы активно участвуем в различного рода мероприятиях, посвященных Д.И. Менделееву, семье Нобель и их роли в истории России. В своей деятельности мы стремимся следовать принципам, заложенным Д.И. Менделеевым, — точности, честности, объективности. Мы претворяем в жизнь комплексный системный подход, который помог Нобелям добиться успехов.

УДК 001:378

Д.Г. Арсеньев

УЧАСТИЕ УЧЕНЫХ И ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОБЩЕСТВ И АССОЦИАЦИЙ

Стратегическими направлениями международной деятельности нашего университета на современном этапе являются новые перспективные формы инновационного сотрудничества с ведущими зарубежными университетами, научными центрами и промышленными компаниями, активное участие в престижных международных партнерских организациях и ассоциациях, определяющих мировую стратегию развития образования и науки, использование новых технологий информационного взаимодействия и коммуникаций с зарубежными партнерами, работа с новыми перспективными регионами и странами.

Концепция развития международной деятельности университета утверждена Ученым советом СПбГПУ 30 мая 2011 года.

Основной целью международной деятельности университета ставится повышение эффективности образовательной и научно-исследовательской деятельности СПбГПУ за счет внедрения передового мирового опыта с учетом отечественных традиций фундаментального университетского образования, вхождение в профессиональные международные общественные организации и ассоциации, формирование высокопрофессиональной и высокотехнологичной инфраструктуры, отвечающей мировым стандартам и обеспечивающей качественное развитие образования и науки, усиление экспортной привлекательности образовательных и научных программ СПбГПУ на основе интеграции передовых международных технологий и отечественных профессиональных знаний и навыков в сфере международного образования и научных исследований.

Важным инструментом реализации стратегических целей университета в области образования и науки служит укрепление и развитие эффективного академического партнерства университета с ведущими зарубежными организациями, ассоциациями, вузами, научно-образовательными центрами и промышленными компаниями.

Внедрение мировых инновационных технологий и передового международного опыта способствует научно-технологическому развитию фундаментальных научных исследований в университете, интеграции с промышленностью и повышению качества подготовки кадров.

Университет активно взаимодействует со многими ведущими зарубежными академическими организациями в формировании единого образовательного пространства, создании и развитии новых моделей образовательных программ и международного научного партнерства, в их числе: Шведский институт; Комиссия Европейского сообщества (European Commission); Международный научно-технический центр (International Science and Technology Center); Европейская сеть университетов в области всеобщего менеджмента качества (EVNTQM); Центр международной академической мобильности Министерства образования Финляндии (CIMO); Французский институт; Британский совет (British Council); Американский совет (American Council); Нидерландская организация по международному сотрудничеству в области высшего образования (Nuffic); Немецкая служба академических обменов (Deutscher Akademischer Austauschdienst); Немецкое научное общество (DFG); Объединение имени Гельмгольца (Helmholtz-Gemeinschaft), Германия; Фонд имени Александра фон Гумбольдта (AvH), Германия; Общество Фраунгофера (Fraunhofer-Gesellschaft), Германия; Общество научных исследований имени Макса Планка, Германия.

Сотрудничество с указанными организациями способствует развитию международных

связей в области образования и научной кооперации прежде всего посредством обмена студентами и учеными. Основные задачи этих организаций:

поддержка молодой университетской элиты путем ее обучения и научной работы в ведущих университетах и научных центрах за рубежом посредством выделения стипендий;

интернационализация университетов с целью создания единого научно-образовательного пространства;

развитие межкультурных коммуникаций

Вышеперечисленные организации предлагают программы, которые в нужной мере поддерживают студентов и молодых преподавателей на всех этапах становления их научной карьеры, содействуют ранней научной самостоятельности молодых ученых, способствуют привлечению талантливых молодых ученых внутри страны и за рубежом; поддерживают исследования, ориентированные на получение знаний и направленные на интеграцию науки с реальным сектором мировой экономики во всех отраслях общественной жизни.

Активное участие наших ученых-экспертов в разумной реализации положений Болонского процесса для вхождения университета в единое образовательное пространство Европы, их опыт и знания находят выражение в членстве в международных образовательных ассоциациях.

Международные организации, членом и партнером которых является СПбГПУ:

Международная ассоциация университетов (International Association of Universities);

Европейская ассоциация международного образования (IAIE);

Европейская ассоциация университетов (European University Association);

Международная организация по учебному оборудованию (International Organization for Study Equipment);

Ассоциация университетов стран Европы и Юго-Восточной Азии (ASEA UNINET);

Европейская Ассоциация топ-менеджеров в промышленности для университетов (T.I.M.E.);

Платформа сотрудничества столичных технических университетов стран Центральной и Восточной Европы;

Ассоциация университетов городов мирового уровня WC2 (World Class University for World City);

Ассоциация PMUni (Project Management University) — Ассоциация 11-ти европейских университетов в области управления проектами;

Европейский консорциум «Математики для промышленности» (ECMI);

Ассоциация вузов стран Балтийского региона «Балтийский университет»;

Международная ассоциация вузов CUMULUS (объединяет около 140 вузов мира, ведущих исследования и подготовку студентов в области дизайна и медиадизайна).

Членство в этих ассоциациях дает возможность на уровне руководства и экспертов определять общие стратегические тенденции развития университетов в глобальном образовательном пространстве и на общемировом уровне. Вызовы, которые принимают университеты на фоне глобализации, интернационализации высшего образования, общемировых процессов, затрагивающих и сферу высшего образования, диктуют и новые задачи для формирования образовательной среды в вузах. С другой стороны, членство университета в ассоциациях позволяет ему через совместные программы и научные проекты повышать качество подготовки кадров для инновационной экономики. Таким образом, деятельность университета в международных университетских ассоциациях преследует следующие цели:

исследование мирового опыта подготовки кадров и развития научно-исследовательской деятельности;

интеграцию академической среды университетов;

ответы на вызовы глобализации, связанные с образованием, исследованиями, передачей современных технологий и субсидированием высшего образования;

повышение значимости и престижа университетов как в Европе, так и во всем мире;

укрепление позиции университета в международных рейтингах.

Достижения научных школ университета основаны на интеллектуальном потенциале ученых, в том числе активно вовлеченных в международную деятельность. Совместные научные

исследования, интенсивный процесс общения и обмена знаниями находят подтверждение в признании опыта и знаний наших ученых через членство в международных ассоциациях в качестве экспертов, равноправных партнеров, а также председательстве в программных комитетах крупнейших международных научно-практических симпозиумов.

Более 120 ученых Санкт-Петербургского государственного политехнического университета представляют наш университет в 44 международных научных ассоциациях в области как фундаментальных исследований, так и технических и гуманитарных наук.

Ниже приведен перечень наиболее крупных международных научных ассоциаций и обществ, в работе которых принимают участие ученые СПбГПУ.

Международные организации высшего образования

Международная академия наук высшей школы, Россия. МАН ВШ была учреждена в 1992 году как научная общественная организация наиболее авторитетных, выдающихся ученых и специалистов, работающих в системе высшей школы и ставящих своей целью развитие и совершенствование ее научного, духовного и экономического потенциала. У истоков создания организации стояли такие крупные и известные ученые и специалисты, как президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета академик РАН Ю.С. Васильев, ректор МГУ академик РАН В.А. Садовничий, ректор Национального технического университета (г. Киев) академик НАН Украины М.З. Згуровский, ряд руководителей российских, белорусских, казахских, узбекских, китайских вузов при поддержке министерств образований этих стран.

Президентом МАН ВШ является профессор Валентин Ефимович Шукшунов, генеральный директор Центра тренажеростроения и подготовки персонала, президент (1999–2008) Южно-Российского государственного технического университета в Новочеркасске.

Почетным председателем Санкт-Петербургского отделения академии является президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета академик РАН Юрий Сергеевич Васильев. От Политехнического университета в деятельности академии участвуют 57 ученых. Среди них декан факультета физики и нанотехнологий лауреат Нобелевской премии академик РАН Жорес Иванович Алферов, ректор СПбГПУ член-корреспондент РАН профессор Андрей Иванович Рудской, научный руководитель Программы развития Национального исследовательского университета академик РАН Михаил Петрович Федоров.

Европейская ассоциация инженерного образования IGIP. От СПбГПУ в нее входит профессор кафедры исследования структуры и свойств материалов факультета технологии и исследования материалов д.т.н. Анатолий Анатольевич Попович.

Европейская ассоциация международного образования (Европа) СПбГПУ представляют доцент кафедры управления международным сотрудничеством Института международных образовательных программ к.т.н. Евгений Васильевич Шевченко, начальник управления международного сотрудничества к.ф.н. Владислав Петрович Живулин, зам. директора департамента международных образовательных программ и проектов Елена Германовна Никончук.

Международные общества в области фундаментальных наук

Глубокие фундаментальные исследования, проводимые кафедрами и научными подразделениями СПбГПУ, известные научные школы по физике, химии, ядерной физике, космическим исследованиям, участие университета в крупномасштабных российских и международных проектах в области нанотехнологий, материаловедения, оптики, радиофизики, исследований лазера позволили СПбГПУ быть представленным в ряде ведущих международных научных обществ.

Ученые физико-механического факультета, радиофизического факультета, факультета физики и нанотехнологий и Института международных образовательных программ являются членами международных научных ассоциаций, объединяющих исследователей в области фундаментальных наук, включая:

Американское математическое общество (от СПбГПУ — профессор кафедры прикладной

математики физико-механического факультета д.ф.-м.н. Сергей Игоревич Репин).

Общество Бернулли математической статистики и вероятности (Bernoulli Society for Mathematical Statistics and Probability). От СПбГПУ в него входят профессор кафедры прикладной математики физико-механического факультета д.ф.-м.н., Георгий Леонидович Шевляков.

Американское общество материаловедения (Materials Research Society, USA). СПбГПУ представляет профессор кафедры физики и технологии наноструктур факультета физики и нанотехнологий д.ф.-м.н. Владимир Викторович Чалдышев.

Американский институт аэронавтики и астронавтики (American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)). Его членами являются профессор кафедры космических исследований факультета физики и нанотехнологий доктор ф.-м.н. Сергей Васильевич Бобшев и профессор кафедры распределенных интеллектуальных систем Института международных образовательных программ д.т.н. Александр Борисович Куранов.

Комитет по космическим исследованиям (COSPAR), Франция. В него входит профессор кафедры космических исследований факультета физики и нанотехнологий д.ф-м.н. Валерий Митрофанович Остряков.

Международный астрономический союз (International Astronomical Union (IAU)). СПбГПУ в нем представляют профессор кафедры космических исследований факультета физики и нанотехнологий д.ф.-м.н. Юрий Николаевич Гнедин (участвует в работе комиссии № 30 «Двойные звезды»), профессор заведующий кафедрой космических исследований факультета физики и нанотехнологий д. ф.-м.н., Дмитрий Александрович Варшалович и профессор кафедры космических исследований факультет физики и нанотехнологии д. ф.-м.н Андрей Михайлович Быков.

Комитет стран СНГ по тематике больших телескопов. В нем участвует доцент кафедры космических исследований факультета физики и нанотехнологий к.ф-м.н Юрий Николаевич Гнедин.

Европейская ассоциация астробиологии (European Astrobiology Network Association). Членом ее совета является доцент кафедры космических исследований факультета физики и нанотехнологий к.ф.-м.н. Анатолий Константинович Павлов.

Институт физики, Великобритания. В его деятельности участвуют декан факультета физики и нанотехнологий академик Жорес Иванович Алфёров и профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники радиофизического факультета д.ф.-м.н. Леонид Евгеньевич Воробьев.

Международное общество по транспорту кислорода в ткани (International Society on Oxygen Transportation to tissues). Его действительным членом является профессор кафедры физики и технологии наноструктур факультета физики и нанотехнологий д.мед.н. Михаил Владимирович Дубина.

Международное общество оптики и фотоники (SPIE International Society for Optics and Photonics),США. В его деятельности принимает участие профессор Института лазерных и сварочных технологий факультета технологии и исследования материалов д.т.н. Глеб Андреевич Туричин.

Европейский консорциум «Математики для промышленности» (ECMI). СПбГПУ в нем представляет профессор заведующий кафедрой прикладной математики физико-механического факультета д.т.н. Владимир Евгениевич Клавдиев.

Общество Лейбница, Германия. Его член — декан факультета физики и нанотехнологий академик д.т.н. Жорес Иванович Алферов.

Международные общества в области энергетики, гидротехники, экологии

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет внес большой вклад в развитие промышленного комплекса нашей страны. Все крупномасштабные, стратегические программы и проекты в СССР и в России реализованы при участии ученых и инженеров СПбГПУ — экспертов в различный областях техники.

Опытно-конструкторские разработки нашего университета являются системообразующими для всего энергетического комплекса нашей страны. Крупнейшие энергетические системы

в России и за рубежом воплощены в жизнь на основании интенсивной научной мысли ученых-политехников. Именно поэтому многие ученые инженерно-строительного, электромеханического, энергомашиностроительного факультетов, факультета физики и нанотехнологий и др. являются членами международных обществ в этих областях.

Международная ассоциация компрессорщиков и пневматиков (АСКОМП) была создана по инициативе ряда промышленных организаций и вузов в 1990 гооду. Инициатором и первым председателем стал заведующий кафедрой компрессоростроения профессор д.т.н. Константин Павлович Селезнев, возглавлявший ассоциацию с момента ее создания.

Ассоциация активно принимает участие в организации международных научно-технических конференций (МНТК). Участниками конференций наряду со специалистами России и стран СНГ являются представители ведущих зарубежных фирм и научных центров Германии, США, Англии, Польши и других стран. С 1998 года председатель Ассоциации — заведующий кафедрой компрессорной, вакуумной и холодильной техники СПбГПУ д. т. н. профессор Ю.Б. Галёркин.

Международный комитет по большим плотинам (International commission on large dams (ICOLD)). Неправительственная международная организация, которая представляет собой форум для обмена знаниями и опытом в технологии строительства и эксплуатации плотин, а также оценки влияния крупных энергосистем на экологическую обстановку. Международная комиссия по большим плотинам (ICOLD) — это одна из наиболее авторитетных профессиональных организаций в мире на сегодняшний день. Она была создана в 1928 году. В настоящее время членами Комиссии являются представители 85 развитых и развивающихся стран Европы, Америки, Африки, Азии. Кроме того, членами комиссии являются около 10 тысяч индивидуальных и коллективных участников, ученых, инженеров, геологов, гидростроителей.

От СПбГПУ в нем участвует академик Михаил Петрович Федоров, научный руководитель Программы развития Национального исследовательского университета, член рабочей группы по подготовке кадрового резерва Российского национального комитета по большим плотинам.

Международная ассоциация гидравлических исследований (МАГИ) — International Association for Hydraulic Research (IAHR). Ученых СПбГПУ в ней представляют академик Юрий Сергеевич Васильев, Президент СПбГПУ, и академик Михаил Петрович Федоров, вице-председатель Российского национального комитета МАГИ.

Всемирная ветроэнергетическая ассоциация (WWEA). Ее членом является заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии инженерно-строительного факультета профессор д.т.н. Виктор Васильевич Елистратов.

Международная энергетическая академия, Россия. В нее входят научный руководитель Международный высшей школы управления СПбГПУ действительный член МЭА профессор д.э.н. Василий Романович Окороков, профессора кафедры гидромашиностроения энергомашиностроительного факультета д.т.н. Григорий Ицкович Топаж и к.т.н. Валерий Алексеевич Умов, профессор кафедры теоретической механики физико-механического факультета д.ф-м.н. Юрий Евгеньевич Карякин, член-корреспондент МЭА.

Международный совет по большим электроэнергетическим системам (Council on Large Electric Systems CIGRE worldwide). Его членом до последних дней жизни (2012) был профессор кафедры электрических систем и сетей электромеханического факультета к.т.н. Владимир Иванович Галанов.

Международная биополитическая организация (BIO), Афины, Греция. В ее деятельности в качестве соруководителя международных проектов и конференций с российской стороны участвует профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии инженерно-строительного факультета к.т.н. Александр Ильич Шишкин.

Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). Ее членами являются профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии инженерно-строительного факультета к.т.н. Александр Ильич Шишкин (действительный

член), заведующий кафедрой распределенных интеллектуальных систем Института международных образовательных программ профессор д.т.н. Вячеслав Петрович Шкодырев (член программного комитета), профессор кафедры физики и технологии наноструктур факультета физики и нанотехнологий д.т.н Михаил Владимирович Дубина (действительный член).

Центральная дреджинговая ассоциация (CEDA), Нидерланды. Членом экологической комиссии (Environmental Commission) представительства России является профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии инженерно-строительного факультета доктор географических наук Михаил Борисович Шилин.

Международная ассоциация экономистов-энергетиков, США. В число ее членов входит профессор научный руководитель Международный высшей школы управления д.э.н. Василий Романович Окороков.

Международные научные общества в области материаловедения и металлургии

Факультет технологии и исследования материалов был в числе первых в составе нашего университета с момента его создания. Научными школами металлургов ведутся глубокие исследования свойств материалов для электронной и металлургической промышленности, а также выполняются передовые научно-технологические разработки в области нанотехнологий, сварки, лазерной техники. На факультете при содействии Баварского лазерного центра и Университета Эрлангена — Нюренберга (Германия) создан и действует Российско-Германский лазерный центр. Ученые факультета являются членами следующих международных научных организаций:

Европейского союза инженеров-металлургов (его действительный член — ректор СПбГПУ профессор член-корреспондент РАН Андрей Иванович Рудской);

Международного института сварки (декан факультета технологии и исследования материалов профессор д.т.н Глеб Андреевич Туричин);

Всемирного лазерного общества (WLT) (декан факультета Технологии и исследования материалов профессор д.т.н Глеб Андреевич Туричин);

Европейской лазерной академии ELA — European Laser Academy, Австрия (декан факультета технологии и исследования материалов профессор д.т.н Глеб Андреевич Туричин);

Европейской ассоциации исследователей процессов химического осаждения из газовой фазы — EuroCVD Chemical Vapor Deposition (заведующий кафедрой физической химии, микро- и нанотехнологий факультета технологии и исследования материалов профессор д.х.н. Сергей Евгеньевич Александров);

Общества металлообрабатывающих технологий — TMS Technology Metals Society, США (заведующий кафедрой сталей и сплавов факультета технологии и исследования материалов профессор д.т.н. Александр Анатольевич Казаков);

Американскоого общества нанотехнологий — American Nano Society (профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий факультета технологии и исследования материалов д.х.н, Дмитрий Кириллович Таганцев).

Международные организации в области электроники, вычислительной техники, акустики

Одним из мировых лидеров в области разработки стандартов по радиоэлектронике и электротехнике является международная ассоциация специалистов — **Институт инженеров электриков и электронщиков** — Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Эта общественная некоммерческая ассоциация профессионалов появилась в 1963 году и в настоящий момент объединяет более 400 тысяч индивидуальных членов из 170 стран, в том числе более 100 тысяч студентов, издает третью часть мировой технической литературы, касающейся применения радиоэлектроники, компьютеров, систем управления, электротехники, 122 реферируемых научных журнала и 36 отраслевых журналов для специалистов, проводит в год более 300 крупных конференций, принимала участие в разработке около 900 действующих стандартов. Главная цель IEEE — информационная и материальная поддержка специалистов для организации и развития научной деятельности в электротехнике, электронике, компьютерной технике и информатике, приложение их результатов для пользы общества, а также профессиональный рост чле-

нов IEEE. Политехнический университет в ассоциации представляют:

академик Жорес Иванович Алфёров, декан факультета физики и нанотехнологий;

профессор д.т.н. Александр Станиславович Коротков, заведующий кафедрой прикладной физики и оптики твердого тела;

радиофизический факультет — в качестве старшего члена общества (IEEE Senior member) и председателя отделения общества по направлению «Радиотехнические устройства и системы» в Северо-Западном регионе РФ;

профессор кафедры электрических систем и сетей электромеханического факультета д.т.н. Георгий Анатольевич Евдокунин;

доцент кафедры электрических систем и сетей электромеханического факультета д.т.н. Андрей Николаевич Беляев;

профессор кафедры электрических систем и сетей электромеханического факультета к.т.н. Владимир Иванович Галанов (входил до последних дней жизни, 2012);

профессор кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики к.т.н Всеволод Павлович Котляров (действительный член, участие в конференциях и выборах руководства);

профессор кафедры распределенных информационных систем Института международных образовательных программ д.т.н Татьяна Альбертовна Гаврилова (член программного комитета конференций, рецензент статей).

Ассоциация вычислительной техники — ACM, США (профессор кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики к.т.н. Всеволод Павлович Котляров — действительный член).

Международный институт акустики и вибрации. Восточно-европейская ассоциация акустиков (доцент кафедры распределенных интеллектуальных систем Института международных образовательных программ к.т.н. Вячеслав Витальевич Потехин — член программного комитета конференций).

Международная академия информатизации (профессор кафедры распределенных интеллектуальных систем Института международных образовательных программ Виктор Владимирович Кучинский — член программного комитета конференций).

Международные общества в области гуманитарных наук

На факультетах университета в области гуманитарных наук преподают и ведут интенсивную научную работу высококвалифицированные ученые и специалисты, имеющие активные контакты в рамках следующих международных ассоциаций:

Международной ассоциации прикладной лингвистики (США); **Европейской ассоциации компьютерной лингводидактики**; (профессор д.п.н. Мария Алексеевна Акопова, заведующий кафедрой прикладной лингвистики, декан факультета иностранных языков; профессор д.п.н Надежда Ивановна Алмазова, заведующий кафедрой лингвистики и межкультурной коммуникации факультета иностранных языков; доценты кафедры прикладной лингвистики факультета иностранных языков кандидаты педагогических наук Фатима Ивановна Валиева, Людмила Григорьевна Жук, Наталья Игоревна Наказнюк, Наталья Геннадьевна Ольховик, Лариса Игоревна Печинская, Наталья Геннадьевна Ферсман);

Международной ассоциации преподавателей английского языка как иностранного — International Association of Teachers of English as a Foreign Language (IATEFL) (заведующая кафедрой английского языка №1 факультета иностранных языков доцент к.п.н. Татьяна Николаевна Крепкая);

Европейской ассоциации по исследованиям в области образования и педагогики — European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI) и **Европейской ассоциации исследователей-практиков в области педагогического мастерства European** — Association for Practitioner Researcher on Improving Learning (EAPRIL) (профессор факультета иностранных языков кафедры прикладной лингвистики, зам. декана по науке к. фил. наук Ольга Григорьевна Ветрова);

Американской ассоциации психологов (доцент кафедры прикладной лингвистики факультета иностранных языков к.п.н. Фатима Ивановна Валиева).

Персональное членство в международных и национальных академических сообществах

Приведем примеры наиболее обширных и активных персональных контактов и участия

политехников в международных академических сообщества.

Андрей Иванович Рудской, член-кор. РАН, профессор, д.т.н., ректор СПбГПУ:

почетный доктор Университета Лейбница (Ганновер, Германия);

приглашенный консультант научно-исследовательского института Макса Планка (Германия);

почетный доктор Честоховского университета технологий (Польша);

Юрий Сергеевич Васильев, академик РАН, профессор, д.т.н., президент СПбГПУ:

почетный доктор национального технического университета Украины — Киевского политехнического института;

Михаил Петрович Федоров, академик РАН, профессор, д.т.н., научный руководитель Программы развития Национального исследовательского университета:

почетный доктор Сити-университета Лондона (Великобритания);

почетный доктор высшей политехнической школы Эквадора;

почетный доктор Университета Ляйбница (Ганновер, Германия).

Жорес Иванович Алферов, академик РАН, лауреат Нобелевской премии по физике, профессор, д.т.н., декан факультета физики и нанотехнологий:

иностранный член Азербайджанской национальной академии наук;

почетный член Национальной академии наук Республики Армения;

действительный иностранный член Белорусской национальной академии наук;

действительный иностранный член Болгарской академии наук;

действительный иностранный член Инженерной академии Испании;

действительный член Национальной академии наук Италии;

иностранный член Национальной академиинаук Казахстана,

действительный член национальной инженерной академии Республики Казахстан;

иностранный член Китайской академии наук;

иностранный член Национальной академии наук Литвы;

почетный иностранный член Академии науки и технологии Кореи;

член Монгольской академии наук;

почетный иностранный член Национальной академии наук Молдовы;

иностранный член Польской академии наук;

иностранный член Национальной академии наук Украины;

академик Академия наук Кубы;

иностранный член Национальной академии наук США;

иностранный член Национальной инженерной академии США;

почетный иностранный член Американского оптического общества;

почетный член Общества физики и технологии полупроводников, Пакистан;

почетный член Института физики Сингапура;

пожизненный член Франклиновского института США;

почетный доктор наук Японского передового института науки и технологии;

почетный доктор Белорусского национального университета;

почетный доктор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;

почетный доктор Витебского государственного технологического университета, Беларусь,

почетный доктор Гродненского университета им. Янки Купалы, Беларусь;

почетный доктор Университета Пловдива, Болгария;

почетный доктор Университета Сейнт-Эндрю, Великобритания;

почетный доктор Университета Данди, Великобритания;

почтенный профессор Университета Сан-Кристобаль, Венесуэла;

почетный доктор Берлинского технического университета, Германия;

почетный доктор Батумского технического университета, Грузия;

почетный доктор Мадридского политехнического университета, Испания;

почетный профессор Университета Нанджина, Китайская Народная Республика;

почетный профессор Пекинского университета почты и телекоммуникаций, Китайская Народная Республика;

почетный профессор Института полупроводников Академии наук Китайской Народной Республики;

почетный советник Центра культурных исследований и обменов между Китаем и Россией Университета Цинхуа, Китайская Народная Республика;

профессор Университета Конкук, Корея;

почетный доктор Гаванского университета, Куба;

почетный доктор Университета Альфа БК, Сербия;

почетный доктор Национального инженерного университета, Перу;

почетный доктор Педагогического института Сан Маруос, Перу;

почетный доктор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»;

почетный доктор Таврического университета, Украина;

почетный доктор Донецкого национального университета, Украина;

почетный доктор Киевского Национального университета им. Тараса Шевченко, Украина;

почетный доктор Университета Турку, Финляндия;

почетный доктор Университета Оулу, Финляндия;

почетный доктор Университета технологий Тампере, Финляндия;

почетный доктор Национального института прикладных наук, Тулуза, Франция.

Дмитрий Германович Арсеньев, профессор, д.т.н., проректор СПбГПУ по международной деятельности:

почетный приглашенный профессор Сити-университета Лондона, Великобритания.

Леонид Евгеньевич Воробьев, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники радиофизического факультета:

Европейская академия наук и искусств, Австрия (European Academy of Sciences and Arts, Salzburg, Austria).

Дмитрий Васильевич Куприянов, д.т.н., профессор физико-механического факультета, заведующий кафедрой теоретической физики:

адьюнкт-профессор Университета Олд Доминион, Вирджиния, США.

Анатолий Анатольевич Попович, д.т.н., профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов факультета технологий и исследования материалов:

действительный член международной академии Сан-Марино;

действительный член Нью-Йоркской академии ученых, США.

Николай Николаевич Ролле, д.т.н., профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии инженерно-строительного факультета:

координатор программ Организации сотрудничества университетов — стран Балтийского региона.

Иосиф Львович Туккель, д.т.н., профессор, декан факультета инноватики:

почетный доктор Лаппеенрантского университета технологий, Финляндия.

Национальный исследовательский университет «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» — один из ведущих технических вузов России. СПбГПУ является базовым образовательным учреждением в системе высшего профессионального образования Российской Федерации и находится под научно-методическим руководством Российской академии наук. Эта роль исторически обусловлена созданием и развитием на базе СПбГПУ ведущих научных школ и системы высшего образования, соответствующих международным стандартам. Интеллектуальная элита нашего университета выступает проводником идей и задач научных школ СПбГПУ путем активного участия в деятельности международных научных организаций и ассоциаций.

В статье приведены только текущие данные по членству ученых университета в международных ассоциациях, основанные на систематизации информации, предоставленной факультетами и научными подразделениями университета. Автор выражает благодарность всем сотрудникам университета, оказавшим содействие в получении информации, а также был бы признателен за получение дополнительных сведений, отражающих этот важный аспект деятельности ученых СПбГПУ.

В заключение хотелось бы пожелать нашим молодым ученым смелее включаться в международную деятельность, налаживать прямые

контакты со своими коллегами из зарубежных университетов и научных центров, принимать участие в международных конференциях, играть активную роль в реализации международных проектов, смело использовать потенциал политехников для поднятия престижа российского политехнического образования, выступать проводниками идей нашего университета в международных научных и общественных ассоциациях и организациях.

УДК 620.92: 620.9:662.62

М.С. Басс, С.Г. Батухтин, К.А. Кубряков

ГОДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Чтобы оценить эффективность использования тепловой энергии, необходимо рассматривать как весь комплекс в совокупности (источник — тепловые сети — потребитель), так и его объекты по отдельности. Каждый объект данного комплекса имеет свой потенциал энергосбережения, и эффективность его работы влияет на остальные составляющие комплекса.

Существуют два основных источника централизованного теплоснабжения — водогрейные котельные и ТЭС.

Тепловые электрические станции представляют собой достаточно совершенное производство, отвечающее технологическому уровню их постройки. К настоящему времени большинство станций морально и физически устарели и требуют серьезной модернизации или введения новых мощностей. Но сложная экономическая ситуация в России, в том числе недостаток свободных финансовых средств, вызывает необходимость изыскивать малозатратные методы повышения эффективности работы ТЭС. Из них следует выделить оптимизацию тепловых потоков и модернизацию вспомогательного оборудования. Данные мероприятия при достаточно низких сроках окупаемости имеют менее значительный эффект в комплексе источник — сеть — потребитель из-за своей изначально высокой эффективности работы [1, 2].

Наиболее сложная ситуация сложилась на угольных котельных, особенно находящихся на балансе муниципальных образований. На объектах зачастую отсутствует достоверная информация о типах котлов, их паспортных характеристиках, особенно о фактическом состоянии оборудования, данные о котором можно получить только после режимных испытаний. Стоимость режимных испытаний достаточно велика, хотя без них невозможно оценить реальное состояние как котлоагрегатов, так и всей котельной в целом, и предложить конкретные действия по повышению эффективности их работы.

Кроме источника тепловой энергии и потребителя неотъемлемой частью данного комплекса являются тепловые сети, эффективность работы которых очень важна. Произведя тепловую энергию на котельной, ТЭС или другом источнике, нужно с как можно меньшими затратами доставить ее до потребителя.

Меры, определяющие эффективность работы тепловых сетей, можно разделить на три составляющие [3]:

приведение в оответствие гидравлических потерь расчетным значениям;

снижение утечек сетевой воды;

снижение тепловых потерь через изоляцию и арматуру.

Повышение КПД только на источнике — недостаточная мера, так как значительная часть выработанной тепловой энергии расходуется неэффективно во внешнем контуре потребителей (разрегулированность тепловых сетей, состояние теплотрасс и режимы их эксплуатации, завышенные удельные затраты на отопление зданий и т. п.). Потенциал энергосбережения на системах транспорта и потребления составляет 75–80 %, остальное приходится на источники теплоснабжения [4].

Для нормализации работы тепловых сетей необходимо вначале произвести расчет гидравлических потерь и сравнить с фактическими значениями путем проведения гидравлических испытаний, а затем привести тепловую сеть в соответствие расчетному варианту с помощью режимно-наладочных и реконструкционных работ. Разрегулировка тепловой сети приводит к росту затрат на перекачку сетевой воды, а также к не-

возможности обеспечить договорные условия теплоснабжения ряду потребителей.

Утечки сетевой воды в закрытых системах теплоснабжения в норме не должны превышать 0,75 % от фактического объема воды в трубопроводах тепловых сетей и в присоединенных к ним системах теплопотребления зданий. Повышенные утечки сетевой воды означают прямые потери тепла и необходимость дополнительной подпитки тепловой сети.

Одним из факторов, определяющих эффективность работы тепловых сетей, является состояние ее тепловой изоляции. В советское время существовала плановая замена как самих трубопроводов, так и изоляции, но после развала СССР эти мероприятия практически не выполнялись. Один из основных способов улучшения ситуации на существующих тепловых сетях — восстановление или замена изоляции. Для технико-экономической оценки эффективности мероприятий по замене тепловой изоляции необходима адекватная методика оценки затрат. Наиболее точно данную методику можно создать для конкретного региона, имеющего свои климатические, технологические особенности. Важная задача — не только оценка реального состояния, но и определение оптимального типа и экономически обоснованной толщины тепловой изоляции.

Наиболее сложен во всем этом учет влияния энергоэффективности производства и распределения тепловой энергии на тариф, так как на его формирование влияют не только экономические факторы, но и политические и административные решения. Тарифы в конечном итоге косвенно влияют на технико-экономические показатели производителя тепловой энергии и на затраты потребителей.

Относительная годовая температура

Введем понятие относительной годовой температуры, определяя ее как

$$dt_i = \frac{t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}}{\sum S_i}, \qquad (1)$$

где $S_i = t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}$, $t_{\text{н}i\,\text{мес}}$ — среднемесячное значение температуры наружного воздуха, $t_{\text{н}\max}$ — максимальное среднемесячное значение температуры наружного воздуха в году.

Поскольку в летний период отсутствует отопительная нагрузка, а в мае и сентябре системы теплоснабжения в Забайкальском крае работают в среднем по полмесяца, более точно относительную температуру во время отопительного сезона для оценки работы систем теплоснабжения можно получить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} S_i = t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}, \tau \in [\tau_{\text{о}}, \tau_{\text{от1}}); \\ S_i = \dfrac{t_{\text{н5мес}} - t_{\text{н}\max}}{2}, \tau \in [\tau_{\text{от1}}, \tau_{\text{в}}); \\ S_i = 0, \tau \in [\tau_{\text{в}}, \tau_{\text{л}}); \\ S_i = \dfrac{t_{\text{н9мес}} - t_{\text{н}\max}}{2}, \tau \in [\tau_{\text{л}}, \tau_{\text{от2}}); \\ S_i = t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}, \tau \in [\tau_{\text{от2}}, \tau_{\text{к}}), \end{cases} \qquad (2)$$

где $\tau \in [\tau_{\text{о}}, \tau_{\text{от1}})$, $\tau \in [\tau_{\text{от2}}, \tau_{\text{к}})$ — часть отопительного сезона, в котором осуществляется отопление в течение всего месяца; $\tau \in [\tau_{\text{от1}}, \tau_{\text{в}})$, $\tau \in [\tau_{\text{л}}, \tau_{\text{от2}})$ — период, в котором осуществляется отопление в течение части месяца; $\tau \in [\tau_{\text{в}}, \tau_{\text{л}})$ — период, в течение которого отопление отсутствует.

Для Забайкальского края при расчетах в часах: $\tau_{\text{о}} = 0$, $\tau_{\text{от1}} = 2880$, $\tau_{\text{в}} = 3624$, $\tau_{\text{л}} = 5832$, $\tau_{\text{от2}} = 6552$, $\tau_{\text{к}} = 8760$.

При расчете в месяцах из этой системы уравнений можно получить значения относительных температур за отопительный период в следующем виде:

$$dt_i = \frac{t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}}{B}, \qquad (3)$$

$$B = \sum_{i=0}^{4} (t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}) + \frac{t_{\text{н5мес}} - t_{\text{н}\max}}{2} +$$

$$+ \frac{t_{\text{н9мес}} - t_{\text{н}\max}}{2} + \sum_{i=10}^{12} (t_{\text{н}i\,\text{мес}} - t_{\text{н}\max}).$$

Формула отражает идеальный вариант отпуска и потребления тепла. При обеспечении заданной внутренней температуры количество теплоты зависит от температуры наружного воздуха, а относительная температура за отопительный период представляет собой изменение в течение отопительного периода.

Идеальный вариант — это когда источник отпускает, сеть передает, а потребитель исполь-

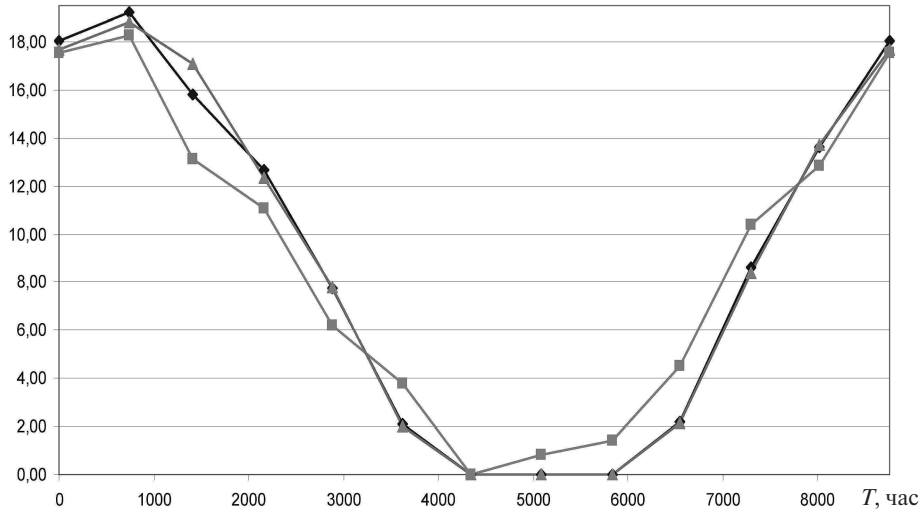


Рис. 1. Фактические значения относительного годового потребления жилых зданий (◆ — здание; ■ — дом; ▲ — tн СНиП)

зует то тепло, которое ему необходимо, с учетом потерь в каждом элементе системы. На практике такое возможно лишь при полной автоматизации процесса теплоснабжения как на источнике, так и у потребителя. Реально же на тепловых электрических станциях и котельных осуществляется в большинстве случаев качественное и количественно-качественное регулирование, на центральных тепловых пунктах — количественное, а у большинства потребителей отсутствует даже простейшая автоматика, что приводит к «недотопам» и «перетопам» в течение отопительного сезона и к рассогласованию между различными объектами самой тепловой сети.

Соответствие функциональной зависимости реальным данным проиллюстрировано на графиках, представленных на рис. 1, 2. Зависимости различаются значениями коэффициентов, и при отсутствии статистических данных по объектам можно в первом приближении использовать эти зависимости для определения потребления (или отпуска) тепла как в любой момент времени, так

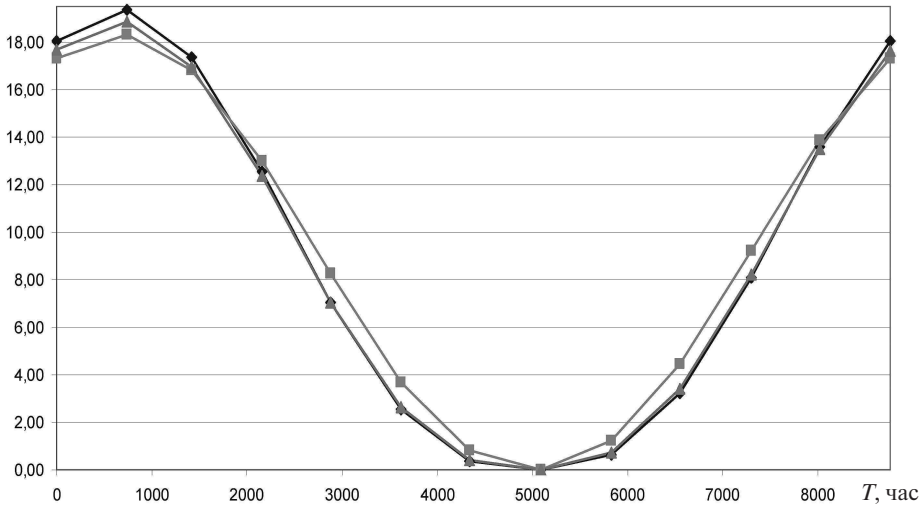


Рис. 2. Функциональные значения относительного годового потребления жилых зданий (◆ — здание; ■ — дом; ▲ — $t_н$ СНиП)

и за любой период, в том числе за год. Кроме того, имея прогнозы по значениям температур, данные зависимости легко корректируются, и можно на их основе прогнозировать поведение системы теплоснабжения в долгосрочной перспективе.

Расчетная функция имеет вид

$$dt = \left[\cos\left(\frac{\tau - \tau_{\max}}{T}2\pi\right)+1\right]^a \frac{dt_{\max}}{2b}, \qquad (4)$$

где $\tau_{\max}$ — момент времени, к которому достигается наибольшая относительная температура ∂t_i ; T — продолжительность года; a, b — эмпирические коэффициенты.

Относительная тепловая годовая характеристика

$$\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}} = \left[\cos\left(\frac{\tau - \tau_{\max}}{T}2\pi\right)+1\right]^a \frac{Q_{\max}}{2bQ_{\text{год}}} + q_{\text{ГВС}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\max}$ — момент времени, к которому достигается наибольшая нагрузка котельной $Q_{\max}$; T — продолжительность года; $q_{\text{ГВС}}$ — доля выработанной теплоты, идущей на горячее водоснабжение; a и b — эмпирические коэффициенты.

Доля нагрузки на ГВС — $q_{\text{ГВС}}$ — принята постоянной в течение года и равной минимальной нагрузке, соответствующей июню. Ее исключают из общего теплового баланса, вычитая из ежемесячной нагрузки минимальную. В случае, когда неизвестны величины отпуска тепла с котельной по месяцам, но известны доли потребления, $q_{\text{ГВС}}$ исключают из общего теплового баланса следующим образом:

$$\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)^i_{\text{без ГВС}} = \frac{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)^i - \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{год}}\right)_{\min}}{100 - 12\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\min}} 100 . \quad (6)$$

Определение тепловой нагрузки за месяц:

$$Q_{\text{мес}} = \frac{Q_{\text{мес max}}}{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\text{мах}}} \left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right), \qquad (7)$$

где $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\text{мах}}$ — максимальное значение относительной тепловой годовой характеристики; $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)$ — значение относительной тепловой годовой характеристики для данного периода; $Q_{\text{мес max}}$ — максимальная тепловая нагрузка объекта.

При наличии нагрузки ГВС следует добавить эту величину к ежемесячной нагрузке.

Таким образом, учитывая, что значения $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\max}$ и $\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)$ совпадают в самый холодный месяц, для определенного типа объектов достаточно знать его максимальную тепловую нагрузку, чтобы получить тепловое потребление любого объекта в любой момент времени в течение года.

Потребление за год определяется по формуле

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{мес max}}}{\left(\frac{Q_{\text{мес}}}{Q_{\text{год}}}\right)_{\max}}, \qquad .(8)$$

т. е. данные зависимости показывают долю тепла от всего годового потребления, приходящуюся на данный момент.

На рис. 1 и 2 «Здание» — означает расчетные значения относительных нагрузок по вышеизложенной методике; «Дом» — относительные нагрузки «реального» здания; «$t_{\text{н}}$ СНиП» — относительная температура согласно СНиП (Чита) за отопительный период. Из графиков видно, что практически на всем диапазоне относительных нагрузок расчетные значения соответствуют относительной температуре. Иначе говоря, расчет любого здания можно выполнять как по первому, так и по второму случаю.

На рис. 3 «Уг. к.» — означает относительные нагрузки для угольных котельных, «Уг. к. без ГВС» — относительные нагрузки для угольных котельных без ГВС, «$t_{\text{н}}$ СНиП» — относительная температура согласно СНиП (Чита) за отопительный период. Из графиков видно, что практически на всем диапазоне относительные нагрузки практически соответствуют относительной температуре согласно СНиП (Чита) за отопительный период. Таким образом, любую котельную можно определять либо индивидуально в зависимости от типа отпускаемой нагрузки с котельной, либо по относительной температуре согласно СНиП.

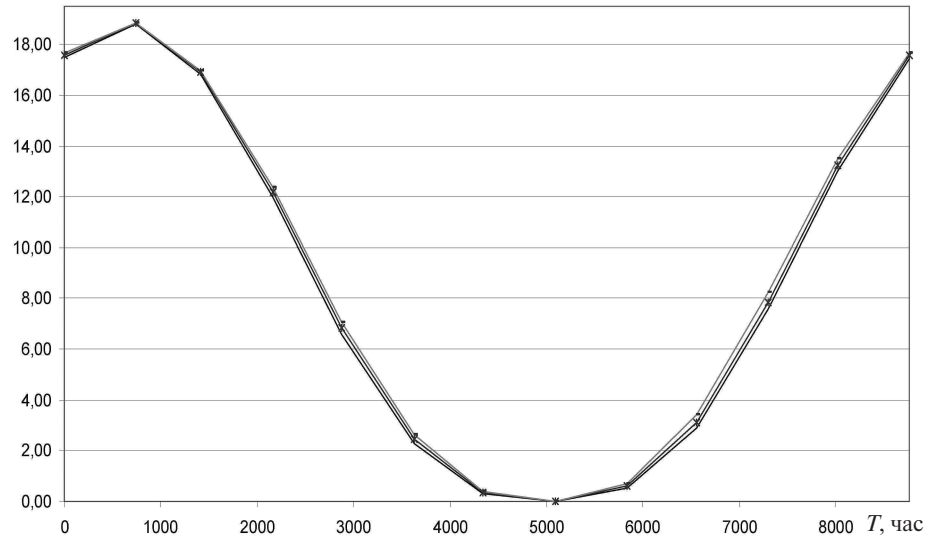


Рис. 3. Относительный годовой отпуск от котельных
(— — Уг. к.; — Уг. к. без ГВС; — $dt_н$ СНИП1

Относительный годовой отпуск тепла от угольных котельных

На рис. 4 представлена функциональная зависимость $\frac{Q_{мес}}{Q_{год}} = f(\tau)$ для угольных котельных и средневзвешенная зависимость [5].

Зависимость теплоты от времени для любой угольной котельной можно описать следующей формулой:

$$\frac{Q_{мес}}{Q_{год}} = \left[\cos^a\left(\frac{\tau - \tau_{max}}{T}2\pi\right) + 1\right]\frac{Q_{max}}{2b} + q_{ГВС}, \quad (9)$$

где τ_{max} — момент времени, к которому достигается наибольшая нагрузка котельной Q_{max}; T — продолжительность года; $q_{гвс}$ — доля выработанной теплоты, идущей на горячее водоснабжение; a и b — эмпирические коэффициенты.

Достаточная точность достигается при a = =3/2 и b = 1,35.

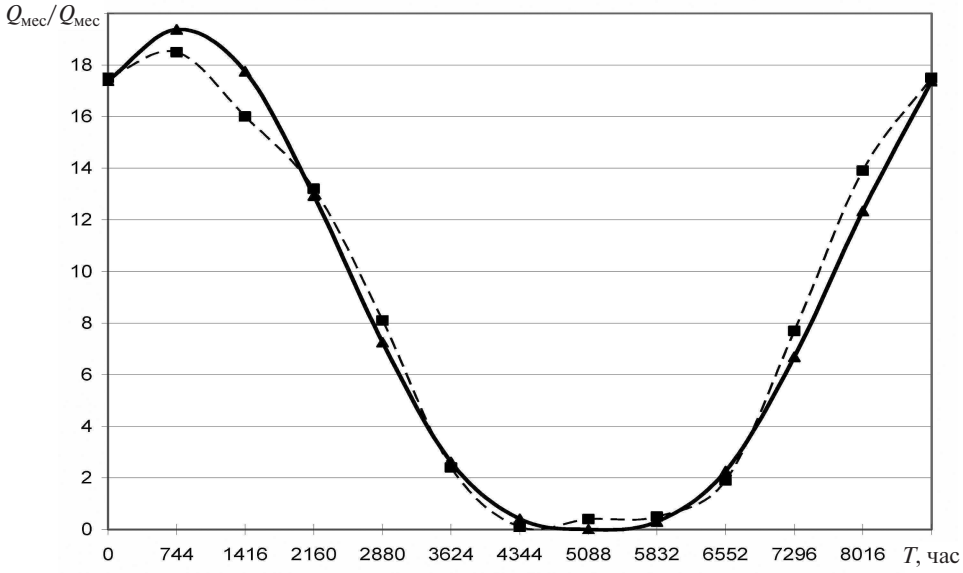


Рис. 4. Относительный годовой отпуск тепла от угольных котельных
(– ■ – — усредненная линия по котельным; — ▲ — функциональная зависимость)

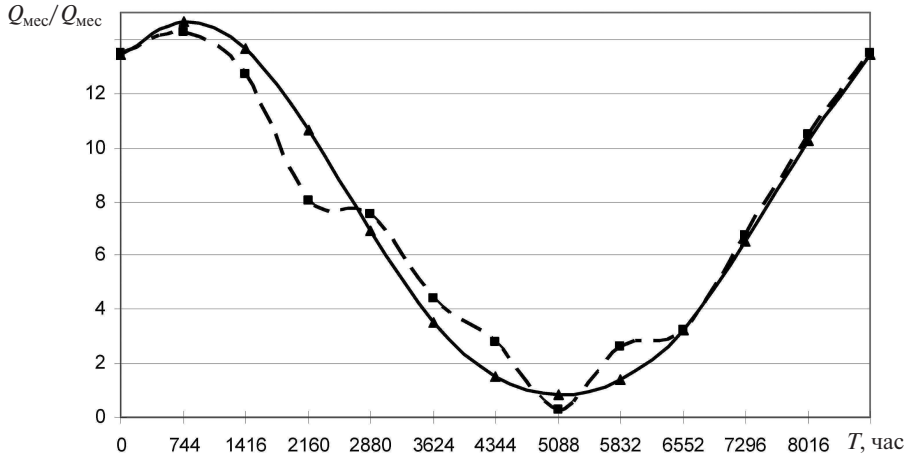


Рис. 5. Зависимость относительной тепловой нагрузки в течение года
(– ■ – — фактическая зависимость; —▲— — расчетная зависимость)

Размерность времени может быть любая — месяцы, дни, часы.

Относительный годовой отпуск тепла от мазутных котельных

На рис. 5 представлена фактическая зависимость $\frac{Q_{мес}}{Q_{год}} = f(\tau)$ мазутных котельных и расчетная зависимость.

Зависимость теплоты от времени для любой котельной можно описать следующей формулой:

$$\frac{Q_{мес}}{Q_{год}} = \left[\cos^a\left(\frac{\tau - \tau_{max}}{T}2\pi\right) + 1\right]\frac{Q_{max}}{2bQ_{год}} + q_{ГВС}, \quad (10)$$

где τ_{max} — момент времени, к которому достигается наибольшая нагрузка котельной Q_{max}; T — продолжительность года; $q_{ГВС}$ — доля выработанной теплоты, идущей на горячее водоснабжение; a и b — эмпирические коэффициенты.

Достаточная точность достигается при a = = 1,4 и b = 1,47.

Размерность времени может быть любой.

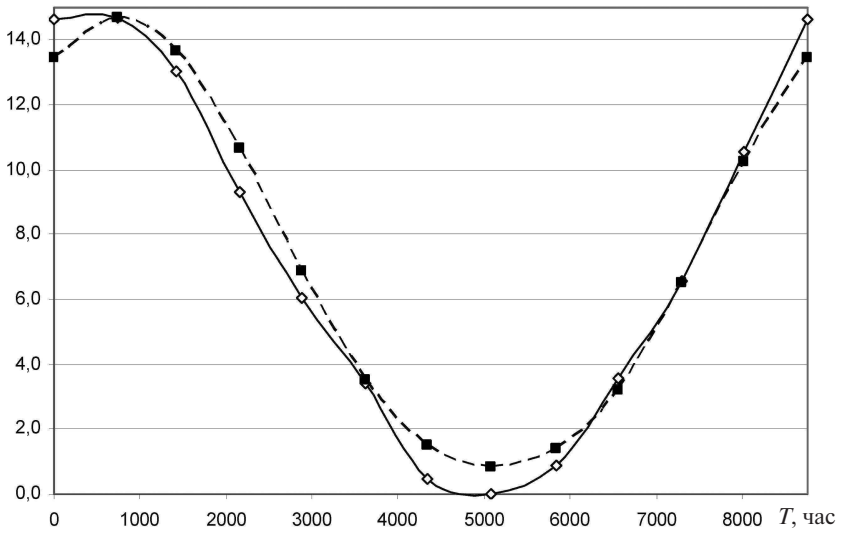


Рис. 6. График изменения температуры наружного воздуха и расчетной нагрузки в течение года начиная с января
(—◇— — относительная температура; – ■ – — мазут)

На рис. 6 отображены значения приведенной температуры наружного воздуха и расчетных значений нагрузок в течение года. Из них следует, что распределение нагрузок в течение года практически полностью соответствует изменению температуры воздуха; небольшие расхождения в летние месяцы связаны с наличием небольшой доли тепла, идущего на нужды горячего водоснабжения, которая практически не зависит от температуры окружающего воздуха. При отсутствии нагрузки горячего водоснабжения характеристика изменения отпуска тепловой энергии от котельной с высокой точностью совпадает с зависимостью изменения температуры наружного воздуха в течение года.

Исследования проведены в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук в области знания «Технические и инженерные науки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Goryachikh, N.V.** Some Methods for Making Cogeneration Stations More Maneuverable [Текст] / N.V. Goryachikh, A.G. Batukhtin, S.A. Ivanov // Thermal Engineering.— 2010.— Vol. 57, №10.

2. **Батухтин, А.Г.** Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ на основе математического моделирования с учетом функционирования различных типов потребителей [Текст]: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.Г. Батухтин / Восточно-Сибирский ГТУ.— Улан-Удэ, 2005

3. **Басс, М.С.** Комплексный подход к оптимизации функционирования современных систем теплоснабжения [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин // Теплоэнергетика.— 2011. № 8.

4. **Басс, М.С.** Технико-экономическая оценка внедрения энергосберегающих проектов (на примере Забайкальского края) [Текст] / М.С. Басс // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 123.

5. **Басс, М.С.** Упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива в отопительных котельных применительно к условиям Забайкальского края [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских // Промышленная энергетика.— 2009. № 9.

УДК 621.1

А.Г. Батухтин, В.В. Пинигин, М.В. Кобылкин

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Высокая энергоемкость экономики России по сравнению с ведущими западными странами определяет особенности курса развития энергетики и ЖКХ страны в направлении энергосбережения. Положения энергетической стратегии России на период до 2030 года формулируют задачу максимально эффективного использования природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики и повышения качества жизни населения страны.

Увеличение тепловой нагрузки современных систем централизованного теплоснабжения определяется присоединением новых потребителей. По информации ФСГС РФ в среднем за последние 5 лет в России было возведено около 410 млн м^3 строительных объектов при прогнозе роста не менее чем на 10 % в год. Кроме того, в ряде населенных пунктов производится перевод тепловой нагрузки районных котельных на ТЭЦ. При этом увеличение нагрузки не учитывается в действующих графиках отпуска тепла от источников теплоснабжения, которые, как правило, не пересчитывались еще с 90-х годов. Современные градостроительные планы требуют технико-экономического и эксергетического обоснования. Существующие методы оценки эффективности функционирования и развития систем можно разделить на энергетические, эксергетические и технико-экономические. Все они

имеют ряд недостатков, обусловленных отсутствием учета особенностей новых технологий, применяемых в теплоснабжении.

Прогрессирующее развитие техники, в том числе электроники, способствовало развитию сложных систем автоматического регулирования. Они обладают рядом преимуществ, которых было затруднительно добиться ранее, в период становления централизованного теплоснабжения. При этом графики центрального качественного регулирования не учитывают особенности потребителей, имеющих САР, притом что практически все вновь вводимые здания оборудуются данными системами. Кроме того, их высокая энергоэффективность стимулирует к переводу на них существующих зданий.

В настоящее время некоторые установки традиционной и возобновляемой энергетики близки по уровню их стоимости. Подорожание установок традиционной энергетики стало следствием ужесточения требований по экологии. В свою очередь, развитие техники и технологий привело к снижению стоимости установок возобновляемой энергетики. В РФ программа «Экологически чистая энергетика» предусматривает развитие систем солнечного отопления и горячего водоснабжения для индивидуальных жилых домов, сельскохозяйственных, курортных и некоторых производственных объектов и жилых зданий (направление — солнечное теплоснабжение). Необходимо отметить, что и использование солнечной энергии имеет свои особенности. Технико-экономические характеристики гелиоустановок зависят главным образом от следующих факторов: природно-климатических условий данной местности, определяющих количество вырабатываемой энергии (уровень солнечной радиации, облачность, количество солнечных дней в году и т. д.); удельных капиталовложений в гелиоустановку; наличия и стоимости топлива и энергии. Малая плотность распределения солнечной энергии по территории, непостоянство поступления энергии во времени, зависимость от природно-климатических условий предопределяют увеличение размеров гелиоустановок и усложнение их конструкций, что в свою очередь вызывает повышение удельных капиталовложений и расхода материалов на сооружение гелиоустановок.

Анализ эксплуатации теплонасосных установок в России показал, что из-за большей продолжительности отопительного сезона по сравнению с западными странами технико-экономическая эффективность их использования в России выше. Внедрение в систему централизованного теплоснабжения установок тепловых насосов, потребляющих, как правило, электрическую энергию и работающих по холодильному циклу, предъявляет особые требования к оценке комплексной термодинамической эффективности.

Основная задача оценки энергетических балансов любых технических систем — определение эффективности использования затраченной в них энергии. Основным критерием данной оценки служит коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение полезной энергии к затраченной. Данный показатель рассчитывается только на основе первого закона термодинамики. Поскольку существующим энергетическим системам присущи процессы, характеризующиеся изменением энтропии системы, то для их оценки необходимо комплексное рассмотрение энергетической и энтропийной эффективности. Наряду с эксергетическим анализом для учета необратимости и неравномерности процессов возможно использование понятия негэнтропии. Фундаментальный смысл второго начала термодинамики заключается в том, что самопроизвольный поток энергии в термодинамической системе направлен от большей плотности энергии к меньшей, к примеру тепловой поток движется от большей температуры к меньшей. Поскольку любой подобный поток необратим, должна существовать некоторая монотонная функция состояния, либо всегда возрастающая либо всегда убывающая. Эта функция и есть энтропия. Максимальное значение энтропии при прочих равных условиях достигается при простом рассеивании высокопотенциальной энергии в низкопотенциальную окружающую среду. Производство энтропии будет меньше, если в процессе данного рассеивания часть тепловой энергии преобразовывается в иные формы, например механическую или химическую, либо плотность тепловой энергии локально поддерживается на уровне, превышающем уровень плотности энергии окружающей среды. Поэтому предлагается разность изменения максимально возможной и изменения данной энтропии отождествить с изменением негэнтропии:

$$dN = dS_{\max} - dS\,.$$

Тогда энтропийную эффективность теплофизического процесса можно записать так:

$$\eta = \frac{dN}{dS_{\max}} = 1 - \frac{dS}{dS_{\max}}\,.$$

Примерами энтропийной эффективности теплофизического процесса могут быть [1]:

энтропийная эффективность отапливаемого помещения $\eta_Q = 1 - \dfrac{\dfrac{dS_{\text{б}}}{d\tau} + \dfrac{dS_{\text{ст}}}{d\tau}}{\dfrac{dS_{\max}}{d\tau}}$, или $\eta_Q = \dfrac{1}{1 + \dfrac{R_{\text{б}Q}}{R_{\text{ст}Q}}}$, если термические сопротивления не зависят от температуры;

энтропийная эффективность паровой турбины, совершающей работу, равна

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = \frac{\left(\dfrac{Q_1}{T_2} - \dfrac{Q_2}{T_2}\right)\dfrac{T_2}{Q_1}}{\left(-\dfrac{Q_1}{T_1} + \dfrac{Q_1}{T_2}\right)\dfrac{T_2}{Q_1}} = \frac{\dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}{\dfrac{T_1 - T_2}{T_1}} = \frac{1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}}{1 - \dfrac{T_2}{T_1}} = \frac{\eta_{\text{т}}}{\eta_{\text{тк}}};$$

энтропийная эффективность теплового насоса, потребляющего работу, составляет

$$\frac{\Delta N}{\Delta S_{\max}} = \frac{\left(\dfrac{Q_1}{T_2} - \dfrac{Q_1}{T_1}\right)\dfrac{T_2}{Q_1}}{\left(\dfrac{Q_1}{T_2} - \dfrac{Q_2}{T_2}\right)\dfrac{T_2}{Q_1}} = \frac{\dfrac{T_1 - T_2}{T_1}}{\dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1}} = \frac{\dfrac{Q_1}{Q_1 - Q_2}}{\dfrac{T_1}{T_1 - T_2}} = \frac{\xi_{\text{т}}}{\xi_{\text{тк}}}.$$

Для решения практических задач, в том числе при оценке методов повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения, определения только теоретической эффективности недостаточно. Для комплексной оценки эффективности модернизации сложных систем требуется определение экономической эффективности [2, 3]. Кроме того, применяемые экономические методы должны включать оценку изменения экологичности и надежности рассматриваемой системы. Поскольку режимные или конструктивные модернизации системы несут, помимо экономических, изменение показателей выбросов и надежности, то для сопоставимости необходим расчет компенсационных затрат на соответствующие способы. Поскольку рассматриваемый метод должен функционировать с максимальной экономической эффективностью, то необходима разработка методики оптимизации его режимов.

Поскольку максимальное экологическое загрязнение в рассматриваемой системе осуществляется энергетическими котлами в атмосферу, то в качестве примера рассмотрим способы очистки дымовых газов. Использование какого-либо конкретного способа снижения выбросов с дымовыми газами ТЭС, основанного на вводе в топку котла адсорбентов, вызывает несоответствие фактических характеристик углей нормативным, приводит к отклонению от заданных объемов продуктов сгорания и температуры на выходе из топки и, как следствие, к нарушению работы конвективной части котла, увеличению золового износа. Преднамеренный ввод в топку котельного агрегата адсорбентов, содержащих известь или соду, вызывает снижение температуры в ядре факела, перерасход топлива на поддержание заданной нагрузки котла, увеличение расхода электроэнергии на собственные нужды, обусловленное ростом объема дымовых газов и количества золы, и, как следствие, интенсивный эрозионный износ поверхностей нагрева. К тому же применение сухих технологий может приводить к изменению температуры плавления золы [4]. Поэтому применение данных технологий возможно при сжигании углей, зола которых имеет температуру размягчения 1300 °С и выше, поскольку способно вызывать повышенное шлакование поверхностей нагрева котла, снижая тем самым его надежность.

Поскольку в современных конструкциях котельных установок применяются различные схемы расположения горелок, компоновки поверхностей нагрева и схемы экранирования топочных камер, то в каждом из таких вариантов установок в большей мере негативному воздействию со стороны технологий, применяемых в процессе очистки дымовых газов, оказываются подверженными соответствующие элементы конструкции. Основное проявление негативного воздействия на надежность и безотказность работы элементов котла связано с эрозионным износом, интенсивность которого разная для различных методов очистки, а также возможным шлакованием поверхностей нагрева котла.

Эксплуатация котлов сопровождается сложными физическими и химическими процессами в пароводяном и газовоздушном трактах, в ме-

талле, из которого изготовлены элементы энергетического оборудования. Процессы горения, теплообмена, коррозии, образования отложений на поверхностях нагрева, изменения свойств и характеристик металла также в значительной мере определяют показатели надежности котлов. Поэтому выбор конкретной технологии зависит от условий, в которых планируется ее внедрение, и должен производиться на основе технико-экономического обоснования целесообразности применения того или иного мероприятия совместно с прогнозированием показателей надежности и безотказности работы оборудования.

В качестве одной из таких методик может служить методика технико-экономической оценки способов очистки дымовых газов ТЭС, основанная на критерии экономического минимума суммарных издержек, сопутствующих реализации способа:

$$\begin{cases} b_{opt} = \lim\limits_{И \to \min} f(И); \\ И = f(И_1) + f(И_2) + f(И_3) + f(И_4) + C, \end{cases}$$

где b_{opt} — оптимальный по условиям технико-экономической оценки относительный расход адсорбента (либо расход, соответствующий сопоставимости методов повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения); И — суммарные издержки метода, руб./год; $f(И_1)$ — расходы на топливо; $f(И_2)$ — затраты на адсорбент, подаваемый в опускную шахту котла; $f(И_3)$ — плата за выброс оксидов серы, которая зависит от расхода адсорбента; $f(И_4)$ — затраты на ремонт котла, связанные с изменением интенсивности абразивного износа труб поверхностей нагрева (перечисленные слагаемые суммарных издержек являются функцией от расхода адсорбента); C — эксплуатационные затраты.

Современным способом очистки дымовых газов ТЭС является способ, основанный на просыпке адсорбента в опускную шахту котельного агрегата.

За счет поглощения доли содержащихся в дымовых газах паров серной кислоты H_2SO_4 одновременно с уменьшением концентрации SO_2 и SO_3 в продуктах сгорания происходит снижение температуры точки росы дымовых газов. При этом становится возможной работа котельного агрегата с более глубоким охлаждением продуктов сгорания на выходе, что позволяет повысить надежность работы воздухоподогревателей (происходит снижение вероятной скорости коррозии в зоне температур 80–120 °С) [5]. Кроме того, понижение температуры точки росы дымовых газов в реальных условиях позволяет повысить экономичность котла по сравнению с работой в обычном режиме (без использования предлагаемой технологии).

Во время непрерывной подачи адсорбента в дымовые газы, образованные в послепламенной зоне и проходящие по опускной шахте котла, создаются оптимальные условия для адсорбента по поглощению вредных выбросов и достигается более продолжительный контакт адсорбента с продуктами сгорания. При этом не происходит снижения температуры дымовых газов на выходе из топки, следовательно, не нарушается номинальный (базовый) режим работы котла.

В условиях предлагаемого способа снижения вредных выбросов от топок с факельным сжиганием топлива возможно использование различных сухих адсорбентов, таких, как глиноземы, зола, природные цеолиты.

Природные цеолиты — один из распространенных ресурсов Забайкальского края. В районе сосредоточены значительные ресурсы цеолитового сырья (1,5 млрд т), обеспечивающие ему ведущее место в России, а также среди стран ближнего зарубежья и способные покрыть любые потребности по основным направлениям применения.

До последнего времени природные цеолиты применения в энергетике не находили. Между тем природные цеолиты обладают перед другими адсорбентами (зола, глиноземы, известь) тем преимуществом, что позволяют сорбировать целый ряд газовых компонентов (двуокись серы, оксиды азота, окись и двуокись углерода, сероводород, сероуглерод и другие [6]). К тому же природные цеолиты — это дешевое минеральное сырье при достаточно больших разведанных запасах на территории страны. Шивыртуйское месторождение — самое исследованное по составу и наиболее интенсивно используемое. Оно расположено в пределах Забайкальского края в 15 км севернее станции Даурия.

Предлагаемый способ очистки дымовых газов с помощью природных цеолитов основан на

непрерывной их подаче в дымовые газы, проходящие по опускной шахте котла, а также периодическом «обновлении» части сорбента с помощью устройств системы дробеструйной очистки поверхностей нагрева котла.

Эффективность способа зависит от расхода цеолита, подаваемого в конвективную шахту котла, и определяется по формуле

$$M_{SO_2} = \left(M^0_{SO_2} - M^{к}_{SO_2} \right) \times$$

$$\times \exp\left[-\left(\frac{b_c}{0,32 S^p} \right)^2 \right] + M^{к}_{SO_2},$$

где b_c — относительный расход природного цеолита, вводимого в конвективную шахту котла; S^p — процентное содержание серы в топливе, %; M_{SO_2} — уровень массового выброса SO_2, поддерживаемый применением способа, г/с; $M^{к}_{SO_2}$ — установившийся массовый выброс SO_2, когда дальнейшее увеличение подачи цеолита в конвективную шахту котла не дает заметного снижения оксидов серы, г/с; $M^0_{SO_2}$ — массовый выброс SO_2 при отсутствии подачи цеолитов в конвективную шахту котла, г/с.

Расходы $f(И_1)$ на топливо в данном случае могут быть определены по формуле

$$f(И_1) = B_p^{var} Ц_{топл},$$

где $B_p^{var} = f(b_c)$ — вариативный расход топлива, кг/с, изменяющийся в зависимости от относительного расхода цеолита; $Ц_{топл}$ — стоимость топлива, руб./кг.

При этом вариативный расход топлива может быть определен по формуле

$$B_p^{var} = \frac{Q_1 (1 - q_4)}{Q^p_н (\eta_0 + \Delta q_2)};$$

здесь Δq_2 — изменение (уменьшение) потерь теплоты с уходящими газами. Данная величина также является функцией от изменения температуры уходящих газов, зависящего от относительного расхода цеолита, подаваемого в конвективную шахту котла, то есть

$$\Delta t_{ух} = f(b_c) = \frac{201}{1,05^{4,19 \cdot a_{ун} \cdot A_п}} \times$$

$$\times \sqrt[3]{\frac{1}{Q^p_н} (S^p + S^p_к - (S^p - S^p_к) \exp\left[-\left(\frac{b_c}{0,289 S^p} \right)^2 \right]},$$

где S^p — процентное содержание серы в топливе, %; $S^p_к$ — содержание серы, соответствующее предельному массовому выбросу SO_2, когда дальнейшее увеличение подачи цеолита в конвективную шахту котла не дает заметного снижения оксидов серы, %; $a_{ун}$ — содержание золы в уносе; $A_п$ — приведенная зольность, %·кг/МДж.

Затраты $f(И_2)$ на цеолит, подаваемый в конвективную шахту котла, могут быть определены по формуле

$$f(И_2) = B_c Ц_{цеол} = 37,914 b_c^{1,35} Ц_{цеол};$$

здесь B_c — абсолютный расход цеолита, кг/с; $Ц_{цеол}$ — стоимость цеолита, руб./кг.

Плата $f(И_3)$ за выбросы оксидов серы, которая зависит от относительного расхода цеолита b_c, может быть определена с использованием выражения

$$f(И_3) = M_{SO_2} T_{экол},$$

где $M_{SO_2} = f(b_c)$ — массовый выброс серы, соответствующий расходу цеолита, г/с; $T_{экол}$ — тариф по уплате за выбросы оксидов серы.

Массовый выброс серы $M_{SO_2} = f(b_c)$ при этом можно определить, используя следующую зависимость:

$$M_{SO_2} = \left(M^0_{SO_2} - M^{к}_{SO_2} \right) \times$$

$$\times \exp\left[-\left(\frac{b_c}{0,32 S^p} \right)^2 \right] + M^{к}_{SO_2}.$$

Затраты $f(И_4)$ на ремонт котла, связанные с изменением интенсивности абразивного износа труб поверхностей нагрева, определяются в соответствии с теорией дисконтирования годовых затрат по зависимости

$$f(И_4) = \frac{З}{(1 + c)^{t-1}},$$

где t — время работы i-го элемента котельного агрегата до капитального ремонта в связи с абразивным износом, лет; З — затраты направленные на реализацию ремонтных мероприятий; c — банковский процент на капитал.

При этом время t работы i-го элемента котельного агрегата до капитального ремонта определяется по выражению

$$t = \frac{S_{\text{ф}} - S_{\text{р}}}{I_{\text{абр}}},$$

где $S_{\text{ф}}$ — фактическая (минимальная) толщина стенки рассматриваемого элемента, мм; $S_{\text{р}}$ — расчетная (исполнительная) толщина стенки рассматриваемого элемента, мм; $I_{\text{абр}}$ — интенсивность абразивного износа, мм/год.

Интенсивность абразивного износа является функцией от относительного расхода адсорбента, применяемого в цикле газоочистки:

$$I_{\text{из}} = amk_{\mu}\mu_{\text{зл}}\left(k_{\omega}\left(\omega_{\text{г}}^{0} + \Delta\omega_{\text{г}}(b_c)\right)\right)^{3}\left(\frac{S_1 - d}{S_1}\right)^{1,8}\tau,$$

где a — коэффициент абразивности золы, мм·с^3/(г·ч); m — показатель износоустойчивости труб, зависящий от химического состава стали; k_{μ} — коэффициент неравномерности концентрации золы в потоке; k_{ω} — коэффициент неравномерности скоростей газов в сечении; τ — время эксплуатации поверхности, ч; $\omega_{\text{г}}^{0}$ — скорость прохождения дымовых газов через рассматриваемый элемент котельного агрегата на номинальном режиме работы котла (без использования газоочистки); $\Delta\omega_{\text{г}}(b_c)$ — изменение (приращение) скорости дымовых газов, вызванное использованием газоочистки.

Согласно результатам расчетов котельного агрегата БКЗ-220–100Ф наиболее подвержены абразивному износу трубы водяного экономайзера и воздухоподогревателя. Для этих поверхностей нагрева зависимости изменения (приращения) скорости дымовых газов от относительного расхода адсорбента имеют соответственно вид:

$$\Delta\omega_{\text{г}}(b_c) = 8,649 \cdot b_c^{1,47},$$

$$\Delta\omega_{\text{г}}(b_c) = 2,4785 \cdot b_c^{1,23}.$$

Ущерб на электростанциях, связанный с отказами основного оборудования, представляет сумму следующих величин:

затрат $\Delta З_1$ на ремонт и восстановление отказавшего оборудования и затраты топлива на его последующий пуск;

потерь $\Delta З_2$ от недоиспользования основных фондов и персонала ТЭС;

дополнительных затрат $\Delta З_3$, связанных с пуском и работой резервного оборудования, имеющего, как правило, большие удельные расходы топлива [7].

Для ТЭС с поперечными связями отказ котла, как правило, не приводит к останову турбины, для них в основном учитываются составляющие ущерба $\Delta З_1$ и (при необходимости) $\Delta З_3$.

Затраты топлива на пуск котла БКЗ-220–100Ф составляют порядка 130 тыс. рублей, затраты на аварийный ремонт (в среднем) — от 20 тыс. до 80 тыс. рублей.

В резерве чаще всего находится оборудование, аналогичное основному, поэтому $\Delta З_3$ можно не учитывать. Затраты на замену водяного экономайзера 2-й ступени (ВЭК-2) составляют 8–9 млн рублей. Для блочных ТЭС отказ котла приводит к останову турбины; для них основные составляющие ущерба — $\Delta З_1$ и $\Delta З_2$. Потери от недоиспользования основных фондов и персонала ТЭС $\Delta З_2$ учитываются аналогично затратам на аварийный ремонт и пуск котла $\Delta З_1$. Для определения годовых значений суммарных издержек можно воспользоваться известной методикой [8, 9].

Применение разработанного способа позволит приводить к сопоставимому виду различные методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения.

Исследования проведены в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук в области знания «Технические и инженерные науки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требунских, С.А.** Энтропийная эффективность теплопотребляющих объектов [Текст] / С.А. Требунских, А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГТУ.— 2011. № 2.— С. 91–99.

2. **Иванов, С.А.** Метод повышения электрической мощности турбин [Текст] / С.А. Иванов, А.Г. Батухтин, Н.В. Горячих // Промышленная энергетика.— 2009. № 12.— С. 13–15.

3. **Сафронов, П.Г.** Способ увеличения экономичности основного оборудования ТЭЦ [Текст] / П.Г. Сафронов, С.А. Иванов, А.Г. Батухтин, И.Ю. Батухтина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего

Востока.— 2010. № 1.— С. 175–178.

5. **Дорфман, Ю.В.** Разработка аддитивного способа использования цеолитов для снижения вредных выбросов от котлов с факельным сжиганием топлива [Текст] / Ю.В. Дорфман, В.В. Пинигин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2010. № 1.— С. 186–188.

6. **Дорфман, Ю.В.** Моделирование поведения углей при разных способах его сжигания и их применение [Текст] / Ю.В. Дорфман, Н.В. Горячих, А.Г. Батухтин // Вестник Читинского государственного университета.— 2010. № 9.— С. 119–125.— Чита: Изд-во ЧитГУ, 2010.

7. **Пат. РФ 2421505 РФ. МПК C10L 10/00, C1.** Способ снижения вредных выбросов при сжигании углей в топках с кипящим слоем [Текст] / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, Ю.В. Дорфман, П.Г. Сафронов (РФ).— №2010 107697/05(010795); Заявлено 02.03.2010; Опубл. 20.06.2011.— Бюл. №17. 2010.

8. **Гладышев, Г.П.** Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС [Текст]: Учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич [и др.]; под ред. А.И. Андрющенко.— М.: Высшая школа, 1991.— 303 с.

9. **Басс, М.С.** Упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива в отопительных котельных применительно к условиям Забайкальского края [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин, С.А. Требунских // Промышленная энергетика.— 2009.— № 9. С. 37–41.

10. **Басс, М.С.** Комплексный подход к оптимизации функционирования современных систем теплоснабжения [Текст] / М.С. Басс, А.Г. Батухтин // Теплоэнергетика.— 2011. № 8.— С. 55–57.

УДК 537.9

Я.В. Безрукова, В.И. Донской, Л.А. Щербаченко, Д.С. Барышников, Л.И. Ежова, С.А. Васильев

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ЗАРЯДОВ В ГИДРАТИРОВАННЫХ СИЛИКАТАХ

Изучение взаимосвязи структуры различных материалов и их физических свойств становится одним из центральных направлений в современной физике конденсированного состояния. В работе рассматривается гетерогенная двухфазная система, содержащая поверхностноактивные мелкоразмерные частицы слюды, погруженные в водную полярную матрицу. Необычные физические свойства и существенные поверхностные дефекты делают такие материалы перспективными для создания на их основе качественно новых материалов, характеристики которых во многом определяются методами их получения и зависят от дисперсности, концентрации и химического состава компонентов. Несмотря на обширный круг имеющихся научных публикаций, посвященных изучению кинетических процессов в таких системах, сложившегося представления о механизмах переноса носителей зарядов и энергетическом спектре до сих пор нет.

Это обусловлено сложностью строения этих материалов, а также наличием в них локальных неоднородностей и заряженных дефектов. На межфазных границах в таких системах возникает интенсивное кулоновское взаимодействие зарядов, находящихся на электрически активной поверхности частиц твердого вещества, с полярными молекулами и ионами водной пленки. При наличии многочисленных границ раздела в таких сложных дисперсных системах суммарный эффект межфазных взаимодействий становится особенно сильным и определяющим процесс генерации собственных электрических полей.

В связи с этим целью настоящей работы было изучение природы и механизма межфазного взаимодействия в гидратированных мелкоразмерных механоактивированных слюдах и выяснение особенностей генерации и реализации образующейся в результате этого взаимодействия собственной внутренней электрической энергии.

Для изучения механизма межфазного взаимодействия в рассматриваемых системах в работе методом термостимулированной спектро-

скопии исследованы структурные особенности и энергетическое состояние данной дисперсной системы [1]. Исследуемые образцы были приготовлены посредством механоактивации природных кристаллов флогопита в установке «Pulverisette 5», с помощью которой были получены дисперсные системы с размерами частиц в интервале от 20 до 32 мкм. Гранулометрический состав указанных гетерогенных систем исследовался более детально с помощью лазерного анализатора частиц «Микросайзер 201». Образцы исследуемой системы с фиксированной массой помещались в специально сконструированную измерительную ячейку, представляющую собой плоский конденсатор с алюминиевыми электродами диаметром 1,5 см. Термостимулированные токи (ТСТ) регистрировались в режиме короткозамкнутого образца с помощью чувствительного вольтметр-электрометра В7–49 (погрешность измерения тока 10^{-15}А в температурном интервале (20–180) °С). Полученные данные, поступавшие в память персонального компьютера с аналого-цифрового преобразователя, представлялись в виде временных диаграмм термостимулированных токов и температуры образца и обрабатывались стандартными статистическими методами.

Напряжение на электроды измерительной ячейки не подавалось. В связи с этим в эксперименте наблюдались процессы, происходящие только под действием внутреннего электрического поля. Регистрация обнаруженных термостимулированных токов (ТСТ) в изучаемой дисперсной системе производилась при линейном нагреве образца с постоянной скоростью (1 град/мин) в интервале температур от 20 до 160 °С. Низкая скорость нагрева обеспечивала отсутствие градиентов температуры в образце, что было необходимым условием получения информативных и достоверных термостимулированных токовых спектров. В связи с тем, что на электродах измерительной ячейки отсутствовало внешнее напряжение, динамика наблюдаемых спектров ТСТ зависела только от распределения собственных внутренних электрических полей, создаваемых локализованными носителями термоэлектретного заряда исследуемой системы. Исследование динамики термостимулированных токов позволило получить информацию о природе электретного состояния и его характеристиках в данной системе. Преимущество метода термостимулированной спектроскопии определяется возможностью изучения спектра энергии локализации зарядов в ловушках для выяснения структуры вещества и особенностей его энергетического состояния.

В работе исследовалась структура, процессы накопления, переноса и релаксации свободных электретных зарядов на контактных границах разнородных электрически активных твердых поверхностях низкоразмерных частиц слюды и полярных молекул ионов жидкой фазы в зависимости от концентрации водной компоненты.

Метод термостимулированной спектроскопии позволяет изучать природу релаксационных процессов, а также механизм и условия разрушения дипольной поляризации и объемно-зарядового состояния гетерогенных систем. Динамика термостимулированных токов в мелкоразмерных слюдах является отражением структурных особенностей как твердой, так и жидкой компонент данной электрически активной системы и позволяет судить о природе и механизме их межфазного взаимодействия.

Экспериментальная регистрация серии максимумов на полученных спектрах ТСТ при нагревании исследуемых образцов и при отсутствии внешнего напряжения на электродах ячейки наглядно свидетельствует о существовании градиентов потенциала внутреннего поля в исследуемой конденсированной системе, накоплении свободных зарядов на межфазных границах и, как следствие, проявлении электретных свойств этой системы.

На рис. 1 представлены термограммы токов в диапазоне температур 20–160 °С для образцов мелкоразмерного флогопита с неизменной дисперсностью частиц и варьируемой концентрацией водной фазы.

Полученные зависимости термостимулированных токов (см. рис. 1) характеризуются наличием в исследуемом температурном интервале нескольких доминирующих максимумов различной интенсивности и ширины, что свидетельствует о существовании в рассматриваемой неоднородной системе сложного механизма процессов электропереноса и релаксации зарядов. Каждый отдельный максимум тока свидетельствует о релаксации определенных носителей электретного заряда. Интенсивная релаксация термостимулированных токов в рас-

сматриваемой неоднородной конденсированной системе при отсутствии внешнего напряжения на электродах служит свидетельством образования внутренней разности потенциалов между этими электродами, наличия каналов ионной проводимости в рассматриваемой системе, а также свободных носителей заряда, источниками которых являются как ионы полярной матрицы, так и заряды твердой фазы. Формирование доминирующих максимумов на спектрах термостимулированных токов вызвано образованием и исчезновением структурных поляризационных заряженных дефектов, которые до начала процесса термической активации находились в потенциальных ловушках твердой компоненты исследуемой гетерогенной системы. При этом каждый максимум тока на спектре ТСТ соответствует электретному заряду определенного типа. При низких температурах носителями заряда являются ионы жидкой полярной компоненты. Под действием собственного внутреннего поля двухфазной системы происходит преимущественно ионизация полярных молекул воды с ионными связями. Согласно теории Пула — Френкеля [4] электрическое поле способствует уменьшению энергии ионизации полярных молекул, что приводит к диссоциации молекул жидкой фазы и связанному с ней увеличению концентрации свободных ионов n_i:

$$n_i = n\exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right)\exp\left(\frac{a\sqrt{E}}{kT}\right), \qquad (1)$$

где n — постоянная Лошмидта жидкой среды; U_0 — энергия, необходимая для диссоциации молекул в отсутствие электрического поля; E — напряженность внутреннего поля; a — постоянная, зависящая от структуры жидкости.

Рассчитаны электрофизические параметры электретного состояния мелкоразмерного флогопита (см. табл.). По спектрам ТСТ вычислены энергия активации носителей заряда [2]

$$U_i = \frac{k\left[T_{i\max}\right]}{\Delta T_i} \qquad (2)$$

и плотности электретных зарядов

$$\sigma_i = \frac{1}{S\beta}\int I(T)\,dT. \qquad (3)$$

Положение пикового максимума тока $T_{i\max}$ и его ширина ΔT_i определяются экспериментально; S — площадь электрода; β — скорость нагрева; T — температура; I — величина тока; k — постоянная Больцмана; ΔT_i — ширина температурного интервала максимума термоактивационного тока. Результаты электрофизических параметров для образцов мелкоразмерного флогопита с величиной адсорбции водной компоненты 6,3 (*1*), 11,2 (*2*) и 18,5 (*3*) и фиксированной дисперсностью 20–32 мкм представлены в таблице.

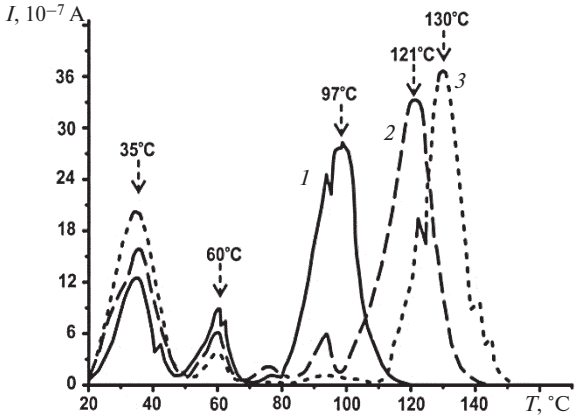


Рис. 1. Термостимулированные спектры образцов мелкоразмерного флогопита с величиной адсорбции водной компоненты 6,3 (*1*), 11,2 (*2*) и 18,5 (*3*) и фиксированной дисперсностью d = (20–32) мкм

В спектрах ТСТ (см. рис. 1) можно выделить две области. В интервале низких температур

Физические параметры электретного состояния мелкоразмерного флогопита с различной величиной адсорбции водной компоненты φ и фиксированной величиной дисперсности d = 20–32 мкм

φ, %	Номер максимума	$T_{\max}$, °C	U, эВ	σ, Кл/м²
6,3	1	35	0,73	0,24
	2	60	0,78	0,08
	3	97	0,86	0,42
11,2	1	35	0,72	0,22
	2	60	0,77	0,05
	3	121	0,92	0,59
18,5	1	35	0,70	0,29
	2	60	0,77	0,03
	3	130	0,94	0,59

(20–80) °С наличие доминирующих максимумов тока при $T_1 = 35$ °С и $T_2 = 60$ °С может быть связано с накоплением межфазных гетерозарядов под действием внутреннего электрического поля, а также с особенностями структуры водной компоненты.

Рост величины адсорбции до $\varphi_3 = 18{,}5$ % приводит к значительному увеличению интенсивности максимума тока ($I_3 = 21{,}3 \cdot 10^{-7}$ А при 35 °С). Таким образом, возрастание количества влаги в образце обеспечивает более свободный транспорт ионов жидкой среды к электродам и способствует увеличению релаксационного тока, а также плотности электретных зарядов $\sigma_3 = 0{,}29$ Кл/м^2 (рис. 1, кривая *3*).

Вместе с тем уменьшение амплитуды тока при 35 °С наблюдается в образцах с незначительным количеством введенной водной компоненты (рис. 1, кривая *1*). Следствием этого является низкая плотность накопленного заряда в обеих системах в окрестности 35 °С (см. табл.). По всей вероятности, максимум термостимулированного тока при температуре 35 °С отражает эффективность накопления электретных свободных зарядов водной компоненты в объеме и на контактных границах разнородных фаз системы.

Максимум термотока, обнаруженный в спектрах ТСТ при 60 °С (см. рис. 1), предположительно связан с перестройкой структурированной воды в объемное состояние [3]. При этой температуре связанная вода переходит в обычное объемное состояние, а амплитуда максимума тока зависит от концентрации связанной воды в системе.

Наиболее сильное межфазное взаимодействие наблюдается в электроактивных системах, где наибольшая концентрация связанной структурированной воды и, как следствие, амплитуда максимума тока при 60 °С максимальна (см. рис. 1).

Энергия активации носителей заряда в области температуры 60 °С для всех образцов изменяется в интервале 0,77–0,78 эВ (см. табл.) и для образцов с большей концентрацией водной компоненты имеет наименьшую величину. В силу этого основная масса молекул воды находится в свободном состоянии, а меньшая их часть упорядочена внутренним собственным полем. Это облегчает термический выход локализованных ионов из потенциальных ловушек и соответственно увеличивает их время релаксации.

Экспериментально установлено, что температурное положение термомаксимумов в низкотемпературной области при 35 и 60 °С не зависит от концентрации полярной водной фазы, а также от структуры, размеров и химического состава твердой компоненты и отражает свойства водной полярной фазы. Такие максимумы токов характерны как для неорганических, так и для органических дисперных неупорядоченных систем [5–7].

Электретно-термический анализ двухкомпонентной дисперсной системы позволил выявить в интервале температур от 80 до 140 °С максимум тока, который, в отличие от низкотемпературных максимумов, проявляет зависимость от величины адсорбции и от поверхностной активности мелкоразмерных частиц слюды. Проявление этого пика тока связано с термическим разрушением и освобождением ионов из дефектных областей, расположенных на поверхности и в объеме частиц слюды. Значительная амплитуда релаксационного максимума тока ($I \approx 10^{-6}$А) свидетельствует о большой концентрации накопленных зарядов на межфазных границах.

Анализ динамики релаксации термостимулированных токов в этом интервале температур позволил выявить зависимость температурного положения максимумов тока от концентрации водной фазы в системе (см. рис. 1).

В исследуемой системе в интервале температур 80–160 °С с увеличением содержания водной компоненты от $\varphi_1 = 6{,}3$ % до $\varphi_3 = 18{,}5$ % обнаружено, что высокотемпературное положение максимума тока сместилось с 97 до 130 °С (рис. 1, графики *1–3*).

Объяснение этому факту можно дать следующее. Процессы накопления свободных ионов сопровождаются частичным экранированием электрического поля поверхностных центров. Экранирование зарядов, находящихся на электрически активной поверхности твердой компоненты, происходит более эффективно при большей концентрации водной фазы. Это приводит к ослаблению суммарного электрического собственного поля системы. И, наоборот: низкая концентрация величины адсорбции водной фазы незначительно изменяет величину суммарного внутреннего поля. Энергия активации заряженных дефектов, находящихся на активной поверхности и в объеме механоактивированной мелкоразмерной слюды, является результирующей функцией энергий электрического и теплового поля. В связи с этим можно

полагать, что при низкой величине адсорбции суммарное собственное электрическое поле системы способствует уменьшению энергии активации заряженных дефектов твердой фазы и облегчает их выход с поверхности и объема частиц слюды в каналы ионной проводимости. И, как следствие, облегченный электрическим полем выход ионов с поверхности частиц слюды осуществляется при более низкой температуре. Так, при величине адсорбции водной фазы, равной $\varphi_1 = 6{,}3$ %, максимум тока высокотемпературного пика проявляется при более низкой температуре — $T_1 = 97$ °С (рис. 1, кривая *1*). Аналогично в системе значительно большей концентрации водной компоненты — $\varphi_3 = 18{,}5$ % подобный максимум термоактивационного тока соответствует температуре $T_3 = 130$ °С (рис. 1, кривая *3*).

Интерес представляют спектры термостимулированных токов (ТСТ) при значительных величинах адсорбции водной компоненты (рис. 2).

Большое содержание воды в диспергированных слюдах способствует повышению электрической активности межфазных соединений полярной водной компоненты с поверхностными зарядами частиц слюды, что сопровождается более эффективными изменениями кинетических процессов в таких системах. На токовых термограммах регистрируются отрицательные термомаксимумы большой амплитуды ($I = 2 \cdot 10^{-5}$А), которые почти на порядок превышают амплитуду аналогичных максимумов с меньшей величиной адсорбции водной фазы. Этот результат можно объяснить наиболее сильным электроконтактным взаимодействием и большим накоплением свободных электретных зарядов на межфазных границах разнородных фаз и в объеме системы. Смена направления тока свидетельствует об изменении направления напряженности собственного электрического поля в системе в связи с большой концентрацией ионов и молекул воды.

При больших величинах адсорбции водной полярной компоненты ($\varphi \approx 100$ %) изучаемая электрически активная система, представленная мелкоразмерными поверхностноактивными дисперсными частицами слюды, покрытыми полярными водными пленками, является слюдоводным композитом.

Под действием градиентов потенциала собственного внутреннего поля слабо связанные

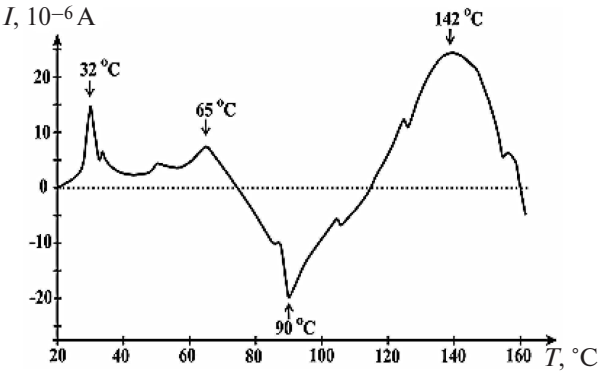


Рис. 2. Спектры ТСТ мелкоразмерного флогопита дисперсностью 20–32 мкм для адсорбции водной компоненты 100 %

с каркасом ионы H^+ и OH^- в пленках воды будут накапливаться у активных границ твердой фазы. Заряды, разделенные слюдяной матрицей, будут и далее перемещаться по водно-пленочным мостикам. Из-за большой концентрации водной компоненты значительно растет количество электретных зарядов как вблизи твердой фазы, так и в объеме водной компоненты системы. При этом полярная жидкая фаза образует непрерывную сплошную водную, хорошо проводящую среду в диэлектрическом каркасе из слюдяных мелкоразмерных частиц. В связи с этим электропроводность таких систем значительно превышает значение $\sigma > 10^{-3}$ Ом$^{-1}$см$^{-1}$. В этих условиях исследуемая электрически активная система является суперионик с хорошими электретными характеристиками. Экспериментальная регистрация значительных электрических токов ($I \approx 10^{-5}$ А), образованных градиентами потенциала внутреннего собственного поля, свидетельствует об аккумуляции электрической энергии в таких системах.

Таким образом, отличительной особенностью электрически активных конденсированных систем является наличие внутренних механизмов взаимодействий, обеспечивающих генерацию внутренней электрической энергии в таких системах в отсутствие внешнего источника энергии [8]. Эти взаимодействия между электрически активными твердыми поверхностями и полярными молекулами жидкости обеспечивают формирование в рассматриваемой системе внутренней разности потенциалов, которая ответственна за проявление термостимулированных токов.

Исследование динамики процесса реализации термостимулированных токов в электрически активной изучаемой двухфазной системе позволило сделать выводы:

1. Установлено, что особым и необходимым компонентом исследуемых электрически активных неупорядоченных мелкодисперсных систем являются активные межсоединения, способные осуществлять интенсивные электрические контакты поверхностей разнородных твердых и жидких полярных диэлектриков, способствующих формированию градиентов потенциала собственного электрического поля и обеспечивающих генерацию внутренней электрической энергии в таких системах в отсутствие внешнего источника тока. Экспериментальная регистрация электрических токов без подачи внешнего напряжения подтверждает существование градиентов потенциала внутреннего электрического поля. Величина аккумулированного тока служит индикатором эффективности электроконтактного взаимодействия поверхностей двух разнородных твердой и жидкой полярных диэлектриков.

2. Внутреннее электрическое поле является катализатором процессов диссоциации полярных молекул воды с ионными связями, что способствует увеличению концентрации свободных зарядов на межфазных границах и в объеме электрически активной системы. В результате электрического взаимодействия свободных ионов полярной жидкости с заряженной поверхностью твердой фазы вблизи последней происходит эффективное накопление противоионов, что свидетельствует о проявлении электретного эффекта в изучаемой системе.

3. Обнаружен гидроэлектрический эффект в исследуемых электрически активных системах, находящихся в суперионном состоянии и способных обеспечивать накопление большой концентрации свободных электретных зарядов в объеме и на межфазных границах электрически активных систем, что приводит к максимально эффективному электрическому взаимодействию контактирующих поверхностей раздела разнородных полярных твердых и жидких диэлектриков. Это способствует генерации собственной электрической энергии в этих системах, а также стимулирует возникновение токов порядка $2 \cdot 10^{-5}$А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гороховатский, Ю.А.** Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков [Текст] / Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский.— М.: Наука, 1991.— 248 с.

2. **Тареев, Б.М.** Физика диэлектрических материалов [Текст] / Б.М. Тареев.— М.: Энергоиздат, 1982.— 320 с.

3. **Дерягин, Б.В.** Вода в дисперсных системах [Текст] / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко [и др.].— М.: Химия, 1989.— 288 с.

4. **Frenkel, Ya.I.** // J. Phys. Rev. 1938.Vol. 54.— P. 657.

5. **Щербаченко, Л.А.,** Максимова Н.Т., Барышников Е.С. и др. // ЖТФ.— 2010.— Т. 80.— Вып. 8.— С. 136–140.

5. **Щербаченко Л.А.**, Максимова Н.Т., Барышников Е.С. и др. // ЖТФ.— 2009.— Т.79.— Вып.9.— С. 129–137.

6. **Синицын, Н.И.,** Елкин В.А. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2007.– № 1.— С.24–38.

7. **Патент РФ. № 100853.** Источник электродвижущей силы / Щербаченко Л.А., Щербаченко Л.А., Максимова Н.Т., Ружников Л.И. [и др.]. Приоритет от 27.12.2010.— Б.И.— 2010. № 36.

УДК 621.311.22:075.8

В.Г. Киселёв

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТИ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

Известно, что наиболее сильное разрушение металла наблюдается, как правило, на границе раздела двух типов коррозионных сред, например на границе «грунт — атмосфера» или «водная поверхность — атмосфера». Явления эти в достаточной степени описаны в научной литературе, однако механизм их протекания во многом еще остается дискуссионным, что затрудняет

разработку эффективных методов борьбы с этим видом коррозии. Экспериментально установлено, что особую опасность в коррозионном отношении представляют зоны металла, которые находятся в пограничной области между расположением в электролите и в воздушной атмосфере и соответственно подвергаются периодическому смачиванию и последующей сушке (зона брызг). В соответствии с современными представлениями существуют две зоны с разными типами морской атмосферной коррозии на границе раздела фаз [1]:

зона брызг, где поверхность металла (например, верхняя часть металлической сваи) попеременно находится то во влажном, то в сухом состоянии, и на ней откладываются морские соли;

прибрежная зона, в которой на поверхности металла (металлическая конструкция, расположенная на берегу) обнаруживается соль, выделившаяся из водной пыли, принесенной ветром. Зона этого типа начинается в нескольких метрах от берега и простирается на несколько километров вглубь суши.

Из практики известно*, что скорость коррозии в зоне брызг приблизительно в два-три раза больше скорости коррозии металла, погруженного в электролит. Тот же источник указывает, что такая же или даже более высокая скорость коррозии наблюдается на берегу тропических морей с сильным прибоем на расстоянии 50 метров от черты прибоя. Достаточно проблематично объяснять это явление, как это обычно делается, усилением диффузии кислорода через тонкие слои влаги, механическим удалением продуктов коррозии (особенно во втором случае, учитывая относительно малое время нахождения металла под слоем влаги) и наличием только ветровой механической нагрузки.

Попытке выяснить механизм этого явления, а также трактовке общего вида коррозионной кривой для железной сваи, погруженной в морскую воду, и посвящена данная статья. Однако, прежде чем перейти собственно к анализу коррозионного процесса, необходимо коротко остановиться на рассмотрении такого понятия, как потенциал погружения.

Потенциала погружения и его основные характеристики

Ж. Биллитер в многочисленных публикациях в начале прошлого века описал опыты по методу погружения, проведенные им для определения абсолютного потенциала между металлическим электродом и раствором электролита. В свете сегодняшних представлений о природе абсолютного скачка потенциала их, безусловно, следует признать ошибочными. Тем не менее они представляют значительный теоретический, а в рамках данной работы и практический интерес. Суть опытов Биллитера заключалась в том, что маленький сухой металлический электрод, соединенный через гальванометр проводником с большим металлическим электродом, быстро погружают в раствор электролита, в котором уже находится большой электрод. При погружении маленького электрода стрелка гальванометра отклоняется, ток при этом течет от большого электрода к маленькому, если обратимый потенциал больше потенциала погружения, и, соответственно, от маленького электрода к большому электроду, когда обратимый потенциал меньше потенциала погружения. Обратимый потенциал системы задается изменением концентрации электролита. При этом значение потенциала погружения, данное еще Биллитером, относительно стандартного водородного электрода сравнения составляет +0,475 В. Следует подчеркнуть, что значение потенциала Биллитера не зависит от природы металла, более того, его величина остается постоянной и в том случае, когда электролит, содержащий ионы металла в гидратированной форме, заменяют системой, содержащей ионы металла в форме комплексонов, или окислительно-восстановительной системой. Отсюда непосредственно следует, что потенциал погружения не зависит от формы двойного электрического слоя, а определяется исключительно термодинамикой протекающих в этом случае электрохимических процессов следующего типа:

$$Ox + ze = R, \qquad (1)$$

где Ox — окислитель; z — количество электронов e, которые принимает окислитель; а R — восстановленная форма окислителя. При этом, как уже было сказано, конкретный вид окислителя

* **Чендлер, К.А.** Коррозия судов и морских сооружений [Текст] / К.А. Чендлер.— Л.: Судостроение, 1988. — С. 40–47.

и восстановленной формы не оказывает никакого влияния на потенциал погружения. Таким образом, вместо уравнения (1) можно записать окислительно-восстановительную реакцию следующего вида:

$$Fe^{3+} + e = Fe^{2+}. \qquad (2)$$

С не меньшим основанием исходя из эксперимента вместо (1) можно записать и реакцию, характеризующую окислительно-восстановительный процесс железа и его ионов, например при морской коррозии металла:

$$Fe^{2+} + 2e = Fe. \qquad (3)$$

Рассмотрим для определенности модельную систему, состоящую из идеально неполяризующегося железного электрода, погруженного в раствор его собственной идеальной соли, концентрация которой может изменяться бесконечно, и осуществим с помощью этой системы опыт Биллитера.

Из существования потенциала погружения и его постоянства для любого металла непосредственно следует, что при окунании идеального железного электрода в раствор его собственной соли при потенциалах выше потенциала погружения $(\varphi_б)$ наблюдается катодный процесс, при потенциалах ниже $\varphi_б$ — анодный процесс, а при потенциале, равном $\varphi_б$, электрохимическая реакция не протекает. Следует подчеркнуть, что этот вывод был получен для металлического электрода безотносительно его площади поверхности, т. е. он справедлив как для «больших», так и для «маленьких» электродов. Если мы соединим большой железный электрод с маленьким металлическим проводником через гальванометр и одновременно погрузим их в электролит при потенциале погружения, то стрелка гальванометра останется на месте. Очевидно, что ничего не изменится, если погружаться будет только маленький электрод, в то время как большой будет находиться в погруженном состоянии при потенциале погружения. Таким образом, можно сделать вывод, что и для рассмотренной системы «малый — большой электрод», изготовленной из железа и погружаемой в раствор ее собственной соли, существует потенциал, при котором система находится в равновесии. Этот потенциал экспериментально был обнаружен Биллитером и с тех пор носит его имя.

Повторим те же рассуждения для случая, когда большой металлический электрод находится в электролите и его равновесный потенциал больше потенциала Биллитера. Тогда при погружении маленького электрода на нем будет происходить катодный процесс, и ток будет направлен из электролита к маленькому металлическому электроду, в том числе и через большой электрод. Однако это явление становится доступным для наблюдения только при таком выбранном соотношении площадей электродов, когда площадь маленького электрода значительно меньше площади большого электрода и, следовательно, плотность катодного тока на его поверхности и электродная поляризация значительно больше соответствующих величин для большого электрода, что делает возможным движение тока через большой электрод, а затем и через гальванометр. Необходимо подчеркнуть, что в этом случае и на большом электроде протекает катодная реакция. При обратном соотношении площадей электродов ток, текущий через гальванометр, был бы, возможно, слишком мал и, следовательно, недоступен для регистрации этим прибором.

Повторим те же рассуждения для случая, когда большой металлический электрод находится в электролите и его равновесный потенциал меньше потенциала Биллитера. Тогда при погружении маленького электрода на нем будет происходить анодный процесс, соответственно ток будет направлен от маленького металлического электрода в электролит, в том числе и через большой электрод. Это фактически означает, что его потенциал в начальный момент погружения больше соответствующего равновесного потенциала большого электрода, что и приводит к экспериментально наблюдаемому электрическому току по металлическому проводнику через гальванометр от «маленького» электрода к «большому» и далее в электролит. Необходимо подчеркнуть, что в этом случае и на большом электроде протекает анодная реакция. Для рассматриваемой системы также справедливы все замечания, сделанные ранее для случая с потенциалом большого электрода, бо́льшим потенциала погружения. Соответственно при потенциале погружения наблюдается обращение тока, и гальванометр показывает его отсутствие в системе.

Влияние емкости двойного электрического слоя на скорость анодного процесса при смачивании водой поверхности металлического электрода

Для оценки величины количества электричества, протекающего в системе «маленький электрод — большой электрод, погруженный в электролит», при погружении маленького электрода в электролит необходимо проследить за изменением его электрической емкости. Выберем для определенности в качестве «маленького» электрода металлический шарик с радиусом $r = 10^{-2}$ м. Емкость такого шарика $C_в$ при нахождении его в вакууме (воздухе) в соответствии с законами электростатики будет определяться следующей формулой:

$$C_в = 4\pi\varepsilon_0 r = 4\pi 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 10^{-2} \approx 1{,}11\cdot 10^{-12}\ \Phi, \quad (4)$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. С другой стороны, при погружении этого шарика в водный раствор электролита в силу образования двойного электрического слоя его емкость уже следует рассматривать как емкость плоского конденсатора, образованного его поверхностью и поверхностью соприкасающегося с ним электролита. Величина этой емкости (C) может несколько изменяться, но обычно ее принимают для гладкой поверхности ртути равной $C = 20$ мкФ/см^2 = 0,2 Ф/м^2. Впрочем, это приближенное значение емкости, а фактически можно наблюдать и емкость двойного электрического слоя на гладкой поверхности ртути, превосходящее указанную величину в несколько раз. Следовательно, величина емкости всего шарика в водном растворе электролита при сделанных предположениях составит как минимум

$$C_{вр} = 0{,}2\cdot 4\pi r^2 \approx 2{,}51\left(10^{-12}\right)^2 = 2{,}51\cdot 10^{-4}\ \Phi. \quad (5)$$

Анализ соотношений (4) и (5) показывает, что $C_{вр} \gg C_в$. Следовательно, при оценке количества электричества, протекающего через систему при опытах с погружением электрода, величиной $C_в$ можно просто пренебречь и считать, что количество электричества, проходящее через гальванометр и двойной электрический слой маленького электрода, полностью определяется емкостью $C_{вр}$.

В этом случае в соответствии с теорией Нернста естественно предположить, что при потенциалах больше потенциала погружения на внутреннюю, металлическую, обкладку конденсатора поступают положительные электрические заряды. Прийти на внутреннюю обкладку конденсатора они могут, преодолев либо двойной электрический слой маленького электрода, либо двойной электрический слой большого электрода, а затем уже по металлическому проводнику через гальванометр они попадают на металлическую обкладку двойного электрического слоя маленького электрода. Путь по второму варианту в силу значительно большей площади поверхности большого электрода по сравнению с площадью поверхности маленького электрода связан с меньшей поляризацией, что и обусловливает подтвержденную экспериментом практическую возможность обнаружения этого явления. Аналогичный эффект возникает и при потенциалах меньше потенциала погружения с той лишь разницей, что на металлическую обкладку конденсатора в этом случае поступают отрицательные электрические заряды. Следовательно, при потенциале погружения переход зарядов через двойной электрический слой должен отсутствовать, что и подтверждается экспериментально.

Прежде чем перейти собственно к рассмотрению механизма интенсификации коррозионных процессов, обусловленных периодическим смачиванием металлической поверхности, оценим количество металла, которое может быть перенесено через двойной электрический слой при его смачивании. При морской коррозии стационарный потенциал железа обычно мало отличается от его стандартного потенциала и оценивается значением в $\varphi_{пк} = 0{,}4$ В по стандартному водородному электроду сравнения, что значительно меньше значения потенциала погружения, величина которого равна +0,475 В. следовательно, при смачивании железной поверхности должен наблюдаться анодный процесс растворения железа. Пусть для определенности площадь смачиваемой поверхности равняется одному квадратному метру. В свою очередь, начальный потенциал железного электрода в момент погружения соответствует минимально возможной концентрации ионов железа, принятой в диаграммах Пурбэ,

что соответствует стационарному потенциалу $\varphi_{пн}$, равному 0,64 В. В этом случае разность потенциалов между начальным и конечным потенциалом погружения металлического электрода $\varphi_{пк}$ соответственно составит

$$\varphi_{пн} - \varphi_{пк} = (-0,64) - (-0,4) = -0,24\,\text{В}. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что поскольку оба эти потенциала отрицательнее потенциала погружения, то анодный процесс протекает как на смачиваемой поверхности железного электрода, так и на поверхности, смоченной ранее (погруженная часть металла). В таком случае через двойной электрический слой совокупно большого и маленького электрода должно пройти некоторое количество положительного электричества в сторону раствора. Величина этого количества электричества определяется изменением количества зарядов емкости двойного электрического слоя при ее разрядке от –0,64 В до –0,40 В по стандартному водородному электроду сравнения при учете того обстоятельства, что потенциал нулевого заряда для железа в растворах слабых кислот считается равным 0,00 В. Последнее утверждение означает, что полярность емкости двойного электрического слоя остается неизменной. Примем, как и ранее, что емкость единицы площади железного электрода равняется $C = 20$ мкФ/см^2 = = 0,2 Ф/м^2. Однако практически это минимальное значение емкости справедливо для гладкой поверхности ртути, в то время как морская коррозия железа протекает на поверхности железа, покрытой рыхлым слоем ржавчины, что существенно увеличивает совокупную площадь поверхности металла и ржавчины, которые электрически связаны между собой. Примем, что площадь поверхности при этом увеличивается приблизительно в 1000 раз, что примерно в 10 раз меньше соответствующего увеличения площади поверхности при образовании платинированной платины. При сделанных предположениях количество $Q_{пн}$ электричества в емкости двойного слоя для потенциала –0,64 В можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q_{пн} = (\varphi_{пн} - \varphi_{\varepsilon=0}) = 0,2(-0,64)1000 = -128\,\text{Кл}, \quad (7)$$

где $\varphi_{\varepsilon=0}$ — потенциал точки нулевого заряда для железа, равный 0, 00 В. Соответственно, для конечного потенциала погружения $\varphi_{пк} = 0,4$ В получим

$$Q_{пк} = (\varphi_{пк} - \varphi_{\varepsilon=0}) = 0,2(-0,40)1000 = -80\,\text{Кл}. \quad (8)$$

Следовательно, количество электричества ΔQ, которое должно пройти через большой и малый электроды, за один процесс смачивания составит разницу между $Q_{пк}$ и $Q_{пн}$, т. е. будет определяться следующей формулой:

$$\Delta Q = Q_{пк} - Q_{пн} = (-80) - (-128) = 48\,\text{Кл}. \quad (9)$$

Тогда, если принять площади как большого, так и малого электродов равными одному квадратному метру, а один цикл «смачивание — высыхание» равным одной минуте, тогда средняя величина плотности анодного тока, протекающего через оба электрода, будет определяться следующей формулой:

$$i = \frac{\Delta Q}{2 \cdot 60} = \frac{48}{120} = 4,0 \cdot 10^{-1}\,\frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (10)$$

Пересчет скорости коррозии для железа, выраженной в единицах плотности тока, к единицам мм/год дает вместо (10) значение скорости коррозии $v = 4,48 \cdot 10\,\frac{\text{мм}}{\text{год}}$, что приблизительно в 5 раз превосходит скорость морской коррозии железа в погруженном состоянии и хорошо согласуется с экспериментальными данными для величины коррозии в зоне брызг.

Такой подход позволяет объяснить и некоторое увеличение атмосферной морской коррозии в прибрежной зоне по сравнению с рассмотренным случаем коррозии в зоне брызг. Действительно, в случае коррозии в прибрежной зоне циклы смачивания и высыхания за счет малого количества влаги, приносимой ветром, значительной скорости ветра и более высокой температуры прибрежной металлической конструкции происходят чаще, чем при коррозии в зоне брызг. Это обстоятельство и обусловливает повышенную плотность анодного тока, а следовательно, и скорость коррозии, наблюдаемую в этом случае. Очевидно, что коррозионные процессы, связанные с изменением емкости двойного электрического слоя, с той или иной степенью интенсивности наблюдаются

и при атмосферной коррозии, и при изменении уровня жидкости в металлических емкостях любой формы, в том числе и на энергетических объектах.

Предложенная модель позволяет объяснить, по крайней мере, — на качественном уровне, и некоторое замедление скорости коррозии по ватерлинии, в нижней части металлической конструкции, непосредственно прилегающей к зоне брызг, тем, что при высыхании смоченной поверхности металла при потенциалах ниже потенциала погружения формируется некоторый катодный ток. Действительно, при испарении влаги на поверхности металла наблюдается некоторый избыток отрицательных зарядов на металлической обкладке двойного электрического слоя, которые больше не могут быть скомпенсированы зарядами, расположенными в электролите. Эти заряды отводятся преимущественно в ближайшую зону, где есть электролит, что и обусловливает ее частичную катодную защиту. Данное предположение подтверждается экспериментом, в соответствии с которым наблюдается существенное, приблизительно в два раза, уменьшение скорости коррозии в рассматриваемой зоне погруженной в морскую воду металлической сваи по сравнению со скоростью коррозии на ней же в более глубоких слоях морской среды.

В статье рассмотрены основные закономерности протекания коррозии по линии водораздела (ватерлиния) в зоне брызг и раскрыта связь этого процесса с потенциалом погружения (потенциал Биллитера).

Предложена электрохимическая модель коррозионного процесса по ватерлинии, позволяющая на основе оценки емкости двойного электрического слоя объяснить вид коррозионной кривой при морской коррозии.

Численные расчеты скорости коррозионного процесса по ватерлинии позволяют, как минимум на качественном уровне, охарактеризовать зависимость скорости морской коррозии от глубины погружения металлической конструкции в электролит (морская вода).

УДК 621.398

В.А. Моренов

ПРИМЕНЕНИЕ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ

Проблема использования попутного нефтяного газа (ПНГ), извлекаемого в процессе нефтедобычи, в последнее время приобрела большую актуальность в связи с введением ряда нормативных документов, ужесточающих требования к утилизации ПНГ и предусматривающих увеличение выплат за сверхлимитное загрязнение окружающей среды в 4,5 раза и более. Следует отметить, что в результате сжигания попутного нефтяного газа в атмосферу попадает большое количество углекислого газа, а также теряется значительная часть невозобновляемых природных запасов, которые возможно использовать в качестве энергоресурса для работы генерирующих агрегатов.

Согласно статистике Россия занимает первое место в мире по сжиганию попутного нефтяного газа, ежегодно уничтожая более 50 млрд $м^3$ газа, что в разы больше других стран. Сжигание ПНГ приводит к значительным выбросам твердых загрязняющих веществ и ухудшению экологической обстановки в нефтепромысловых районах. По оценкам Минпромэнерго в 2004 году в атмосферу в нефтедобывающих регионах было выброшено 321,8 тыс. тонн твердых загрязняющих веществ (около 12 % общего объема выбросов в России). На факельных установках было сожжено 7,1 млн т этана, 4,1 млн т пропана, 2,6 млн т бутана. Из-за недостаточной степени переработки ПНГ предприятия ежегодно теряют около 13 млрд долларов. В Ханты-Мансийском автономном округе (по данным администрации) ежегодно сгорает в факелах до 7,6 млрд $м^3$ попутного газа, что сопоставимо

с уничтожением 6,5 млн т нефти. Согласно результатам исследования, профинансированного Всемирным банком, при уровне цен 2007 года около трети сжигаемого в факелах российского ПНГ возможно использовать с получением дополнительного ежегодного дохода в размере около 2,3 млрд долларов при сокращении выбросов CO_2 более чем на 30 млн т/год [1].

Вместе с тем существует несколько способов рационального использования попутного нефтяного газа:

закачка в пласт для увеличения пластового давления и добычи нефти;

использование в качестве топлива для выработки электроэнергии различными агрегатами;

использование для переработки на газоперерабатывающих заводах с получением сухого отбензиненного газа (СОГ), широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), сжиженных газов (СУГ) и стабильного газового бензина (СГБ).

Выработка электроэнергии с использованием попутного нефтяного газа — одно из перспективных решений. Вопрос перехода от действующих систем централизованного энергоснабжения стал в последние годы актуальным. Вызвано это не только ухудшением стоимостных и качественных показателей работы системы (участились случаи внезапных перерывов в электропитании, произошло старение оборудования, выросли тарифы на электроэнергию, повысилась стоимость строительства электропередач, значительно снизилось качество электроэнергии), но и значительной удаленностью от основных электромагистралей новых месторождений углеводородов. Поэтому нефтегазовые компании вынуждены искать новые локальные источники электроэнергии [2].

Рассмотрим эффективность применения попутного нефтяного газа на примере Тобойского месторождения, находящегося в Ненецком автономном округе. Основным объектом (92,4 % балансовых запасов нефти и 88,9 % растворенного газа от общих запасов по месторождению) является массивная залежь пласта D3fm-III в рифогенных известняках фаменского возраста, выявленная на четырех куполах — Южном, Центральном, Северном и Западном. Месторождение отличает высокая плотность нефти и достаточно высокое содержание в ней сероводорода. Хроматографический состав попутного нефтяного газа представлен в таблице.

Физико-химические свойства и состав попутного нефтяного газа

Свойство	Единицы измерения	Показатели по пласту D3fm-III		
		Западный купол	Центральный купол	Восточный блок. Южный купол
Газосодержание	$м^3/т$	81,99	50,07	42,22
В том числе:				
сероводорода	*ppm*	80	120	150
диоксида углерода	% масс.	0,55	0,63	0,88
азота	% масс.	2,28	2,1	1,94
метана	% масс.	15,97	14,6	13,82
этана	% масс.	5,01	5,95	3,39
пропана	% масс.	7,59	5,45	6,44
изобутана	% масс.	1,31	1,32	1,38
н-бутана	% масс.	7,0	3,83	3,73
изопентана	% масс.	5,88	2,57	1,92
н-пентана	% масс.	8,28	3,0	1,84

Окончание табл.

Свойство	Единицы измерения	Показатели по пласту D3fm-III		
		Западный купол	Центральный купол	Восточный блок. Южный купол
гексана	% масс.	3,97	2,20	2,49
гептана + высш.	% масс.	42,16	58,32	62,17
Плотность	кг/м^3	856	901	915

На рис. 1 представлен график добычи попутного нефтяного газа в процессе эксплуатации Тобойского месторождения (за 2 года).

Как видно из рисунка, в процессе эксплуатации месторождения наблюдается динамика добычи ПНГ, при этом максимум составляет 120000 м^3 и приходится на апрель 2009 г., минимум — 17000 м^3 (июнь 2009 года).

Электроснабжение промысла осуществляется дизельными электростанциями Cummins и Perkins суммарной мощностью около 1,5 МВт, обогрев помещений происходит за счет блочно-тепловых подогревателей воды ПБТ-1,6, где попутный нефтяной газ используется в качестве топлива. Принципиальная схема такого обогрева представлена на рис. 2.

Однако, как видно из рис. 3, объем использования в качестве энергоносителя составляет в среднем 35000 м^3, что в два-три раза меньше расхода газа, идущего на факел высокого давления (ФВД), где он сжигается.

Неиспользуемый попутный нефтяной газ может применяться для питания микротурбины Capstone C-60, обеспечивающей дополнительно 60 кВт мощности, а также для перевода обогрева жилых, бытовых, административных помещений на водяное отопление за счет нагрева теплоносителя (вода) в ПБТ-1,6 (1,2,3), высвобождая порядка 300 кВт мощности. В среднем количество сжигаемого попутного газа хватило бы для выработки 43200 кВт·ч электроэнергии в месяц.

Применение микрогазотурбинных электроагрегатов (МГТЭА), работающих на горючем газе (природный, пропан, бутан, попутный нефтяной, биогаз) и/или на жидком топливе (дизельное, керосин), является одним из современных способов местного получения энергии. КПД таких турбин достигает 35 %, что выше значений дизельных и газопоршневых машин. Также к достоинствам следует отнести малые эксплуатационные затраты, высокую надеж-

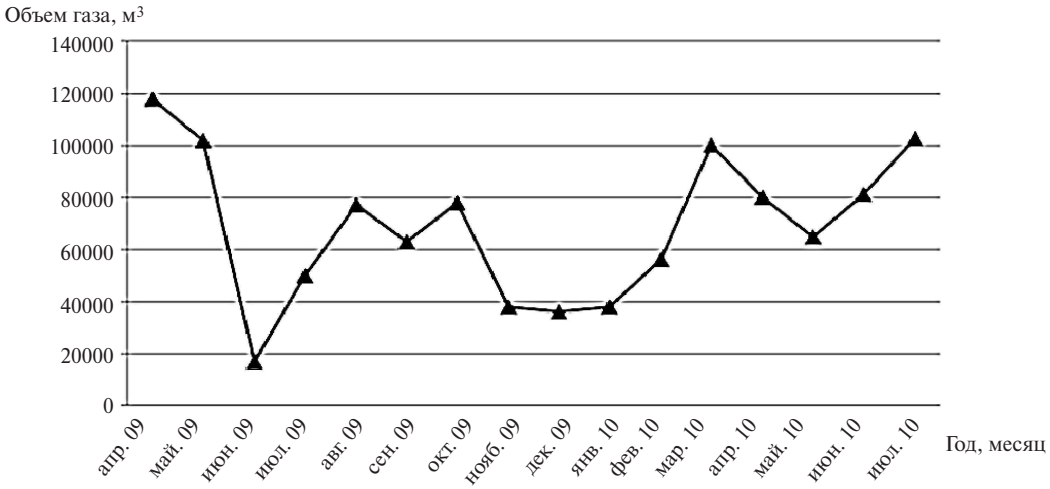


Рис. 1. Добыча ПНГ на Тобойском месторождении

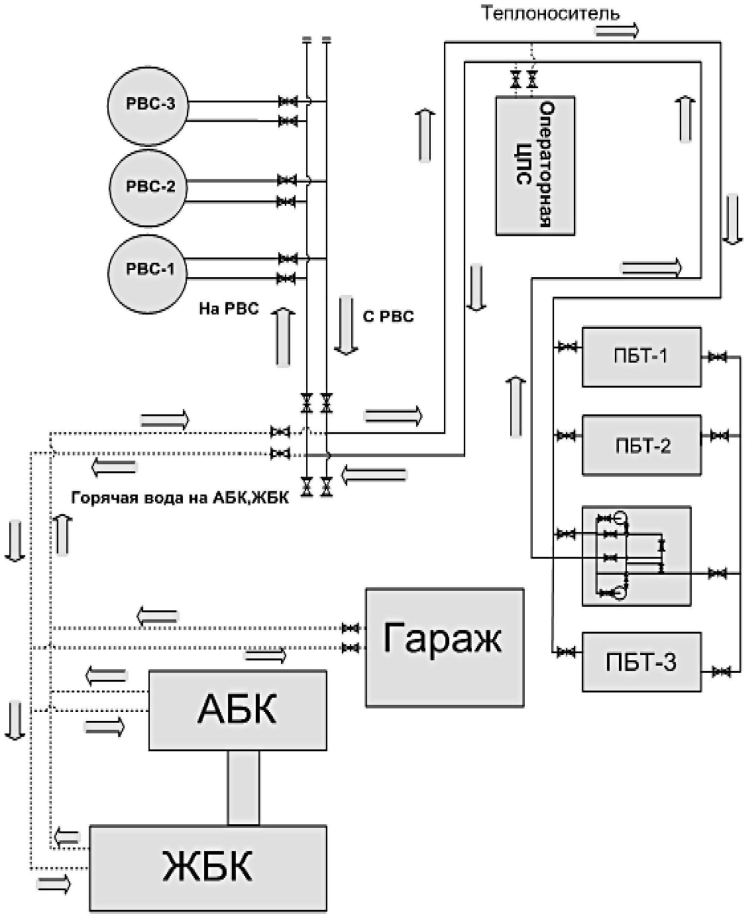


Рис. 2. Схема водяного отопления объектов Тобойского месторождения

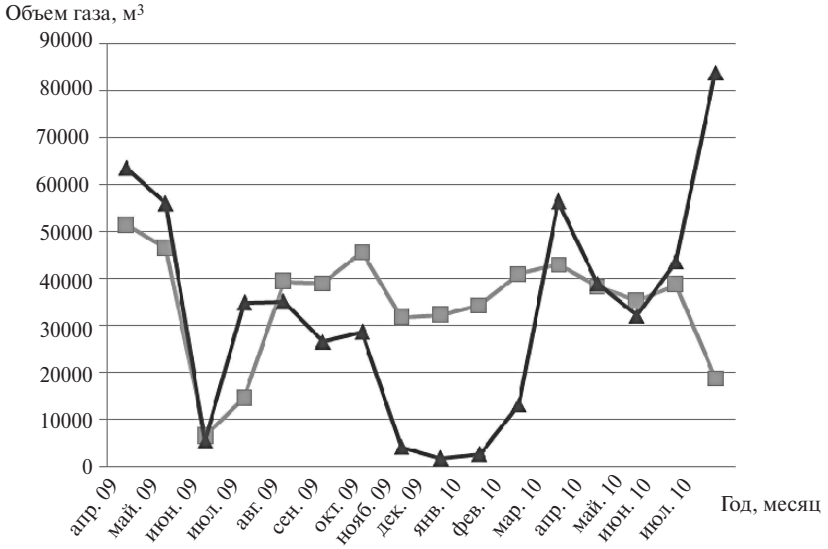


Рис. 3. Расход ПНГ на Тобойском месторождении
(— на ПБТ-1,6; — на ФВД)



Рис. 4. Автономное электроснабжение нефтепромысла АО «Петро Канада»

ность, значительный ресурс, простоту конструкции, компактность, экологичность. Так, микротурбины фирмы Capstone (США) могут работать на газе, содержащем до 7 % сероводорода. При установке непосредственно на скважине МГТЭА могут использовать газ затрубного пространства для выработки электроэнергии. Турбины работают в автоматическом режиме без постоянного присутствия обслуживающего персонала [3].

Поскольку добыча попутного нефтяного газа зависит от газовой насыщенности извлекаемой на дневную поверхность технологической жидкости (рис. 2), то в качестве резервного источника питания могут быть использованы дизельные электростанции или централизованная линия электропередач, которые будут обеспечивать электроэнергией ответственных потребителей в периоды, когда извлечение попутного углеводородного сырья минимально.

Установка микротурбин Capstone C-60 и перевод объектов на водяное отопление за счет нагрева теплоносителя в ПБТ-1,6 позволяют решить две задачи: рационально использовать ПНГ для производства электроэнергии; обеспечить экономию порядка 300 кВт·ч электроэнергии.

Эффективность применения схем автономного электроснабжения объектов нефтедобычи, а также вахтовых поселков, находящихся вдали от единой системы электроснабжения в районах со сложными природно-климатическими условиями, и специальных технических решений подтверждается существующим опытом (например, на нефтепромысле АО «Петро Канада» (рис. 4)) энергоснабжения потребителей с применением генерирующих агрегатов, способных работать на ПНГ.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о возможности использования попутного нефтяного газа для повышения энергоэффективности процессов добычи и подготовки нефти. Кроме того, применение микротурбин, работающих на попутном газе непосредственно на скважинах, обеспечивает создание автономного комплекса добычи нефти и газа. При значительных объемах добываемого газа для энергообеспечения технологических установок нефтепромыслов целесообразно использование турбинных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Книжников, А.** Проблемы и перспективы использования нефтяного попутного газа в России [Текст] / А. Книжников, Н. Пусенкова.— М.: ИМЭМО, 2009.— Вып. 1.— С. 25.

2. **Игнатьев, М.** Самоэнергообеспечение становится одной из самых актуальных отраслевых задач [Текст] / М. Игнатьев // Нефтегазовая вертикаль.— 2004. № 5.— С. 72–74.

3. **Пожидаев, В.М.** Микрогазотурбинные электроагрегаты — новое направление в малой энергетике [Текст] / В.М. Пожидаев // Академия энергетики.— 2005.— № 4.— С. 26–33.

УДК 621.039.51

А.В. Ельшин, А.М. Абдуллаев

СООТНОШЕНИЕ ВЗАИМНОСТИ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА И ЦЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ НА ГРАНИЦЕ КВАДРАТНОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОСЬМИ ПРОБНЫХ ФУНКЦИЙ

В ранних трудах по методу поверхностных гармоник — МПГ (см., например, [1]) при получении конечно-разностных уравнений для распределения нейтронов $\Phi(\vec{r},\vec{\upsilon})$ использовалось разложение сопряженной функции $\Phi^{+}(\vec{r},\vec{\upsilon})$ по полной системе функций от координат, энергии и направления полета нейтронов на границах ячеек. В статье [2] предложено получать конечно-разностные уравнения одновременно и для сопряженной функции $\Phi^{+}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, и для распределения нейтронов $\Phi(\vec{r},\vec{\upsilon})$. Для этого ценность нейтронов в каждой ячейке представляется как линейная комбинация некоторых пробных функций:

$$\Phi_N(\vec{r},\vec{\upsilon})=\sum_{n=0}^{N}\sum_{g=1}^{G}A_{ng}\Psi_{ng}(\vec{r},\vec{\upsilon});$$

$$\Phi_N^{+}(\vec{r},\vec{\upsilon})=\sum_{n=0}^{N}\sum_{g=1}^{G}A_{ng}^{+}\Psi_{ng}^{+}(\vec{r},\vec{\upsilon}). \qquad (1)$$

В выражениях (1) отдельно выделено суммирование по энергетическим группам нейтронов, в которых рассчитывается реактор, так как впоследствии из пробных функций и их функционалов удобно формировать векторы размерностью G и матрицы размерностью $G\times G$. В работе [2] для квадратной решетки (двумерный случай) использовались четыре пробные функции (ПФ) на ячейку (и на группу нейтронов); в предлагаемой статье будет использоваться 8 пробных функций ($N = 7$). Необходимость и важность увеличения числа пробных функций при решении практических задач нейтронно-физического расчета реактора РБМК отмечена, например, в работе [3]. Каждая из восьми ПФ, как традиционно полагается в методе поверхностных гармоник, отличается условиями на границе блока — схемой втекания и протекания токов нейтронов.

Граничные условия для первых четырех ПФ сформулированы, например, в [2]. В следующих ниже выражениях предполагается: нормаль n к границе ячейки направлена наружу; положительное направление тока — «вытекание»; $\theta(E)$ — спектр втекающих нейтронов (как правило, это характеристическая функция группового интервала энергии); используются обозначения

$$\varphi_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{0g}(\vec{r},\vec{\upsilon}),\ \psi_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{1g}(\vec{r},\vec{\upsilon}),$$

$$\psi_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{2g}(\vec{r},\vec{\upsilon}),\ \xi_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{3g}(\vec{r},\vec{\upsilon}).$$

Тогда

$$\frac{1}{4a}\int_0^{\infty}dE\int_{\Gamma}dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,\varphi_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k0};$$

$$\frac{1}{2a}\int_0^{\infty}dE\int_{\Gamma}dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,\psi_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k1};$$

$$\frac{1}{2a}\int_0^{\infty}dE\int_{\Gamma}dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,\psi_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k2}; \qquad (2.1)$$

$$\frac{1}{4a}\int_0^{\infty}dE\int_{\Gamma}dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,\xi_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k3}.$$

Здесь $W_k(r_s)$ — функции координаты на поверхности ячейки, описывающие схемы втекания нейтронов в ячейку (см. рисунок).

В выражениях (2) координата r_s отсчитывается против часовой стрелки от низа первой гра-

ни (правая от центра ячейки на рисунке, перпендикулярная оси x). Первые восемь координатных функций $W_k(r_s)$ имеют вид

$$W_0(r_s)=1;\quad W_1(r_s)=\cos\alpha_j;$$

$$W_2(r_s)=\sin\alpha_j;\quad W_3(r_s)=\cos 2\alpha_j;$$

$$W_4(r_s)=\rho_j;\quad W_5(r_s)=\rho_j\cos\alpha_j;$$

$$W_6(r_s)=\rho_j\sin\alpha_j;\quad W_7(r_s)=\rho_j\cos 2\alpha_j,$$

где $\alpha_j=\frac{\pi}{2}(j-1)$ — угол между осью x и перпендикуляром из центра на j-ю грань ячейки; $\rho_j=(-1)^{j-1}\frac{2}{a}\left[r_s-\frac{a}{2}(2j-1)\right]$ — текущая координата j-й грани; a — длина грани; r_s — координата границы ячейки (так же, как в работе [4]).

Можно заметить, что для первых четырех ПФ координатная функция зависит только от номера грани, тогда как для следующих четырех ПФ функция $W_k(r_s)$ на каждой грани — не константа, а уравнение прямой с угловым коэффициентом $\pm 2/a$. С учетом этого факта сформулируем граничные условия для ПФ с четвертой по седьмую (обозначим $u_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{4g}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, $t_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{5g}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, $t_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{6g}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, $p_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=\Psi_{7g}(\vec{r},\vec{\upsilon})$):

$$\frac{3}{4a}\int_0^\infty dE\int_\Gamma dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,u_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k4};$$

$$\frac{3}{2a}\int_0^\infty dE\int_\Gamma dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,t_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k5};$$

$$\frac{3}{2a}\int_0^\infty dE\int_\Gamma dr_s\times$$

$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,t_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k6};\quad(2.2)$$

$$\frac{3}{4a}\int_0^\infty dE\int_\Gamma dr_s\times$$

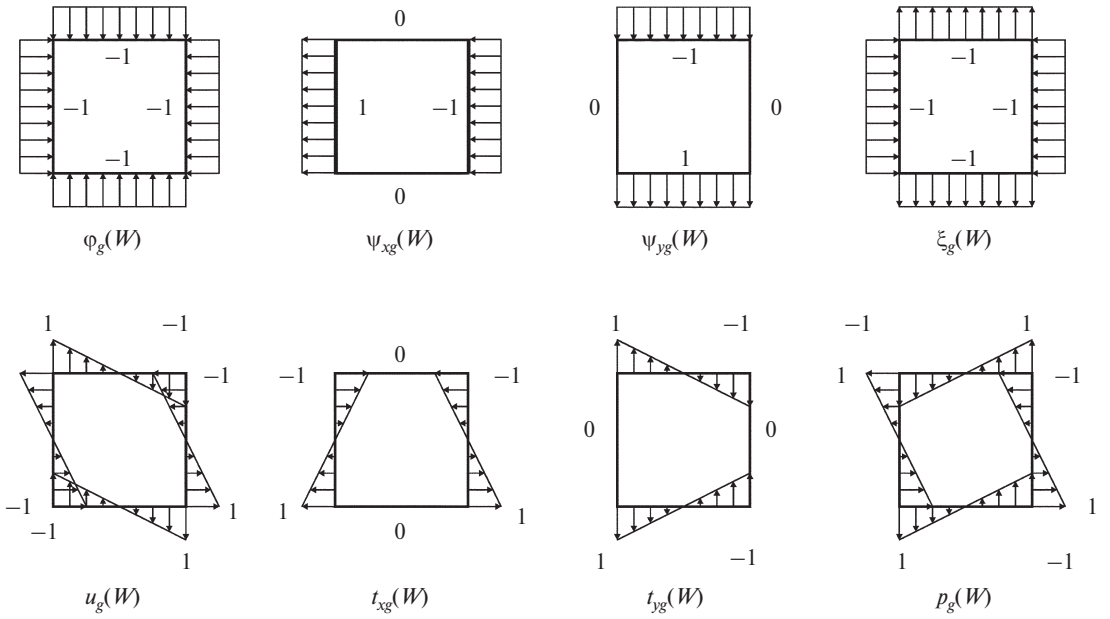
$$\times\int_{4\pi}d\Omega(\Omega,n)\,\theta_{g'}(E)\,W_k(r_s)\,p_g(\vec{r},\vec{\upsilon})=-\delta_{gg'}\delta_{k7}.$$

Условия (2), (3) можно записать в виде

$$\int_{4\pi}(\vec{\Omega},\vec{n})_k\,\Psi_g(\vec{r}_s,\vec{\upsilon})d\Omega=-W_k(r_s)\theta_g(E);$$

$$k=0,\ldots,7.\qquad(3.1)$$

Следует отметить, что ток ценности направлен в другую сторону, чем ток нейтронов. Поэтому граничные условия для пробных функций,



Схемы втекания нейтронов g-й группы восьми первых пробных функций МПГ

с помощью которых представляется решение сопряженного уравнения переноса в ячейке, будут выглядеть следующим образом (отличаются знаком):

$$\int\limits_{4\pi} (\vec{\Omega},\vec{n})_k \; \Psi_g^+(\vec{r}_s,\vec{\upsilon})\, d\Omega = W_k(r_s)\, \theta_g(E). \qquad (5)$$

Таким образом, если пробные функции для распределения нейтронов отвечают различным схемам втекания и протекания нейтронов через ячейку, то пробные функции для сопряженного решения представляют собой ценность нейтронов относительно определенного способа вытекания из нее.

Как уже говорилось, при представлении нейтронов и их ценности в виде (1) МПГ позволяет одновременно получить конечно-разностные уравнения для нахождения и распределения нейтронов и их ценности. Коэффициентами в этих уравнениях служат угловые моменты пробных функций на границах ячеек. Для того чтобы показать сопряженность этих конечно-разностных уравнений, необходимо получить соотношения взаимности между элементами пробных матриц распределения нейтронов и ценности на границах ячеек. В данной статье будет описано получение этих соотношений для случая использования восьми ПФ в квадратной ячейке, т. е. нас будут интересовать не только средние значения потока и ценности на грани, но и их «наклон».

Для получения соотношений взаимности будем исходить из выражения, связывающего в общем случае решения «прямого» и сопряженного уравнений переноса нейтронов:

$$\int\limits_{4\pi} d\Omega \int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma \left(\Omega, n\right) \Psi_{ng}(\vec{r},\vec{\upsilon}) \Psi_{mg}^+(\vec{r},\vec{\upsilon})\, dS = 0. \quad (6)$$

После разложения угловой зависимости распределения нейтронов и ценности на границе ячейки в ряд по сферическим гармоникам и с учетом того, что пробные функции отвечают различным схемам втекания нейтронов и их ценности (все остальные нечетные угловые моменты, кроме первого, «занулены»), из выражения (6) можно получить

$$\int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma \Big[\Psi_{ng}^{(u)+}(r_s,E)\, \Psi_{mg}^{(1)}(r_s,E) +$$

$$+ \Psi_{ng}^{(1)+}(r_s,E)\, \Psi_{mg}^{(u)}(r_s,E) \Big]\, dS = 0. \qquad (7)$$

Величины с верхним индексом «1» — это нормальные к границе ячейки токи нейтронов или ценности (первый угловой момент), а с индексом «*u*» — уровни нейтронов или ценности, т. е. линейная комбинация нулевого и второго угловых моментов (см., например, работу [1]). Если граница ячейки проходит в замедлителе, уровень близок к плотности потока нейтронов (второй угловой момент должен быть мал, так как в замедлителе справедливо диффузионное приближение). Воспользовавшись граничными условиями (4), (5), из уравнения (7) можно получить следующее:

$$\int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma W_n(r_s)\, \theta_{g'}^+(E) \Psi_{mg}^{(u)}(r_s,E)\, dS =$$

$$= \int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma \Psi_{ng'}^{(u)+}(r_s,E) W_m(r_s) \theta_g\left(E\right) dS\,. \qquad (8)$$

Подставляя вместо $\Psi_{ng}(\vec{r},\vec{\upsilon})$ и $\Psi_{mg}^+(\vec{r},\vec{\upsilon})$ различные ПФ, можно получить искомые соотношения взаимности. Ненулевые интегралы в (8) получаются, если подынтегральное выражение — четная функция от r_s, т. е., во-первых, это в случае совпадения m и n, а во-вторых, для пар $m = 1$ и $n = 6$, $m = 6$ и $n = 1$, $m = 2$ и $n = 5$, $m = 5$ и $n = 2$. Рассмотрим первую пару ($n = 0$, $m = 0$):

$$\int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma W_0(r_s)\, \theta_{g'}^+(E) \Psi_{0g}^{(u)}(r_s,E)\, dS =$$

$$= \sum_{j=1}^4 \int\limits_0^\infty dE \int\limits_{\Gamma_j} \theta_{g'}^+(E) \varphi_g^{(u)}(r_s,E)\, dr_s = 4a\varphi_{g'g};$$

$$\int\limits_0^\infty dE \int\limits_\Gamma \Psi_{0g}^{(u)+}(r_s,E) W_0(r_s) \theta_{g'}\left(E\right) dS =$$

$$= \sum_{j=1}^4 \int\limits_0^\infty dE \int\limits_{\Gamma_j} \varphi_{g'}^{(u)+}(r_s,E)\, \theta_g\left(E\right) dr_s = 4a\varphi_{gg'}^+.$$

Так как на каждой грани получаем одинаковые величины, сумму по границе ячейки можно заменить интегрированием по одной грани с положительным уровнем. Таким образом, получаем соотношение взаимности

$$\varphi_{g'g} = \frac{1}{a} \int\limits_0^\infty dE \int\limits_{\Gamma_1} \theta_{g'}^+(E)\, \varphi_g^{(u)}(r_s,E) dr_s =$$

$$= \frac{1}{a} \int\limits_0^\infty dE \int\limits_{\Gamma_1} \varphi_{g'}^{(u)+}(r_s,E)\, \theta_g\left(E\right) dr_s = \varphi_{gg'}^+. \qquad (9)$$

Аналогично составим соотношения для остальных случаев совпадения индексов *m* и *n* (для первых четырех ПФ данные соотношения были получены в [2]):

$$\psi_{g'g} = \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \theta^+_{g'}(E)\,\psi^{(u)}_{xg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \psi^{(u)+}_{xg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s =$$

$$= \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} \theta^+_{g'}(E)\,\psi^{(u)}_{yg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} \psi^{(u)+}_{yg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s = \psi^+_{gg'} \quad (10);$$

(в силу симметрии ячейки для $\psi_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, $\psi_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$ получаем одну матрицу);

$$\xi_{g'g} = \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \theta^+_{g'}(E)\,\xi^{(u)}_{g}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \xi^{(u)+}_{g'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s = \xi^+_{gg'}. \quad (11)$$

В следующих интегралах вычисляется «наклон» пробных функций и соотношения взаимности для них:

$$u_{g'g} = \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \rho_1(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,u^{(u)}_{g}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} u^{(u)+}_{g'}(r_s,E)\,\rho_1(r_s)\,\theta_g(E)\,dr_s = u^+_{gg'}; \quad (12)$$

$$t_{g'g} = \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \rho_1(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,t^{(u)}_{xg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} t^{(u)+}_{xg'}(r_s,E)\,\rho_1(r_s)\,\theta_g(E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_4} \rho_4(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,t^{(u)}_{yg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_4} t^{(u)+}_{yg'}(r_s,E)\,\rho_4(r_s)\,\theta_g(E)\,dr_s = t^+_{gg'} \quad (13)$$

(в силу симметрии ячейки для функций $t_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$, $t_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$ получаем одну матрицу);

$$p_{g'g} = \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \rho_1(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,p^{(u)}_{g}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} p^{(u)+}_{g'}(r_s,E)\,\rho_1(r_s)\,\theta_g(E)\,dr_s = p^+_{gg'}. \quad (14)$$

Особый интерес представляют случаи, когда мы имеем ненулевые интегралы в выражении (6) при несовпадении *m* и *n*, так как при этом соотношения взаимности будут связывать разные ПФ для потока нейтронов и ценности. Рассмотрим первый из таких вариантов — $m = 1$ и $n = 6$:

$$\int_0^\infty dE \int_{\Gamma} W_6(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,\Psi^{(u)}_{1g}(r_s,E)\,dS =$$

$$= \sum_{j=1}^{4} dE \int_{\Gamma_j} \rho \sin\alpha_j\,\theta^+_{g'}(E)\,\psi^{(u)}_{xg}(r_s,E)\,dr_s;$$

$$\int_0^\infty dE \int_{\Gamma} \Psi^{(u)+}_{6g'}(r_s,E)\,W_1(r_s)\,\theta_g(E)\,dS =$$

$$= \sum_{j=1}^{4} \int_0^\infty dE \int_{\Gamma_j} t^{(u)+}_{yg'}(r_s,E)\cos\alpha_j\,\theta_g(E)\,dr_s.$$

При распределении тока по границе ячейки в соответствии с функцией $W_1(r_s)$ (пробная функция $\psi_{xg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$) на гранях 2 и 4, т. е. с нулевым током, уровень меняется от $-\psi_{gg'}$ до $\psi_{gg'}$ и возникает «наклон» уровня. В свою очередь, при распределении тока по границе ячейки в соответствии с функцией $W_6(r_s)$ (пробная функция $t_{yg}(\vec{r},\vec{\upsilon})$) на концах граней 1 и 3 (с нулевым током) имеется некоторый одинаковый уровень, т. е. можно говорить о среднем уровне для этой грани. Исходя из этого, а также из симметрии ячейки (учтем пару $m = 2$ и $n = 5$) запишем

$$\psi_{tg'g} = \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} \rho_2(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,\psi^{(u)}_{xg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= -\frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} t^{(u)+}_{yg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \rho_1(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,\psi^{(u)}_{yg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= -\frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} t^{(u)+}_{xg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s = \overline{t}^+_{gg'}. \quad (15)$$

Аналогично рассуждая, можно получить соотношения для случая $m = 6$ и $n = 1$ (с учетом $m = 5$ и $n = 2$):

$$\overline{t}_{g'g} = \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \rho_1(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,t^{(u)}_{yg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= -\frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} \psi^{(u)+}_{xg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s =$$

$$= \frac{3}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_2} \rho_2(r_s)\,\theta^+_{g'}(E)\,t^{(u)}_{xg}(r_s,E)\,dr_s =$$

$$= -\frac{1}{a}\int_0^\infty dE \int_{\Gamma_1} \psi^{(u)+}_{yg'}(r_s,E)\,\theta_g(E)\,dr_s = \psi^+_{tgg'}. \quad (16)$$

Выражения (9)–(16) представляют собой соотношения взаимности между элементами пробных матриц потока и ценности нейтронов в случае использования восьми пробных функций в кВадратной ячейке, которые будут необходимы для записи выражений для средних по грани значений и наклона уровня нейтронов и их ценности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Laletin, N.I.** Basic Principles for Developing Equations for Heterogeneous Reactors— A Modification of the Homogenization Method [Текст] / N.I. Laletin // Nuclear Science and Engineering.— 1983.— Vol. 85.— P. 133–138.

2. **Ельшин, А.В.** Получение конечно-разностных уравнений для ценности нейтронов в гетерогенном реакторе методом поверхностных гармоник [Текст] / А.В. Ельшин // Атомная энергия.— 2007. Т. 98, Вып. 5.— С. 323–332.

3. **Краюшкин, А.В.** Применение метода поверхностных гармоник в программе расчета РБМК— STEPAN [Текст] / А.В. Краюшкин, А.О. Гольцев, А.А. Ковалишин, Н.И. Лалетин, Н.В. Султанов.— Матер. 13 семинара по проблемам физики реакторов.— Москва. 2–6 сентября 2004.— С. 157–158.

3. **Лалетин, Н.И.** Вывод конечно-разностных уравнений гетерогенного реактора. 1. Квадратная решетка блоков [Текст] / Н.И. Лалетин, А.В. Ельшин. М.— Препринт–3280/5 1980.

УДК 621.12(039)

В.В. Рыбалко

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Одно из важнейших направлений совершенствования энергетических установок (ЭУ) на органическом топливе в начале XXI века — это повышение топливной эффективности, в том числе за счет большей напряженности рабочего процесса.

Значительная напряженность процессов генерации механической и тепловой энергии в установках характеризуется высокими частотами вращения роторов турбомашин, а также большими давлениями и температурами рабочего тела. Современные и вновь создаваемые энергетические установки открытого цикла способны генерировать в одном условном кубическом метре объема конструкции примерно 3–4 МВт мощности при температурах рабочего тела 1600 К и давлениях до 3 МПа и выше.

Как следствие этого, в элементах конструкции современных ЭУ наблюдаются большие напряжения, вызванные механическими и тепловыми нагрузками. Так, например, металл рабочих лопаток современных газовых турбин может работать до 100 тыс. часов при напряжениях примерно 100 МПа и температурах свыше 900 °С. Эти показатели всего несколько десятилетий тому назад конструкторам казались нереальными, так как подобные напряжения соответствовали пределу длительной прочности ($\tau = 100$ ч) существовавших тогда жаропрочных материалов при температурах металла не более 750 °С.

Понятно, что использование новых жаропрочных материалов и современных технологий в энергетических объектах привело к резкому повышению их стоимости. Начальная удельная стоимость вновь создаваемых стационарных энергетических объектов может достигать 100–300 долл./кВт.

Высокая стоимость создаваемых ЭУ и значительный риск тяжелых последствий от аварий потребовали разработки систем раннего обнаружения и предотвращения отказов оборудования. Актуальным становится создание интеллектуальных систем технического диагностирования, позволяющих, как минимум, решать задачу текущего контроля и распознавания технического состояния (ТС) ЭУ.

Известно, что системы автоматического управления (САУ) существующих энергетических установок на органическом топливе одновременно фиксируют до 50 и более параметров рабочего процесса. Для снижения информационной нагрузки на операторов в САУ применяется компьютерная обработка сигналов от датчиков, выделение наиболее информативных параметров и представление оператору сжатой информации, на основе которой можно принимать соответствующее решение.

Несмотря на постоянное совершенствование САУ, диагностирование ЭУ и оценка их технического состояния на основе анализа зарегистрированных параметров чаще всего возлагается на оператора. Опыт эксплуатации показал, что специалист может одновременно контролировать и качественно анализировать показания только нескольких (обычно не более 4–6) приборов и по результатам анализа принимать правильное решение. Понятно, что качество такого решения во многом зависит от квалификации оператора. Повысить достоверность получаемой информации о состоянии энергетических объектов призвана интеллектуальная диагностика.

Перспективные интеллектуальные системы диагностирования должны обязательно содержать процедуры распознавания ТС объектов и вырабатывать рекомендации по обеспечению их работоспособности (рис .1).

Для распознавания состояния объектов наиболее эффективным считают использование нейросетевых технологий [7], но положительных результатов также можно добиться с помощью классических методов статистического анализа (МСА) многомерной эксплуатационной информации (этапы 1–4 на рис. 1) [1–3].

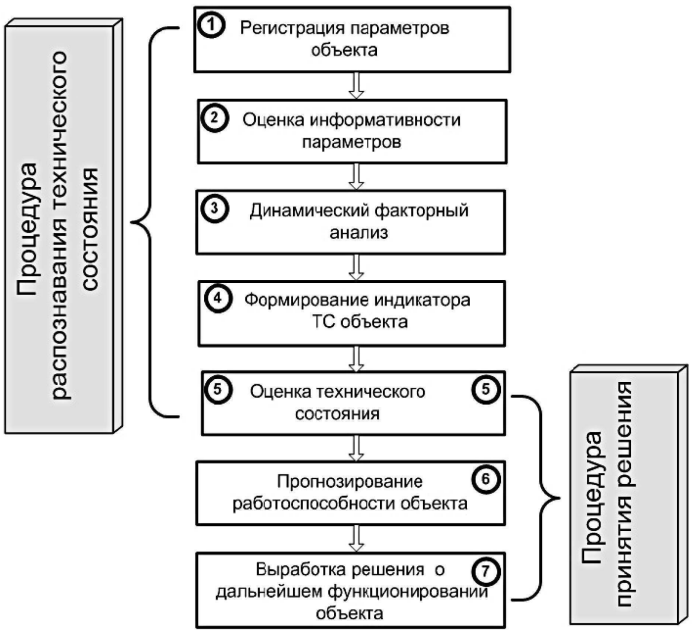


Рис. 1. Структура процедур интеллектуального диагностирования технических объектов

Современные статистические методы позволяют не только одновременно обрабатывать всю совокупность регистрируемых параметров, но и выявлять отклонения рабочего процесса ЭУ от нормы на ранней стадии возникновения отказов. Применение таких методов, даже при существующих САУ, может повысить качество процесса управления и снизить риск отказов, связанных с недостатком информации и ошибками операторов.

Для демонстрации возможностей МСА при решении задачи интеллектуального диагностирования можно рассмотреть множество зарегистрированных параметров газотурбинного двигателя четвертого поколения ГТД 4РМ, используемого в газоперекачивающих агрегатах системы транспортировки газа по магистральным трубопроводам РФ (рис. 2).

В столбцах (см. рис. 2) матрицы находятся зарегистрированные параметры (выделено 13 из 49 параметров), которые приведены к стандартным условиям атмосферы в соответствии с общепринятой методикой. В строках размещены значения параметров из вахтенного журнала, зафиксированные с интервалом в 2 часа (360 записей).

Можно предположить, что первые N_0 архивных записей в журнале всегда соответствуют заведомо работоспособному состоянию объекта. Эти параметры могут быть зафиксированы, например, в период сдачи объекта заказчику или в период государственных испытаний. Этот блок параметров можно считать базовым (нулевым) информационным уровнем, который следует взять за основу при разработке алгоритма распознавания работоспособного состояния ГТД в процессе дальнейшей эксплуатации.

Для создания алгоритма распознавания технического состояния матрица базового блока параметров X размером $N_0 \times p$, например при $p = 13$ и $N_0 = 20$, преобразуется к безразмерному виду $Y_{i,j}$ и одновременно масштабируется в диапазоне $\pm 3\sigma$, где σ — стандартное отклонение параметров относительно математического ожидания $\overline{X}^{\langle j \rangle}$:

$$Y_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \overline{X}^{\langle j \rangle}}{\sigma_{X^{\langle j \rangle}}}, i = \overline{1, N_0}; j = \overline{1, p}.$$

Произведение транспонированной матрицы Y на ее исходное значение дает ковариационную матрицу R размером $p \times p$:

$$R = \frac{Y^T Y}{N}. \quad (1)$$

Умножением матрицы собственных векторов на диагональную матрицу собственных чисел получаем матрицу ортогонального преобразования A размером $p \times p$:

$$A = U\Lambda, \quad (2)$$

где U — матрица собственных векторов ковариационной матрицы R (1); Λ — диагональная матрица собственных чисел, содержащая на главной диагонали собственные числа матрицы R в порядке их убывания.

При умножении матрицы исходных параметров Y на матрицу A формируется ортогональный базис главных компонент — матрица F размером $N_0 \times p$

$$F = YA, \quad (3)$$

обладающий важными для распознавания технического состояния объекта свойствами [1, 4].

Одним из этих свойств является равенство обобщенной дисперсии совокупности результатов наблюдений (параметров объекта) и обобщенной дисперсии главных компонент [4]:

$$\left|R_{[p]}\right| = \left|D\left[\hat{F}\right]\right|. \quad (4)$$

При этом дисперсии главных компонент расположены по главной диагонали матрицы $\left|D\left[\hat{F}\right]\right|$ в соответствии с условием

$$\sigma^2\left[\hat{f}_1\right] \geq \sigma^2\left[\hat{f}_2\right] \geq \ldots \geq \sigma^2\left[\hat{f}_p\right] \quad (5)$$

и дисперсия каждой главной компоненты численно равна соответствующему собственному числу ковариационной матрицы.

Собственные числа хорошо обусловленной ковариационной матрицы R обычно быстро убывают по абсолютной величине (известный принцип «горной осыпи»), и это означает, что в нескольких первых главных компонентах содержится большая часть обобщенной дисперсии (4).

Это дает основание использовать для анализа рабочего процесса только несколько первых главных компонент $F^{\langle j \rangle}$ (обычно $j \leq 2$–3). Более точный отбор количества достаточных для дальнейшего анализа числа первых главных компонент выполняется по критерию β [4]:

$$\beta_j = \frac{\lambda_j}{Sp(R_{[p]})} = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{p} \lambda_j},$$

где λ_j — j-е собственное число ковариационной матрицы. Чем больше β_j, тем значимее соответствующая главная компонента.

Факторные нагрузки параметров на главные компоненты (элементы столбцов матрицы A) свидетельствуют о степени влияния каждого отдельного параметра на объясненную дисперсию конкретной главной компоненты. Это позволяет выполнить селекцию зарегистрированных параметров объекта и использовать для дальнейшего анализа только те параметры, факторные нагрузки которых больше заранее определенного уровня $a_{кр}$ (см. этап 2 на рис. 1). Этот уровень назначает разработчик процедуры контроля технического состояния объекта на основе общих положений метода главных компонент (МГК). Обычно рекомендуется принимать нижний уровень факторных нагрузок на первую главную компоненту не менее 0,70, т. е. при отборе контролируемых параметров проверяют условие $a_{i1} \geq a_{кр} = 0{,}70$ [2–5].

Таким образом, если при анализе матрицы параметров Y размером $N_0 \times p$, принятой за базовую, рассчитанные факторные нагрузки на первую главную компоненту меньше $a_{кр}$, то в дальнейшем эти параметры не учитываются в диагностической модели.

Для первой главной компоненты можно вычислить относительную долю объясненной дисперсии, формируемой факторными нагрузками выделенной группы параметров объекта:

$$\overline{D}^{\langle 1 \rangle} = \sigma^2 \left[F^{\langle 1 \rangle} \right] = \frac{\sum_{i=1}^{p} a_{i,1}^2}{p}, \qquad (6)$$

где p — количество выделенных для анализа параметров объекта*.

Процедура текущей оценки (мониторинг) технического состояния объекта (в данном случае ГТД 4РМ) на основе метода главных компонент содержит следующие этапы:

выделение базового массива параметров (матрица X_0) при соответствующем обосновании границ массива N_0, p;

стандартизация параметров — создание матрицы Y_0;

получение ковариационной матрицы R_0 по формуле (1);

вычисление λ_j — собственных чисел этой ковариационной матрицы, создание диагональной матрицы собственных чисел Λ и затем матрицы собственных векторов U [2, 3];

вычисление ортогональной матрицы факторных нагрузок A_0 по зависимости (2), анализ которой позволит определить количество главных компонент, применяемых для параметрического диагностирования (по критерию β_j);

выделение из общего массива рассматриваемых признаков (параметров) только тех параметров, факторные нагрузки которых на первую главную компоненту удовлетворяют условию $a_{i1} \geq a_{кр}$;

вычисление $\overline{D}_0$ — относительной объясненной дисперсии факторных нагрузок (6) на первую главную компоненту для выделенной группы параметров, где нижний индекс означает дисперсию для базового (нулевого) массива данной группы параметров [4, 6].

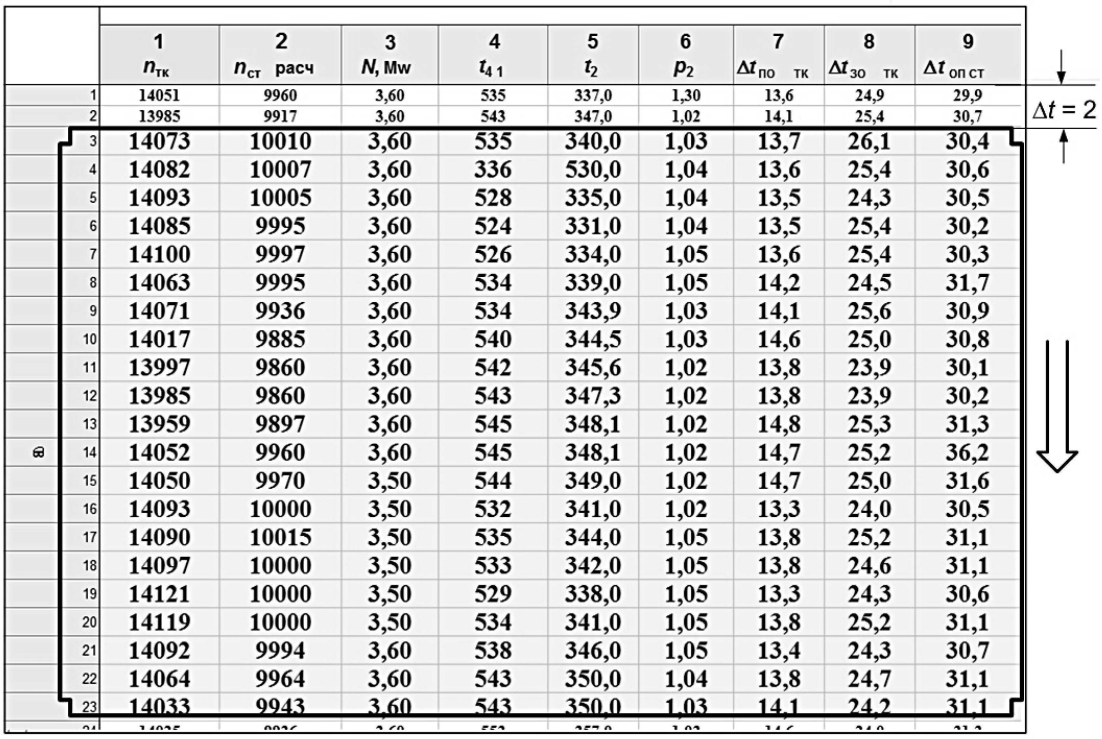
На этом заканчивается формирование процедуры мониторинга ТС двигателя.

Следующим шагом является сам процесс оценки ТС, который заключается в последовательном вычислении матрицы факторных нагрузок A для очередного массива параметров Y_i, полученного в результате смещения границ исходного массива фиксированного размера на определенный шаг Δt (этапы 3, 4 на рис.1). Следовательно, каждый следующий исследуемый массив параметров должен иметь матрицу Y_i со столбцами с $(1 + \Delta t)$-го по $(N_0 + \Delta t)$-й и строками с 1-й по p-ю исходного массива.

Схема формирования нового массива анализируемых параметров при $\Delta t = 2$ показана на рис.2. Размер шага сканирования исходной матрицы параметров определяет пользователь, а количество шагов зависит от размера (числа строк) анализируемой матрицы параметров. При уменьшении шага Δt увеличивается время анализа и повышается его качество, а при увеличении снижается точность локализации состояния ТС.

По результатам сканирования всего массива зафиксированных и предварительно выделенных для анализа параметров вычисляются от-

* Верхний индекс в выражении относительной дисперсии (6) в дальнейшем опускаем.



	1 $n_{тк}$	2 $n_{ст\ расч}$	3 N, Mw	4 $t_{4\,1}$	5 t_2	6 p_2	7 $\Delta t_{по\ тк}$	8 $\Delta t_{зо\ тк}$	9 $\Delta t_{оп\ ст}$
1	14051	9960	3,60	535	337,0	1,30	13,6	24,9	29,9
2	13985	9917	3,60	543	347,0	1,02	14,1	25,4	30,7
3	14073	10010	3,60	535	340,0	1,03	13,7	26,1	30,4
4	14082	10007	3,60	336	530,0	1,04	13,6	25,4	30,6
5	14093	10005	3,60	528	335,0	1,04	13,5	24,3	30,5
6	14085	9995	3,60	524	331,0	1,04	13,5	25,4	30,2
7	14100	9997	3,60	526	334,0	1,05	13,6	25,4	30,3
8	14063	9995	3,60	534	339,0	1,05	14,2	24,5	31,7
9	14071	9936	3,60	534	343,9	1,03	14,1	25,6	30,9
10	14017	9885	3,60	540	344,5	1,03	14,6	25,0	30,8
11	13997	9860	3,60	542	345,6	1,02	13,8	23,9	30,1
12	13985	9860	3,60	543	347,3	1,02	13,8	23,9	30,2
13	13959	9897	3,60	545	348,1	1,02	14,8	25,3	31,3
14	14052	9960	3,60	545	348,1	1,02	14,7	25,2	36,2
15	14050	9970	3,50	544	349,0	1,02	14,7	25,0	31,6
16	14093	10000	3,50	532	341,0	1,02	13,3	24,0	30,5
17	14090	10015	3,50	535	344,0	1,05	13,8	25,2	31,1
18	14097	10000	3,50	533	342,0	1,05	13,8	24,6	31,1
19	14121	10000	3,50	529	338,0	1,05	13,3	24,3	30,6
20	14119	10000	3,50	534	341,0	1,05	13,8	25,2	31,1
21	14092	9994	3,60	538	346,0	1,05	13,4	24,3	30,7
22	14064	9964	3,60	543	350,0	1,04	13,8	24,7	31,1
23	14033	9943	3,60	543	350,0	1,03	14,1	24,2	31,1

Рис. 2. Схема выделения и последовательного смещения на шаг $\Delta t = 2$ массива параметров с целью формирования вектора факторных нагрузок параметров на первую главную компоненту

носительные объясненные дисперсии факторных нагрузок параметров на первую главную компоненту $\overline{D}_i$, $i = 0, 1, ..., (N - N_0)/\Delta t$ (см. этапы 4, 5 на рис. 1). Вектор значений относительных значений дисперсий содержит диагностическую информацию о техническом состоянии объекта.

Так, например, для двигателя ГТД 4РМ из матрицы эксплуатационных параметров по условию $a_{i1} \geq a_{кр}$ выделено только $p = 9$ наиболее информативных. Для этой группы параметров по указанному выше алгоритму вычислены относительные значения объясненной дисперсии нагрузок параметров на первую главную компоненту во всем диапазоне измерения (рис. 3).

Как показано на рис. 3, на определенных этапах анализа состояния двигателя — примерно в точках № 80 и № 150 — выявлено резкое изменение относительной объясненной дисперсии (диагностический признак ТС).

Этот признак является индикатором технического состояния двигателя.

На рис. 3 видно, что при дальнейшей эксплуатации двигателя значение индикатора ТС снижается почти до исходного уровня. Это может быть следствием управляющего воздействия оператора, проведения технического обслуживания (ТО) или изменения условий эксплуатации.

При выявлении факта изменения индикаторного сигнала ТС объекта следует выполнить детальный анализ тренда тех параметров, для которых уровни факторных нагрузок на первую главную компоненту отличаются от начальных значений при определенной наработке объекта (см. зоны I, II на рис.3). Это несложно сделать по вектору факторных нагрузок $A^{\langle 1 \rangle}$. Для рассмотренного выше примера существенное изменение факторных нагрузок зафиксировано для трех параметров под номерами 3, 4, 5. Графики изменения этих параметров во всем диапазоне контроля ($j = 0, 1, ..., N$) показаны на рис. 4.

Анализ показал, что выявленное изменение $\overline{D}_i$ может быть вызвано следующими причинами: ухудшением качества смазочного масла; перегрузкой двигателя при эксплуатации в тяжелых условиях; механическими повреждениями в подшипниках опор двигателя.

Вероятность последнего незначительна, так как одновременное нарушение работоспособ-

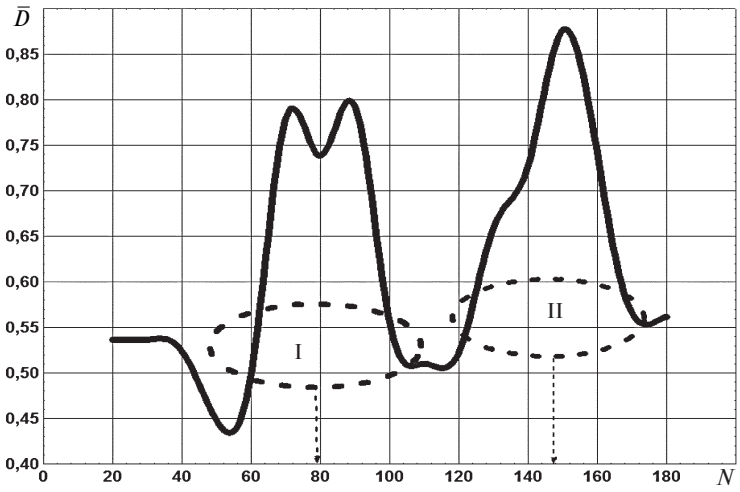


Рис. 3. Значения относительной объясненной дисперсии нагрузок параметров ($p = 9$) на первую главную компоненту:
I, II — зоны отклонения ТС объекта от нормы

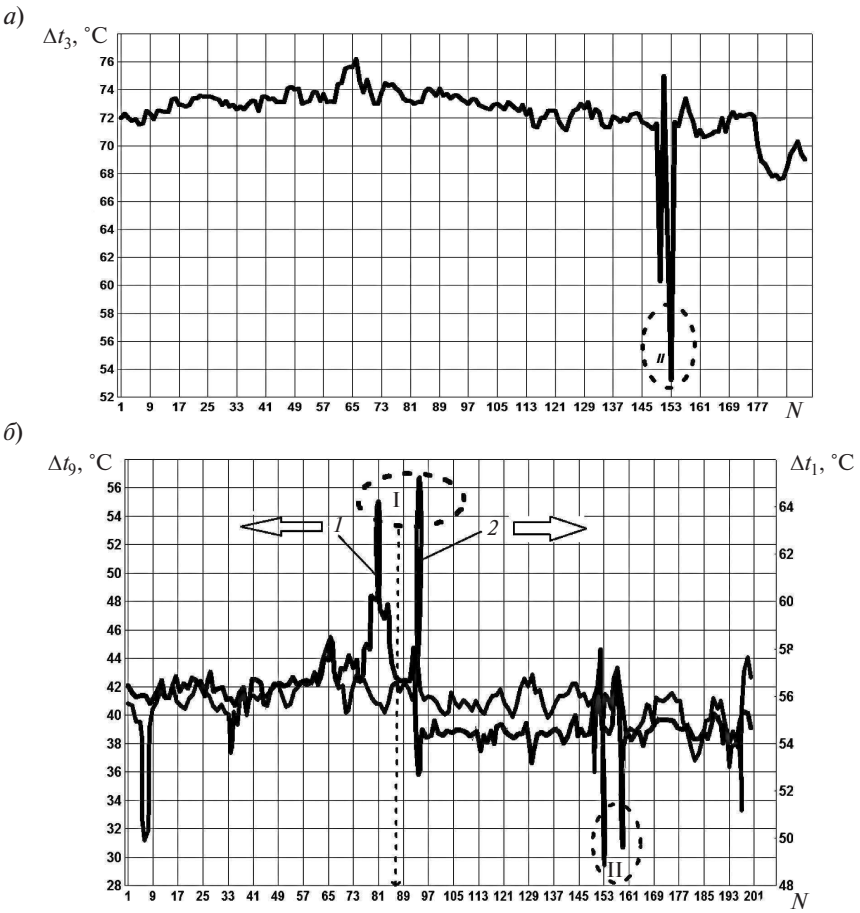


Рис. 4. Изменение параметров ГТД 4РМ с увеличением наработки:

а — приращение температуры смазочного масла в подшипнике передней; опоры турбокомпрессора (ТК); *б* — приращение температуры смазочного масла в подшипнике силовой турбины (*2*) и в подшипнике задней опоры ТК (*1*)

ности всех подшипников опор ГТД — событие чрезвычайно редкое. Поэтому, вероятнее всего, причинами являются одна из двух (или обе сразу) первых.

Зависимости на рис. 4 подтверждают выявленное ранее по критерию $\overline{D}$ отклонение ТС двигателя от нормы. Действительно, в указанном диапазоне контроля наблюдалось заметное изменение величины подогрева смазочного масла в подшипниках опор двигателя: $\Delta t_м = t_{вых} - t_{вх}$, где $t_{вых}$ — температура смазочного масла на выходе их подшипника, $t_{вх}$ — температура масла на входе в подшипник. Величина $\Delta t_м$ обычно имеет четкие ограничения по верхнему пределу. Его превышение вызывает серьезную аварию двигателей.

При проверке качества смазочного масла заметные изменения основных показателей не выявлены. Это позволяет утверждать, что причиной изменения указанных параметров рабочего процесса стала эксплуатация ГТД в тяжелых условиях, что вызвало повышенную осевую и радиальную нагрузку подшипников и, как следствие, увеличение подогрева температуры смазочного масла. Чаще всего возрастание осевой нагрузки на подшипники происходит в холодное время года, когда при повышенной плотности воздуха резко увеличиваются осевые усилия на роторы турбомашин, а существующая система компенсации таких нагрузок не справляется с поставленной задачей.

Возможной причиной увеличения $\Delta t_м$ (зона I на рис. 4) может быть также длительная эксплуатация двигателя при повышенных (номинальных) режимах.

Детальный анализ эксплуатационной документации подтвердил справедливость последней гипотезы.

Предложенный метод оценки ТС энергетических объектов на основе созданного статистического индикатора состояния позволяет уверенно распознавать явные тренды одного или нескольких параметров в режиме реального времени. Как показано выше, однозначно распознаются скачкообразные изменения одного или сразу нескольких параметров. Но главное достоинство предлагаемого метода контроля ТС заключается в том, что появляется возможность выявления предпосылок к отказам при незначительных отклонениях регистрируемых параметров.

Как правило, при возникновении дефектов в отдельном узле сложного технического объекта одновременно изменяются значения нескольких параметров (давление и температура рабочих сред, частота вращения, параметры вибрации и т. п.). Эти изменения могут быть настолько незначительными, что даже не фиксируются САУ. Однако анализ комплекса параметров предложенным методом позволяет выявить эти отклонения и тем самым предотвратить развитие дефекта в отказ или в аварию.

Работоспособность предложенного метода оценки ТС объектов энергетики на основе комплексного анализа эксплуатационной информации дополнительно подтверждена многочисленными машинными экспериментами при имитационном моделировании параметрических отказов сложных технических систем.

Рассмотренная процедура оценки технического состояния ГТД в эксплуатации может быть применена для различных энергетических объектов, для которых периодически фиксируются параметры рабочего процесса. Применение данного метода требует соблюдения некоторых принципов:

все измеренные параметры (строки матрицы X) должны принадлежать к определенному диапазону изменений мощности объекта. Это условие в литературе называют принципом равноважности регистрируемых параметров в различные моменты времени;

каждый из зарегистрированных параметров (столбец матрицы X) должен иметь одинаковую важность при оценке технического состояния объекта (принцип равноважности признаков в текущий момент времени). Данное условие, чаще всего, несложно обеспечить за счет стандартизации параметров, при которой каждый из них становится безразмерным с определенным диапазоном вариации, например от -3σ до $+3\sigma$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Халафян, А.А.** Statistica 6. Статистический анализ данных [Текст] / А.А. Халафян.— М.: ООО «Бином-Пресс», 2008.— 512 с.

2. **Дуброва, Т.А.** Статистические методы прогнозирования [Текст]: Учебное пособие для вузов / Т.А. Дуброва.— М: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.

3. **Айвазян, С.А.** Классификация многомерных наблюдений [Текст] / С.А. Айвазян, З.И. Бежаева, О.А. Староверов.— М.: Статистика. 1974.

4. **Дубров, А.М.** Многомерные статистические методы [Текст]: Учебник / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин.— М.: Финансы и статистика, 2003.

5. **Турбович, И.Т.** Опознание образов [Текст] / И.Т. Турбович, В.Г. Гитис, В.К. Маслов.— М.: Наука, 1971.

6. **Сошникова, Л.А.** Многомерный статистический анализ в экономике [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Л.А. Сошникова, В.Н. Тамашевич, М. Шебер / Под ред. проф. В.Н. Тамашевича.— М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999.

7. Нейронные сети. STATISTICA Neural networks: Методология и технология современного анализа данных [Текст] / Под ред. В.П. Боровикова.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Горячая линия— Телеком, 2008.

УДК621.311

А.В. Севастьянова

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ АНАЛИЗА СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В связи со стремительным ростом потребления электроэнергии в крупных городах, таких, как Санкт-Петербург и Москва [4], происходит интенсивное развитие сетевой инфраструктуры энергосистем. Строительство новых электростанций и ввод в эксплуатацию дополнительных элементов электрической сети требуют определения технического эффекта от выполнения данных мероприятий, что возможно путем оценки схемно-режимных особенностей энергосистемы с учетом ввода нового оборудования.

Актуальна и обратная задача — определение энергорайонов, в которых существует необходимость усиления электрических сетей. Такое исследование целесообразно проводить как в существующей, так и в перспективных схемах.

В случае, когда для решения определенной проблемы энергорайона (например, высокие токовые загрузки ЛЭП или трансформаторов) предлагается ввод дополнительных элементов электрической сети, как правило, проводят ряд расчетов нормальных и послеаварийных режимов работы электросети рассматриваемого энергоузла с целью оценки технического эффекта от реализации планируемого мероприятия. Вместе с тем усиление электрической сети в одном из энергорайонов может влиять на режимные параметры смежных районов, например в послеаварийных режимах работы. В большинстве случаев данное обстоятельство не учитывают ввиду трудоемкости задачи, которая требует оценки влияния ввода дополнительного элемента электрической сети на нормальный и послеаварийные режимы работы всей энергосистемы. Электрические режимы, которые наиболее опасны по условиям поддержания токовой загрузки элементов электроэнергетической системы в пределах допустимых значений и возможности обеспечения удовлетворительных уровней напряжения, — это послеаварийные режимы работы электрической сети в ремонтных схемах. При практических расчетах это означает необходимость рассмотрения множества вариантов аварийных отключений элементов электрической сети в ремонтных схемах.

Таким образом, актуальна разработка алгоритмов для автоматизации комплексного анализа схемно-режимных особенностей энергосистем, включая оценку допустимости режимных параметров как в нормальной, так и в ремонтных схемах. Такие алгоритмы могут быть использованы как для исследования существующей схемы с целью выявления энергоузлов, в которых требуется усиление сети, так и для оценки технического эффекта от предлагаемых вводов оборудования электрических сетей.

В нашей работе представлен алгоритм «Оценка допустимости режима», разработанный для анализа схемно-режимных особенностей энергосистемы в нормальных и ремонтных схемах электрической сети для случая аварийного отключения одного из электросетевых элемен-

тов. В статье дан пример применения разработанного алгоритма для выявления энергоузлов, режимные параметры которых выходят за пределы длительно допустимых значений в послеаварийных режимах работы энергосистемы Санкт-Петербурга.

Блок-схема алгоритма «Оценка допустимости режима» представлена на рисунке. Алгоритм «Оценка допустимости режима» предложен для расчета токовой загрузки электросетевых элементов и определения допустимости отклонений уровней напряжения на секциях шин подстанций энергосистемы в послеаварийных режимах работы.

Как видно из данных, приведенных на рисунке, алгоритм «Оценка допустимости режима» состоит из двух основных частей. Первый блок алгоритма отражает отключение одного из элементов электрической сети, что эквивалентно выводу в ремонт ветви схемы. При этом производится анализ токовой загрузки электросетевых элементов, уровней напряжения в сети и проверка соответствия режимных параметров требованиям [1–3]. Если после отключения ветви токовая загрузка какого-либо элемента электрической сети превышает длительно допустимое значение или определено недопустимое отклонение напряжения на шинах одной из подстанций, выполняется запись результатов расчета режима с указанием названия выведенной в ремонт ветви.

В случае, когда после вывода ветви в ремонт контролируемые режимные параметры остаются в области допустимых значений, производится последовательное отключение оставшихся в работе ветвей, что соответствует аварийному отключению элемента в ремонтной схеме («Блок 2 — Аварийное отключение ветви» на рисунке). Если в рассматриваемых схемно-режимных условиях наблюдаются недопустимые токовые загрузки электросетевых элементов или недопустимые отклонения уровней напряжения, выполняется запись результатов расчета режима и названий отключенных ветвей.

Следует отметить, что отключение некоторых элементов электрической сети может приводить к нарушению сходимости итерационного процесса расчета установившегося режима. В этом случае информация о нарушении сходимости режима и название отключенного элемента (или элементов) записывается в список результатов (в блок-схеме алгоритма данные действия не отображены).

В результате работы алгоритма в блоке 1 формируется список ветвей, вывод в ремонт которых может приводить к недопустимым токовым загрузкам электросетевых элементов или к значительным отклонениям уровней напряжения на секциях шин подстанций. Полученный список при исследовании установившихся режимов работы энергосистемы эквивалентен списку ветвей, аварийное отключение которых в нормальной схеме приводит к недопустимому изменению режимных параметров.

Отвечая на вопрос, соответствует ли рассматриваемый электрический режим параметру надежности по принципу N–1, получаем, что, если в списке результатов работы первого блока алгоритма присутствует хотя бы одна ветвь, рассматриваемый режим работы электрической сети не удовлетворяет требованиям к надежности работы по условию выполнения принципа N–1.

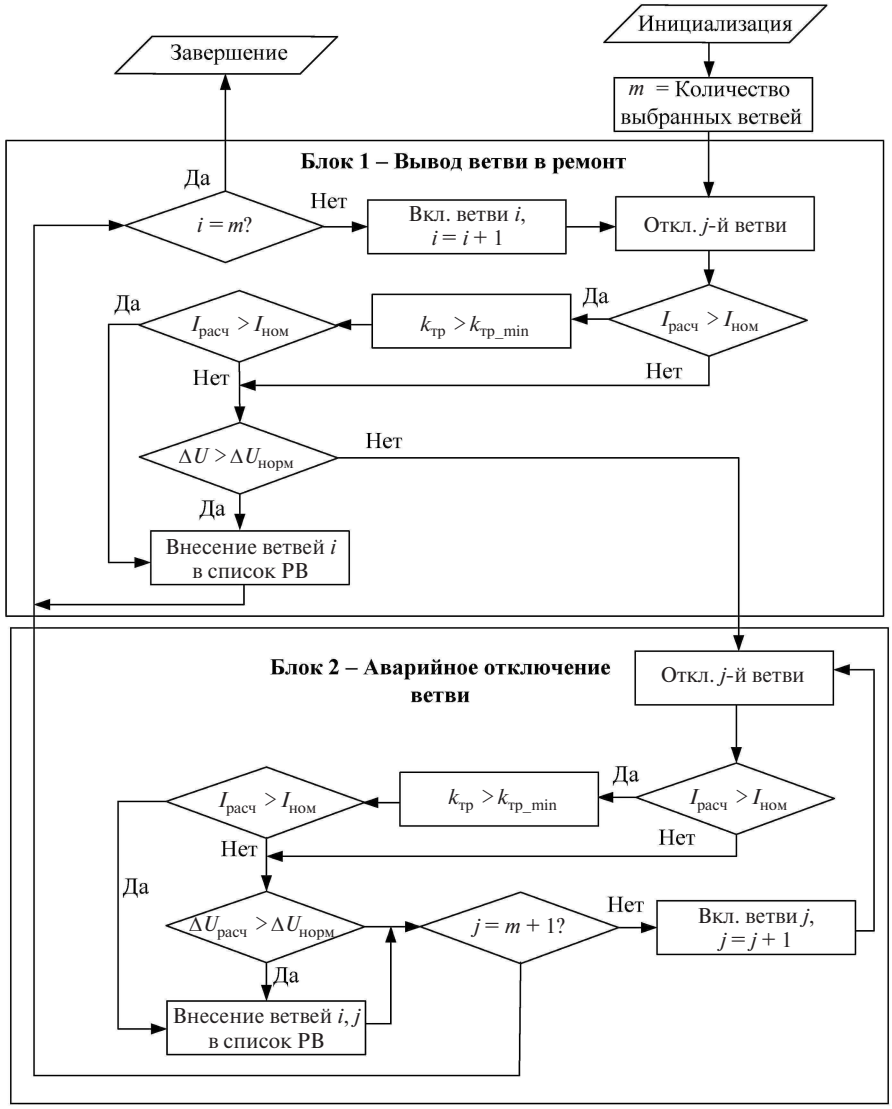
Также в результате работы алгоритма формируется список сочетаний «ремонт плюс авария», представляющий собой список неблагоприятных наложений аварий на ремонт, при которых контролируемые режимные параметры выходят за область допустимых значений.

Таким образом, указанные результаты могут быть применены для выявления электрических режимов в нормальных и ремонтных схемах, не отвечающих условию выполнения принципа N–1.

В качестве расчетного примера с помощью алгоритма «Оценка допустимости режима» было проведено исследование электрической сети 110 кВ Санкт-Петербурга.

Были приняты к рассмотрению все ЛЭП 110 кВ, а также все трансформаторы и автотрансформаторы с низшим напряжением 110 кВ.

Ввиду того, что предлагаемый алгоритм моделирует аварийное отключение элементов электрической сети в ремонтной схеме, для исключения из рассмотрения наложений аварий на ремонты ЛЭП, находящихся электрически далеко друг от друга, энергосистема Ленинградской области была условно разбита на несколько районов: Центральный энергорайон — Санкт-Петербург; Западный район — Гатчинские, Лужские и Кингисеппские электросети; Восточный район — Пригородные, Тихвинские, Новоладож-



Блок-схема алгоритма «Оценка допустимости режима»

ские, Лодейнопольские электросети; Северный район — Выборгские электросети.

В результате работы алгоритма были выявлены элементы электрической сети, аварийное отключение которых в нормальной схеме приводит к высоким токовым загрузкам (перегрузкам) смежных ЛЭП, а также к значительному отклонению уровней напряжения. Наиболее значительное количество таких электросетевых элементов относится к Центральному энергорайону, то есть к электрической сети Санкт-Петербурга. Следует отметить, что количество выявленных электросетевых элементов, отключение которых в нормальной схеме ведет к перегрузкам смежных ЛЭП и трансформаторов в энергосистеме города Санкт-Петербурга сопоставимо с количеством проблемных энергоузлов в энергосистеме Ленинградской области. Данное наблюдение указывает на тот факт, что прогнозируемый рост потребления электроэнергии в Санкт-Петербурге требует развития сетевой инфраструктуры и усиления сети 110 кВ.

В результате работы алгоритма был получен список опасных аварийных отключений в ремонтных схемах, что при исследовании установившихся режимов работы энергосистем эквивалентно одновременному отключению двух электросетевых элементов. Наибольшее коли-

чество «опасных» двойных отключений приходится на Северный и Западный энергорайоны, что объясняется большим количеством протяженных двухцепных транзитов 110 кВ, связывающих центры питания (чаще всего подстанции 330 кВ) и осуществляющих электроснабжение ряда крупных подстанций. При одновременном отключении двух параллельных участков транзита, происходит деление сети, нагрузка подстанций транзита ложится на один центр питания и осуществляется одностороннее электроснабжение, что в ряде случаев приводит к перегрузкам ЛЭП.

Таким образом, при реализации алгоритма «Оценка допустимости режима» был получен список энергорайонов, где требуется усиление электрической сети, соответствующий общеизвестным проблемам существующей энергосистемы Санкт-Петербурга.

Следовательно, предлагаемый алгоритм может применяться для исследования перспективных схем с целью выявления необходимости дополнительного усиления сети и оценки технической эффективности намеченных к реализации вводов оборудования.

Алгоритм «Оценка допустимости режима» может быть также эффективно применен при выборе варианта усиления электрической сети; при этом учитывается влияние вводов электросетевых элементов на функционирование энергосистемы как в нормальных, так и в ремонтных схемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 13109–97.** Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]— введ. с 01.01.1999— М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]/ Минэнерго РФ.— Утв. 13.01.2003; введ. с 01.07.2003—СПб.: ЦОТПБСППО, 2005.— 284 с.

3. Правила устройства электроустановок [Текст]/ Минэнерго РФ.— Утв. 08.07.2002.— изд. 7-е. –М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. –176 с.

4. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]— http://www.gks.ru

УДК 621.315.17

Ю.В. Соловьев, Е.Н. Тонконогов

О ВЛИЯНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИЩЕННЫХ ПРОВОДОВ ВЛ-35 кВ НА ОТКЛЮЧАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С появлением новых технологических решений в электроэнергетике прослеживается четкая тенденция к применению в системах электроснабжения 6–35 кВ современного электротехнического оборудования с не изученными до конца свойствами: изолированных и защищенных проводов, полимерных изоляционных конструкций, вакуумных и элегазовых коммутационных аппаратов, реклоузеров, длинно-искровых и мультикамерных разрядников. Это, в свою очередь, требует внесения соответствующих уточнений при решении классических задач, в частности анализе величин токов короткого замыкания (КЗ) при выборе коммутационного оборудования в сетях среднего напряжения.

Теоретические основы и методики анализа токов КЗ в электрических сетях среднего напряжения отражены в фундаментальных работах российских и зарубежных ученых [1–3], в технических стандартах [4]. Однако ранее вы-

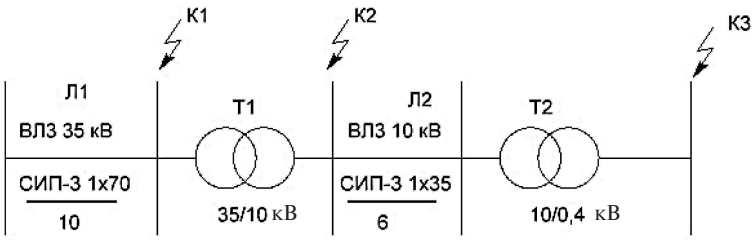


Рис. 1. Расчетная схема для анализа величины токов КЗ в точках К1, К2, К3

полненные работы не могли в полной мере учесть появление в сетях среднего напряжения современного оборудования с новыми эксплуатационными свойствами и характеристиками. В связи с этим актуально проведенное нами исследование, цель которого — анализ влияния эксплуатационных свойств защищенных проводов ВЛ сетей среднего напряжения на величину токов КЗ и выбор коммутационных аппаратов по отключающей способности.

Исследование проведено применительно к упрощенной расчетной схеме, представленной на рис. 1. С целью анализа влияния эксплуатационных характеристик защищенных проводов на величину тока КЗ на разных ступенях среднего напряжения в рассматриваемой схеме предусмотрено: ВЛЗ 35 кВ с применением провода марки СИП-3 1×70 длиной 10 км; ВЛЗ 10 кВ с применением провода марки СИП-3 1×35 длиной 6 км. В качестве эксплуатационных характеристик защищенных проводов, учитываемых в электрических расчетах, приняты их активное и реактивное сопротивления. Вследствие наличия защитной полимерной оболочки проводов, а также уменьшенных межфазных расстояний на ВЛ рассматриваемые характеристики будут отличаться от таковых для случая неизолированных проводов. Для указанных марок защищенных проводов эти характеристики сведены в табл. 1, где также приведены для сравнения данные для неизолированных проводов марок АС 70 для ВЛ 35 кВ и А 35 для ВЛ 10 кВ. В расчетной схеме приняты номинальные мощности трансформаторов Т1 и Т2 $S_{\text{Т1 ном}}$ = = 2,5 МВА, $S_{\text{Т2 ном}}$ = 63 кВА; напряжения КЗ трансформаторов составляют соответственно $U_{\text{к1}} = 6{,}5\,\%$, $U_{\text{к2}} = 4{,}5\,\%$; мощность КЗ на шинах питающей подстанции $S_{\text{к ш}} = 400$ МВА.

В расчетах за базисную величину мощности принята $S_{\text{б}} = 100$ МВА. Базисные напряжения в рассматриваемых точках системы приняты следующими: в точке К1 $U_{\text{б1}} = 37$ кВ; в точке К2 $U_{\text{б2}} = 10{,}5$ кВ; в точке К3 $U_{\text{б3}} = 0{,}4$ кВ. Схема замещения, соответствующая расчетному варианту (рис. 1), с полученными базисными сопротивлениями элементов приведена на рис. 2.

Реактивное сопротивление питающей системы

$$X_{\text{сб}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н ш}}} = \frac{100}{400} = 0{,}25.$$

Реактивное сопротивление ВЛЗ 35 кВ

$$X_{\text{Л1б}} = x_0 l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б1}}^2} = 0{,}291 \cdot 10 \cdot \frac{100}{37^2} = 0{,}21,$$

где x_0 — погонное реактивное сопротивление защищенного провода марки СИП-3 1×70, x_0 = = 0,291 Ом/км.

Таблица 1

Сравнительные эксплуатационные характеристики проводов

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Погонные сопротивления, Ом/км			
	Неизолированный провод		Защищенный провод	
	r_0	x_0	r_0	x_0
10	0,98	0,38	0,87	0,31
35	0,43	0,40	0,44	0,29

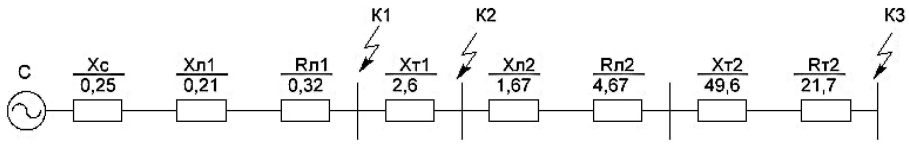


Рис. 2. Схема замещения

Активное сопротивление ВЛЗ 35 кВ

$$R_{Л1б} = r_0 l \frac{S_б}{U_{б1}^2} = 0,443 \cdot 10 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,32,$$

где r_0 — погонное активное сопротивление защищенного провода марки СИП-3 1×70, x_0 = = 0,443 Ом/км.

Реактивное сопротивление трансформатора Т1 35/10 кВ

$$X_{Т1б} = \frac{U_{к1}}{100} \frac{S_б}{S_{т ном}} = \frac{6,5}{100} \frac{100}{2,5} = 2,6.$$

Реактивное сопротивление ВЛЗ 10 кВ

$$X_{Л2б} = x_0 l \frac{S_б}{U_{б1}^2} = 0,307 \cdot 6 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 1,67,$$

где x_0 — погонное реактивное сопротивление защищенного провода марки СИП-3 1×35, x_0 = = 0,307 Ом/км.

Активное сопротивление ВЛЗ 10 кВ

$$R_{Л2б} = r_0 l \frac{S_б}{U_{б1}^2} = 0,868 \cdot 6 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 4,72,$$

где r_0 — погонное активное сопротивление защищенного провода марки СИП-3 1×35, x_0 = = 0,868 Ом/км.

Сопротивления трансформатора Т2 10/0,4 кВ:

активное

$$R_{Т2б} = \frac{\Delta P_k}{S_{Т2ном}^2} U_{б2}^2 = \frac{1,97 \cdot 10^3}{10^4 \cdot 10^6} 10,5^2 \cdot 10^6 = 21,7,$$

где ΔP_k — потери короткого замыкания в трансформаторе Т2, ΔP_k = 1,97 кВт;

реактивное

$$X_{Т2б} = \frac{u_{к2}}{100} \frac{U_{б2}^2}{S_{Т2ном}} = \frac{4,5}{100} \frac{10,5^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^3} = 49,6.$$

Произведем расчет результирующих эквивалентных сопротивлений до расчетных точек К3.

Для точки К1: $R_{рез1\ б} = R_{л1} = 0,32$; $X_{рез1\ б} = = x_{с1\ б} + x_{л1\ б} = 0,25 + 0,21 = 0,46$; $Z_{рез1б} = = \sqrt{R_{рез1б}^2 + X_{рез1б}^2} + \sqrt{0,32^2 + 0,46^2} = 0,56.$

Для точки К2: $R_{рез2\ б} = R_{л1} = 0,32$; $X_{рез2\ б} = = X_{рез1\ б} + x_{т1\ б} = 0,46 + 2,6 = 3,06$; $Z_{рез2б} = = \sqrt{R_{рез2б}^2 + X_{рез2б}^2} + \sqrt{0,32^2 + 3,06^2} = 0,38.$

Для точки К3: $R_{рез3\ б} = R_{рез2\ б} + R_{л2\ б} + R_{т2\ б} = = 0,32 + 4,67 + 21,7 = 26,69$; $X_{рез3\ б} = X_{рез2\ б} + + x_{л2\ б} + x_{т1\ б} = 3,06 + 1,67 + 49,6 = 54,33$; $Z_{рез3б} = = \sqrt{R_{рез3б}^2 + X_{рез3б}^2} + \sqrt{26,69^2 + 54,33^2} = 60,53.$

Определяем значения базисных токов в точках К1, К2, К3.

Для точки К1:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3} U_{б1}} = \frac{100 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 37 \cdot 10^3} = 1,56 \text{ кА}.$$

Для точки К2:

$$I_{б2} = \frac{S_б}{\sqrt{3} U_{б2}} = \frac{100 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 5,5 \text{ кА}.$$

Для точки К3:

$$I_{б3} = \frac{S_б}{\sqrt{3} U_{б3}} = \frac{100 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 144,5 \text{ кА}.$$

Определяем трехфазные токи К3.

Для точки К1:

действующее значение периодической составляющей тока

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{I_{б1}}{Z_{рез1б}} = \frac{1,56}{0,56} = 2,79 \text{ кА};$$

действующее значение установившегося тока К3

$$I_{\infty 1} = I_{к1}^{(3)} = 2,79 \text{ кА};$$

амплитудное значение тока на шинах напряжением 35 кВ $i_{y1} = \sqrt{2} K_y I_{к1}^{(3)}$. Коэффициент K_y определяется графически по кривой на рис. 3. Для точки К1 соотношение X/R = 1,5. Тогда $K_y \approx 1$ и, соответственно, $i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 1{,}5 \cdot I_{к1}^{(3)} =$ = 5,92 кА;

действующее значение полного тока КЗ на шинах напряжением 35 кВ i_{y1} = 1,52·2,79 = = 4,2 кА.

Для точки К2:

действующее значение периодической составляющей тока

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{I_{б2}}{Z_{рез2б}} = \frac{5{,}5}{3{,}08} = 1{,}79 \text{ кА};$$

действующее значение установившегося тока КЗ

$$I_{\infty 2} = I_{к2}^{(3)} = 1{,}79 \text{ кА};$$

амплитудное значение тока на шинах напряжением 10 кВ

$$i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1{,}5 \cdot I_{к2}^{(3)} = 5{,}92 \text{ кА}.$$

Коэффициент K_y определяется графически по кривой на рис. 3. Для точки К2 соотношение X/R = 9,6. Тогда $K_y \approx 1{,}8$, и $i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1{,}8 \cdot I_{к2}^{(3)} =$ = $\sqrt{2}$ 1,8·1,79 = 9,66 кА;

действующее значение полного тока КЗ на шинах напряжением 10 кВ

$$i_{y2} = I_{к2}^{(3)} \sqrt{1 + 2\exp\left(-\frac{1}{T_a}\right)} = 1{,}72 \cdot 1{,}79 = 3{,}1 \text{ кА}.$$

Для точки К3:

действующее значение периодической составляющей тока

$$I_{к3}^{(3)} = \frac{I_{б3}}{Z_{рез3б}} = \frac{144{,}5}{60{,}53} = 2{,}39 \text{ кА};$$

действующее значение установившегося тока КЗ

$$I_{\infty 3} = I_{к3}^{(3)} = 2{,}39 \text{ кА};$$

амплитудное значение тока на шинах напряжением 0,4 кВ

$$i_{y2} = \sqrt{2} K_y I_{к3}^{(3)}.$$

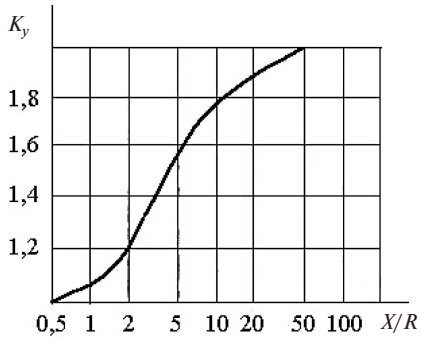


Рис. 3. Кривая зависимости $K_y = f(X/R)$ для определения ударного тока КЗ

Коэффициент K_y определяется графически по кривой на рис. 3. Для точки К2 соотношение X/R = 2. Тогда $K_y \approx 1{,}2$, и $i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1{,}2 \cdot I_{к2}^{(3)} =$ = $\sqrt{2}$ 1,2·2,39 = 4,1 кА;

действующее значение полного тока КЗ на шинах напряжением 0,4 кВ

$$i_{y3} = I_{к3}^{(3)} = 2{,}39 \text{ кА}.$$

Определяем двухфазные токи КЗ в соответствующих точках.

В точке К1:

$$I_{к1}^{(2)} = 0{,}87 \; I_{к1}^{(3)} = 0{,}87 \cdot 2{,}79 = 2{,}43 \text{ кА}.$$

В точке К2:

$$I_{к2}^{(2)}. = 0{,}87 \; I_{к2}^{(3)} = 0{,}87 \cdot 1{,}79 = 1{,}56 \text{ кА}.$$

В точке К3:

$$I_{к3}^{(2)}. = 0{,}87 \; I_{к3}^{(3)} = 0{,}87 \cdot 2{,}39 = 2{,}08 \text{ кА}.$$

Определяем мощности трехфазного КЗ.

Для точки К1:

$$S_{к1}^{(3)} = \sqrt{3} I_{к1}^{(3)} U_1. = 1{,}73 \cdot 2{,}79 \cdot 35 = 169 \text{ МВА}.$$

Для точки К2:

$$S_{к2}^{(3)} = \sqrt{3} I_{к2}^{(3)} U_2. = 1{,}73 \cdot 1{,}79 \cdot 10{,}5 = 33 \text{ МВА}.$$

Для точки К3:

$$S_{к3}^{(3)} = \sqrt{3} I_{к3}^{(3)} U_3. = 1{,}73 \cdot 2{,}39 \cdot 0{,}4 = 1{,}65 \text{ МВА}.$$

Результаты расчетов трехфазных токов КЗ в указанных на схеме точках цепи (рис. 2) представлены в сводной табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Расчетная точка КЗ	Расчетные сопротивления, о.е.			Трехфазные токи КЗ, кА*				Мощность трехфазного КЗ, МВА
	R_Σ	X_Σ	Z_Σ	$I^{(3)}$	I_∞	i_y	I_y	–
К1	0,32	0,46	0,56	2,79	2,79	5,92	4,20	169
К2	0,32	3,06	3,08	1,79	1,79	9,6	3,1	33
К3	26,69	54,33	60,53	2,39	2,39	3,36	2,39	1,65

* Примечание: $I^{(3)}$ — действующее значение периодической составляющей тока КЗ; I_∞ — действующее значение установившегося тока КЗ; i_y — амплитудное значение тока на шинах соответствующего класса напряжения; I_y — действующее значение полного тока КЗ на шинах.

Аналогичный расчет токов КЗ для схемы рис.1 в случае традиционного исполнения ВЛ 35 кВ неизолированным проводом марки АС 70, а ВЛ 10 кВ — неизолированным проводом марки А 35 с учетом их эксплуатационных характеристик (см. табл. 1) и сравнение с полученными в данной работе результатами показал снижение трехфазных токов КЗ для точек К1 и К2 в среднем на 10–15 %. Полученные для конкретной схемы численные значения трехфазных токов КЗ (то есть наиболее тяжелых воздействий на коммутационную аппаратуру) оказываются на порядок меньше отключающей способности современных вакуумных и элегазовых выключателей, которые находят широкое применение в сетях 6–35 кВ [5]. В частности, номинальный ток отключения вакуумного выключателя 35 кВ серии ВР35НС равен 20 кА [6]. Это свидетельствует: у выбранных коммутационных аппаратов параметры по отключающей способности завышены по сравнению с реальными условиями эксплуатации, что значительно удорожает строительство таких сетей. Альтернативным вариантом может быть использование выключателей нагрузки, технико-экономическая эффективность которых должна быть обоснована в рамках конкретного проекта с учетом планов развития сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Небрат, И.Л.** Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты. Часть первая [Текст] / И.Л. Небрат.— М.: Изд-во Минэнерго РФ, 2003.

2. **Крючков, И.П.** Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования [Текст] / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов.— М.: Академия, 2006.

3. **Mitolo, M.** Short-Circuit Calculation Methods [Электрон. ресурс] / M. Mitolo. — www.ecmweb.com.

4. **РД 153–34.0–20.527–98.** Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования [Текст] / РАО «ЕЭС».— М., 1998.

5. **Евдокунин, Г.А.** Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения [Текст] / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер.— СПб: Изд-во Сизова М.П., 2000.— 114 с.

6. Выключатели вакуумные 35кВ серии ВР35НС [Текст]: Техническая информация / НКАИ.— 670049.021.— ТИ.— Ред. 8.— 2010.

УДК 621.3.01

М.А. Шакиров

ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Часть 1: ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ТОНКИМИ ОБМОТКАМИ

Исследования последних лет [1, 2] показали, что теория трансформаторов, излагаемая в учебниках практически без изменения на протяжении более 100 лет, противоречит физическим принципам их работы и глубоко ошибочна. На повестке дня стоит вопрос о коренной ломке теории трансформаторов, написании ее «с белого листа» на основе новых понятий и парадигм, не укладывающихся в рамки традиционных представлений. Необходимо преодолеть распространяемые в учебниках [3–9] штампы, основанные на искусственном понятии о так называемой «результирующей МДС $w_1 i_0 = w_1 i_1 - w_2 i_2$ (или намагничивающем токе $i_0 = (w_1 i_1 - w_2 i_2)/w_1$)» и «создаваемом ею общем магнитном потоке Φ_0». Последний связан с измышлениями о «потоках рассеяния отдельных обмоток $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$» (признанных в [4, с. 273] условными) и «индуктивностях рассеяния отдельных обмоток ($L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$)», названных в работах [10–12] «бессмыслицей», в том числе из-за того, что одна из них может принимать отрицательное значение. Тем не менее приведенные понятия продолжают кочевать из учебника в учебник.

Выход состоит в построении теории на основе реальных магнитных потоков в стержнях, ярмах и окне трансформаторов, т. е. потоков, которые могут быть померены с помощью измерительных витков [13–16]. Такой подход, как разрушающий прежние стереотипы, не может не встретить противодействий со стороны части инженеров-консерваторов, что подтверждает ход многочисленных дискуссий по работам [13–16] на ряде кафедр электрических машин и ТОЭ различных университетов.

Из сказанного следует, что работы [1, 2] и [13–16] трудны для первичного восприятия, и сложившаяся ситуация может быть изменена только методом step by step, вначале для простейших случаев, т. е. поэтапным изложением новой теории; с целью обеспечения доступности понимания процедуры построения схем замещения на основе реальных потоков, местоположения этих потоков на векторных диаграммах, а также особенностей их поведения в динамических процессах. При этом одновременно решается вопрос, как сегодня следует излагать новую теорию студентам, держащим в руках учебники с неверными представлениями о физических процессах в трансформаторах. Неизбежны сопоставления новых и старых концепций. Для удобства ниже эти сопоставления помещаются в *Примечаниях*.

Электрическая схема замещения трансформатора

Ознакомление с новой теорией трансформаторов естественно начинать с рассмотрения физических процессов в броневом трансформаторе со стальным шихтованным сердечником без потерь и насыщения ($\mu_{\text{сталь}} = \infty$) с тонкими концентрическими обмотками (рис. 1), на что указывает верхний индекс (ноль) в обозначениях δ^0, δ_1^0, D_a^0 и т. д. Число витков обмотки низшего напряжения (НН) равно w_1, ток — $\dot{I}_1$. Обмотка высшего напряжения (ВН) характеризуется числом витков w_2 и током $\dot{I}_2$. Высота обмоток равна высоте окна. Суммарный магнитный поток в боковых ярмах обозначен как $\dot{\Phi}_б$, в окне — как $\dot{\Phi}_{\delta 0}$, а в стержне — как $\dot{\Phi}_{ст}$.

Для определенности примем, что первичной является обмотка НН. К ней приложено напряжение $\dot{U}_1$. Ее активное сопротивление — R_1. Индуктируемое в ней потоком $\dot{\Phi}_{ст}$ напряжение (ЭДС $\dot{E}_1$) обозначим через $\dot{U}_{01}$. Аналогично напряжение (ЭДС $\dot{E}_2$), индуктируемое в обмотке ВН потоком $\dot{\Phi}_б$, обозначим через $\dot{U}_{02}$, ее активное сопротивление — через R_2, а подсоединенное к ней сопротивление нагрузки — через $Z_н$. Напряжение на нагрузке — $\dot{U}_н = Z_н \dot{I}_2$.

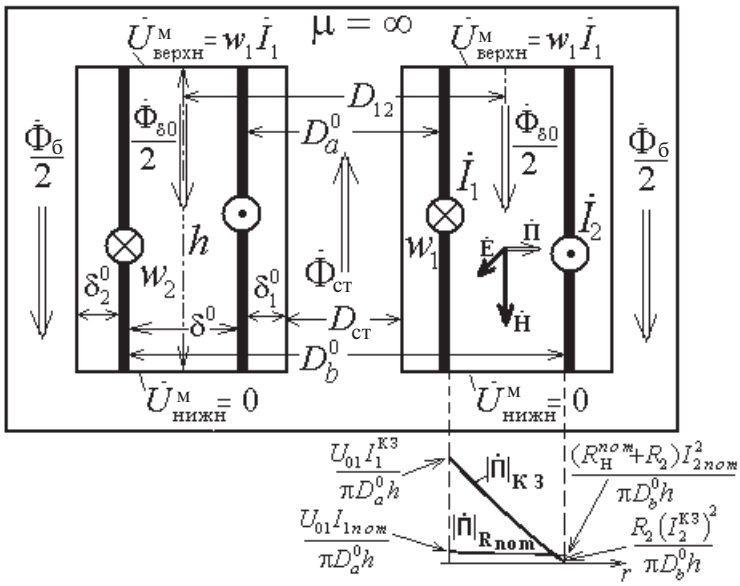


Рис. 1. Идеализированный броневой трансформатор с тонкими обмотками (графики модуля вектора Пойнтинга представлены для случая $Z_н = R_н^{nom}$ и режима КЗ)

При обходе любого контура в магнитопроводе, включающем стержень и одно из боковых ярм, согласно закону полного тока

$$w_1\dot{I}_1 - w_2\dot{I}_2 = 0 \quad , (1)$$

откуда следует, что в идеализированном трансформаторе при любом режиме

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (2)$$

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

Равенство $\dot{I}_1^{XX} = 0$ означает, что электрическая схема замещения трансформатора не может содержать поперечных ветвей.

Уравнение для напряжения на обмотке НН можно представить в виде

$$R_1\dot{I}_1 + j\omega w_1\dot{\Phi}_{ст} = \dot{U}_1, \quad (3)$$

или

$$R_1\dot{I}_1 + \dot{U}_{01} = \dot{U}_1 \text{ (где } \dot{U}_{01} = j\omega w_1\dot{\Phi}_{ст}). \quad (4)$$

Для напряжения на обмотке ВН имеем два уравнения:

$$\dot{U}_{02} = j\omega w_2\dot{\Phi}_б; \quad (5)$$

$$(R_2 + Z_н)\dot{I}_2 = \dot{U}_{02}. \quad (6)$$

Поскольку потоки в промежутках шириной δ_1^0 и δ_2^0, примыкающих к стали, равны нулю, то поток между обмотками равен

$$\dot{\Phi}_{δ0} = \dot{\Phi}_{ст} - \dot{\Phi}_б. \quad (7)$$

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{δ0}$ возникает под действием разности магнитных потенциалов между верхним и нижним торцевыми ярмами $\dot{U}^{м}_{верхн} - \dot{U}^{м}_{нижн} = w_1\dot{I}_1$, и можно написать

$$\dot{\Phi}_{δ0} = \frac{w_1\dot{I}_1}{R^{м}_{δ0}}, \quad (8)$$

где величина

$$R^{м}_{δ0} = \frac{h}{\mu_0\,\delta^0\,\pi\,D_{12}} \quad (9)$$

представляет собой магнитное сопротивление межобмоточного пространства шириной δ^0. С учетом (8) и (9) выражению (7) можно придать (после умножения его на $j\omega w_1$) следующий вид:

$$j\omega w_1\dot{\Phi}_{ст} - j\omega w_1\dot{\Phi}_б = j\omega w_1\dot{\Phi}_{δ0} =$$

$$= j\omega w_1 \frac{w_1 \dot{I}_1}{R^{\text{м}}_{\delta 0}} = j\omega L_{\delta 0} \dot{I}_1, \qquad (10)$$

где индуктивность

$$L_{\delta 0} = \frac{w_1^2}{R^{\text{м}}_{\delta 0}} = \mu_0 \frac{w_1^2 \pi D_{12} \delta^0}{h} \qquad (11)$$

играет роль внутренней индуктивности трансформатора, что видно по схеме замещения (рис. 2, *а*), построенной на основе всей совокупности написанных выше уравнений. На рис. 2, *б* изображена эквивалентная схема, в которой штрихами обозначены приведенные к первичной стороне величины:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / n = \dot{I}_1; \quad \dot{U}'_{02} = n\dot{U}_{02}; \quad \dot{U}'_{\text{н}} = n\dot{U}_{\text{н}};$$

$$R'_2 = n^2 R_2, \quad Z'_{\text{н}} = n^2 Z_{\text{н}}. \qquad (12)$$

Схемы замещения не содержат поперечных L-ветвей, что отвечает условию $\dot{I}'_2 = \dot{I}_1$ в (12). Рассчитав напряжения, отмеченные стрелками, нетрудно по ним определить все **реальные магнитные потоки** — $\dot{\Phi}_{\text{ст}}, \dot{\Phi}_{\text{б}}, \dot{\Phi}_{\delta 0}$ (для направлений, принятых на рис.1) при любом режиме работы трансформатора. При ХХ ($Z_{\text{н}} = \infty$) поток в межобмоточном пространстве $\dot{\Phi}^{\text{XX}}_{\delta 0} = 0$, и соответственно

$$\dot{\Phi}^{\text{XX}}_{\text{ст}} = \dot{\Phi}^{\text{XX}}_{\text{б}} = \dot{\Phi}_{\text{XX}} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1}. \qquad (13)$$

Из схемы рис. 2, *б* следует, что сопротивление КЗ идеализированного трансформатора с тонкими обмотками со стороны обмотки НН определяется так:

$$Z_{\text{КЗ}} = R_1 + R'_2 + j\omega L_{\delta 0} = r_{\text{КЗ}} + jx_{\text{КЗ}};$$

$$r_{\text{КЗ}} = R_1 + R'_2; \quad x_{\text{КЗ}} = \omega L_{\delta 0} = x_{\delta 0}; \qquad (14)$$

$$z_{\text{КЗ}} = |Z_{\text{КЗ}}| = \sqrt{r^2_{\text{КЗ}} + x^2_{\text{КЗ}}}.$$

Номинальное сопротивление со стороны обмотки НН равно

$$z_{1\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{1\text{ном}}} =$$

$$= \sqrt{(x_{\text{КЗ}} + X'_{\text{н ном}})^2 + (r_{\text{КЗ}} + R'_{\text{н ном}})^2}. \qquad (15)$$

Под напряжением КЗ понимается значение $U_1^{\text{КЗ}}$, при котором ток КЗ равен номинальному $I_{1\text{ном}}$. В относительных единицах

$$\underline{u}_{\text{КЗ}} = \frac{U_1^{\text{КЗ}}}{U_{1\text{ном}}} \equiv \frac{U_1^{\text{КЗ}} / I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}} / I_{1\text{ном}}} = \frac{z_{\text{КЗ}}}{z_{1\text{ном}}} = \underline{z}_{\text{КЗ}}. \qquad (16)$$

Ток КЗ при номинальном напряжении равен

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{z_{\text{КЗ}}} = \frac{U_1^{\text{КЗ}}}{z_{\text{КЗ}}} \frac{U_{1\text{ном}}}{U_1^{\text{КЗ}}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{\underline{u}_{\text{КЗ}}}. \qquad (17)$$

Замечание 1. Передача подведенной к внутренней обмотке электрической мощности во внешнюю обмотку осуществляется через межобмоточное пространство, что выражается с помощью вектора Пойнтинга $\dot{\Pi}$ (рис. 1) [13, с. 283]. Его комплекс в точке на расстоянии r от оси стержня в этом пространстве равен

$$\dot{\Pi}(r) = \dot{E}(r)\overset{*}{\dot{H}}; \quad \dot{H} = w_1 \dot{I}_1 / h;$$

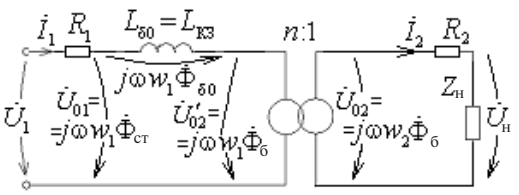
$$\dot{E}(r) = j\omega\left(\dot{\Phi}_{\text{Ст}} - \dot{\Phi}_{\delta}(r)\right) / 2\pi r,$$

$$\dot{\Phi}_{\delta}(r) = \int_{a_0}^{r} \mu_0 \dot{H} 2\pi r dr = \pi\mu_0 (r^2 - a_0^2)\dot{H},$$

где $a_0 = D_a^0 / 2$; $\dot{\Phi}_{\delta}(r)$ – поток, отсчитываемый от поверхности обмотки НН. В результате

$$\dot{\Pi}(r) = j\omega \frac{\dot{\Phi}_{\text{ст}} - \pi\mu_0 (r^2 - a_0^2)\dot{H}}{2\pi r} \overset{*}{\dot{H}}.$$

а)



б)

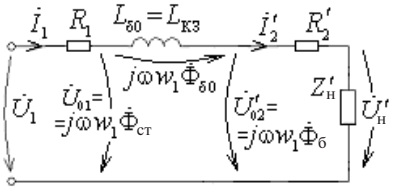


Рис. 2. Электрические схемы замещения идеализированного трансформатора с идеальным трансформатором (*а*) и без него (*б*)

Из этих формул вытекает, что $\dot{\Pi}_1$ (на наружной поверхности первичной обмотки) и $\dot{\Pi}_2$ (на внутренней поверхности вторичной обмотки) выражаются следующими формулами:

$$\dot{\Pi}_1 = \frac{j\omega\dot{\Phi}_{\text{ст}}}{\pi D_a^0}\frac{w_1\dot{I}_1^*}{h};$$

$$\dot{\Pi}_2 = \frac{j\omega(\dot{\Phi}_{\text{ст}} - \dot{\Phi}_{\delta 0})}{\pi D_b^0}\frac{w_1\dot{I}_1^*}{h} = \frac{j\omega\dot{\Phi}_{\text{б}}}{\pi D_b^0}\frac{w_1\dot{I}_1^*}{h}.$$

Для наглядности граничные значения на графике $\Pi(r)$ (рис.1) приведены без учета активных сопротивлений обмоток. Нетрудно убедиться, что мощность, отводимая с поверхности внутренней обмотки, равна

$$\dot{S}_{01} = (\pi D_a^0 h)\dot{\Pi}_1 = \dot{U}_{01}\dot{I}_1^* ,$$

а подводимая к поверхности внешней обмотки –

$$\dot{S}_{02} = (\pi D_b^0 h)\dot{\Pi}_2 = \dot{U}_{02}\dot{I}_1^* .$$

Мощность, затрачиваемая на возбуждение магнитного поля в межобмоточном пространстве:

$$\Delta\dot{S}_{\text{Тр}} = \pi D_a^0 h\dot{\Pi}_1 - \pi D_b^0 h\dot{\Pi}_2 = j\omega w_1\dot{\Phi}_{\delta 0}\dot{I}_1^* =$$

$$= j\omega w_1(w_1\dot{I}_1 / R_{\delta 0}^{\text{м}})\dot{I}_1^* = j\omega L_{\delta 0}I_1^2,$$

что согласуется со схемами замещения (рис. 2). Сравнение этого достаточно очевидного результата с попытками в [17, с. 176–180] получить картину «путей движения поля в трансформаторе под нагрузкой» на основе идеи об общем, «основном», потоке в трансформаторе показывает их полную бесперспективность. При этом автор [17] оказался в тупике. Поскольку представление об «основном» потоке имеет смысл только для катушки, то оно и завело его на рассмотрение «катушки с обмотками на обоих сердечниках», из которого он уже не смог выбраться. И в параграфе, посвященному трансформатору, не привел ни одной картины «движения поля в трансформаторе под нагрузкой». Сумбур усугублен еще и допущением об «отсутствии рассеяния», т. е. потока $\dot{\Phi}_{\delta 0}$, играющего ключевую роль в передаче мощности из обмотки в обмотку. Очевидно, что аналогичным образом происходит передача энергии и в реальном трансформаторе. Это означает, что межобмоточное пространство представляет собой, по выражению Г.Н. Александрова [1], рабочую зону, а не зону рассеяния.

Из физических соображений следует, что для магнитной энергии в любой произвольный момент времени должно выполняться соотношение

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi_1 i_1}{2} - \frac{\Psi_2' i_2'}{2} = \frac{\mu_0 H(t)^2}{2}V_{\delta 0} = \frac{L_{\delta 0}i_1^2}{2},$$

где $\Psi_1(t) = w_1\Phi_{\text{ст}}(t)$ и $\Psi_2' = w_1\Phi_{\text{б}} = nw_2\Phi_{\text{б}}(t) = n\Psi_2$; $V_{\delta 0} = \pi D_{12}\delta h$. Следовательно,

$$\Psi_1 - \Psi_2' = L_{\delta 0}i_1 ,$$

что вытекает также из схемы (рис. 2, *б*).

Поскольку в рабочей зоне запасается и электрическая энергия

$$W_{\text{э}} = \frac{\varepsilon E^2}{2}V_{\delta 0} = \frac{C_{\delta 0}U_{01}^2}{2},$$

то в схемы (рис. 2), вообще говоря, должна быть введена внутренняя поперечная емкость

$$C_{\delta 0} = \varepsilon\frac{\delta^0 h}{w_1^2\pi D_{12}} .$$

Вводя обозначение $c = \sqrt{\varepsilon\mu_0}$, нетрудно убедиться, что сопротивление этой поперечной ветви можно представить в виде

$$x_{C_{\delta 0}} = \frac{1}{\omega C_{\delta 0}} = \left(\frac{c}{\omega\delta^0}\right)^2\omega L_{\delta 0} \approx \left(\frac{c}{\omega\delta^0}\right)^2 \underline{u}_{\text{КЗ}}z_{1\text{ном}},$$

что для реальных трансформаторов оказывается на много порядков больше сопротивления XX. Этим объясняется отсутствие этой ветви в схемах (рис. 2).

Замечание 2. В трансформаторах небольшой мощности ($S_{\text{ном}} = 10$ кВА) обычно $\operatorname{tg}\varphi_{\text{КЗ}} = x_{\text{КЗ}} / r_{\text{КЗ}} \approx 1,2$, а в мощных трансформаторах (по данным [8, 9]) $\operatorname{tg}\varphi_{\text{КЗ}}$ равно 30–90. В [8, 9] используется термин «добротность контура КЗ» — $q = \operatorname{tg}\varphi_{\text{КЗ}}$. Для сравнительных оценок поведения реального и идеализированного трансформаторов естественно геометрию обмоток последнего определять исходя из требований сохранять габаритные размеры $D_{\text{ст}}$, D_{12} и h (как показано на рис. 1) и сопротивления короткого замыкания $r_{\text{КЗ}}$ и $x_{\text{КЗ}}$ (или $L_{\text{КЗ}} = x_{\text{КЗ}} / \omega$).

Для реализации инвариантности $x_{\text{КЗ}}$ запишем условие

$$L_{\delta 0} = L_{\text{КЗ}} ,$$

или с учетом (11) и известной формулы для $L_{КЗ}$ в общепринятых обозначениях [4, 5]

$$\mu_0 \frac{w_1^2 \pi D_{12} \delta^0}{h} = \mu_0 \frac{w_1^2 \pi D_{12}}{h}\left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}\right).$$

Отсюда находим для идеализированного трансформатора (рис. 1)

$$\delta^0 = a_{12} + \frac{a_1}{3} + \frac{a_2}{3};\ D_a^0 = D_{12} - a_{12} - 2\frac{a_1}{3};$$

$$D_b^0 = D_{12} + a_{12} + 2\frac{a_2}{3};$$

$$\delta_1^0 = a_{01} + 2\frac{a_1}{3};\ \delta_2^0 = a_{22} + 2\frac{a_2}{3}.$$

Пример 1. Определим эти параметры обмоток для повышающего трансформатора (рис.1) со следующими каталожными данными [15]:

$$S_{ном} = 3{,}333 \text{ МВА},\ U_{НН} = 6{,}35 \text{ кВ};$$

$$U_{ВН} = 66{,}4 \text{ кВ};\ P_{кз} = 20 \text{ кВТ};\ \underline{u}_{кз} = 10{,}5\ \%;$$

$$I_{1ном} = S_{1ном} / U_{1ном} = 525 \text{ А},$$

$$z_{1ном} = U_{1ном} / I_{1ном} = 12{,}095 \text{ Ом}.$$

Поскольку рассматривается трансформатор с $\mu_{стали} = \infty$, то данными ХХ ($\underline{I}_0 = 0{,}9\%$, $z_0 = U_{1ном} / I_0 = 1344$ Ом и $P_{XX} = 4{,}67$ кВт) пренебрегаем. Габариты: $D_{ст} = 436{,}8$ мм; $h = 873{,}6$ мм; $D_{12} = 630{,}7$ мм; $w_1 = 128$; $w_2 = 1341$. Чисто стальное сечение стержня — $s_{Fe} = 0{,}135 \text{ м}^2$. Амплитуда индукции в магнитопроводе при ХХ $B_m^{XX} = \sqrt{2} U_{НН} / (\omega w_1 s_{Fe}) = 1{,}65$ Тл. Сопротивления КЗ: $z_{кз} = 1{,}27$ Ом, $R_{кз} = 0{,}0726$ Ом, $x_{кз} \approx z_{кз} = 1{,}27$ Ом, $\text{tg}\varphi_{КЗ} = 17{,}5$. Величина сопротивления емкостной поперечной ветви $x_{C_{\delta 0}} = 1{,}2 \cdot 10^{11} z_0 >> z_0$ и, согласно Замечанию 1, ее можно не учитывать. По известным из [15] данным реальных обмоток ($a_{01} = 30$ мм; $a_1 = 41{,}9$ мм; $a_{12} = 50$ мм; $a_2 = 62{,}9$ мм; $a_{22} = 50$ мм) находим параметры обмоток идеализированного трансформатора:

$$\delta^0 = 50 + \frac{41{,}9}{3} + \frac{62{,}9}{3} = 84{,}93 \text{ мм};$$

$$D_a^0 = 630{,}7 - 50 - 2\frac{41{,}9}{3} = 552{,}8 \text{ мм};$$

$$\delta_1^0 = 30 + 2\frac{41{,}9}{3} = 57{,}93 \text{ мм};$$

$$D_b^0 = 630{,}7 + 50 + 2\frac{62{,}9}{3} = 722{,}6 \text{ мм};$$

$$\delta_2^0 = 50 + 2\frac{62{,}9}{3} = 91{,}93 \text{ мм}.$$

Примечание 1. Хотя схемы рис. 2 формально могут быть получены из известной Т-образной для идеализированного случая, их прочтение (в отношении трех реальных потоков) в корне отлично от традиционного прочтения с виртуальными общим потоком и двумя потоками рассеяния в окне. Поэтому на схемах рис. 2 нет сомнительного разделения сопротивления КЗ $L_{КЗ} = L_{\delta 0}$ на составляющие $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ и отсутствует узел подключения «ветви намагничивания» между ними для выявления «общего потока $\dot{\Phi}_0$», о чем будет сказано далее в *Примечании 3.*

Упрощенное изображение магнитной цепи трансформатора

Для более наглядного отображения магнитных потоков $\dot{\Phi}_{\delta 0}$ и $\dot{\Phi}_б$ можно вместо развернутого представления магнитной системы (см. рис. 1) использовать упрощенную магнитную систему, изображенную на рис. 3, *а*, где первичная w_1 и вторичная w_2 обмотки условно изображаются на разных частях магнитопровода, связанных друг с другом торцевыми ярмами. В направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, длина трансформатора равна πD_{12}. Для магнитных потоков используются обозначения

$$\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_{ст},\ \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi}_б, \qquad (18)$$

тем не менее участок магнитопровода, охватываемый обмоткой w_1, по-прежнему будем называть стержнем, а охватываемый обмоткой w_2 — боковым ярмом. Справедливость такой замены вытекает из полного соответствия всех записанных выше уравнений (1)–(17) и схем замещения (рис. 2) процессам в трансформаторе (см. рис. 3, *а*). Изображенная пунктиром на рис. 3, *б* магнитная схема замещения со всей очевидностью показывает, что она корректна лишь при условии (1).

Примечание 2. Вот почему в традиционной теории избегают рассмотрения идеализирован-

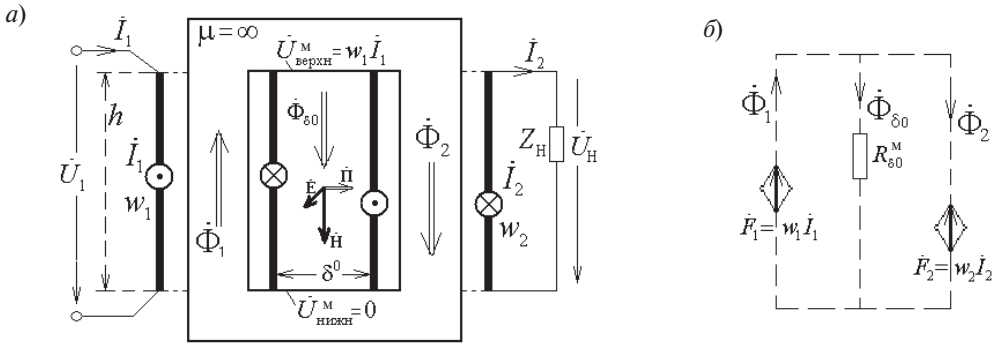


Рис. 3. Упрощенное изображение идеализированного трансформатора (*а*) и его магнитной цепи (*б*)

ного трансформатора: нельзя же утверждать, что «общий поток Φ_0 создается результирующей МДС $w_0\dot{I}_0 = w_1\dot{I}_1 - w_2\dot{I}_2$», которая в силу (1) в любых режимах работы идеализированного трансформатора равна нулю! Поскольку в стали напряженность поля $H = 0$, то и плотность энергии магнитного поля ($BH/2$) в магнитопроводе и вся энергия в нем также равны нулю, что указывает на ошибочность утверждения, будто бы «энергия концентрируется в магнитопроводе и небольшая часть — в пространстве, занимаемом полем рассеяния» (см. в [7 с. 165]). Последнее противоречит также физическому принципу, изложенному в **Замечании 1**.

Магнитная схема замещения (см. рис. 3, *б*) является неполной, так как ни одна из электрических ($\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{U}_2$) и ни одна из магнитных ($\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_{\delta 0}$) величин (при заданных $\dot{U}_1$ и $Z_н$) непосредственно из нее не определяются. Для решения этой задачи следует воспользоваться системой уравнений (1)–(9) идеализированного трансформатора, которая с использованием приведенных к первичной стороне величин (12) и с учетом рис. 2, *б* принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_{\delta 0} = 0 \text{ (уравнение треугольника потоков)}; \\ R^{м}_{\delta 0}\dot{\Phi}_{\delta 0} - w_1\dot{I}_1 = 0 \text{ (фаза } \dot{\Phi}_{\delta 0} \text{ совпадает с фазой } \dot{I}_1); \\ w_1\dot{I}_1 - w_1\dot{I}'_2 = 0 \text{ (фаза } \dot{I}_1 \text{ совпадает с фазой } \dot{I}_2); \\ R_1\dot{I}_1 + j\omega w_1\dot{\Phi}_1 = \dot{U}_1 \text{ (вектор } \dot{\Phi}_1 \text{ почти перпендикулярен } \dot{U}_1); \\ \dot{U}'_{02} - j\omega w_1\dot{\Phi}_2 = 0 \text{ (вектор } \dot{\Phi}_2 \text{ перпендикулярен } \dot{U}'_{02} = n\dot{U}_{02}); \\ \dot{U}'_{02} - (R'_2 + Z'_н)\dot{I}'_2 = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Примечание 3. Используемые в учебниках понятия «общий поток $\dot{\Phi}_0$» и «потоки рассеяния $\dot{\Phi}_{\sigma 1}, \dot{\Phi}_{\sigma 2}$» являются виртуальными; в отличие от реальных, они не могут быть измерены опытным путем. Обычно для них приводится так называемая картина магнитного поля, воспроизведенная на рис. 4, *а*. Однако, поскольку, как следует из системы (19), фазы магнитных потоков в стали и окне в общем случае различаются между собой, построение любых картин поля даже для реальных потоков лишено смысла (за исключением случаев чисто реактивных нагрузок при пренебрежении сопротивлениями R_1, R_2 и потерями в стали). Введение виртуальных потоков $\dot{\Phi}_{\sigma 1}, \dot{\Phi}_{\sigma 2}$ приводит к разбиению индуктивности КЗ $L_{КЗ} = L_{\delta 0}$ на две «индуктивности рассеяния» (как показано на рис. 4, *б*), удовлетворяющих условию $L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2} = L_{КЗ}$, но оставляющих произвол в самом разбиении (или в выборе коэффициента разбиения λ, который может быть и отрицательным [12]), т. е. приводит к плаванию точки подключения ветви намагничивания s и, как следствие, произволу в величине $\dot{\Phi}_0$. В частности в [12] рассматривается возможность принятия $L_{\sigma 1} = 0$, а в существующих учебниках принимают $L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = L_{КЗ}/2$. Хотя схема рис. 4, *б* дает те же электрические величины, что и схемы замещения на рис. 2, трактовка магнитных потоков, получаемых с ее помощью, весьма неопределенна. При учете магнитных сопротивлений участков магнитопровода и реальной толщины обмоток ошибочными окажутся и электрические величины, рассчитанные по Т-образной схеме замещения [15].

Треугольник магнитных потоков

Построение векторной диаграммы трансформатора с сопротивлением нагрузки $Z'_н = R'_н + jX'_н$ лучше всего начать, задавшись на схеме рис. 2, *б* напряжением на нагрузке $U'_н = nU_н$. На диаграммах (рис. 5) угол $\varphi_н$ есть угол нагрузки

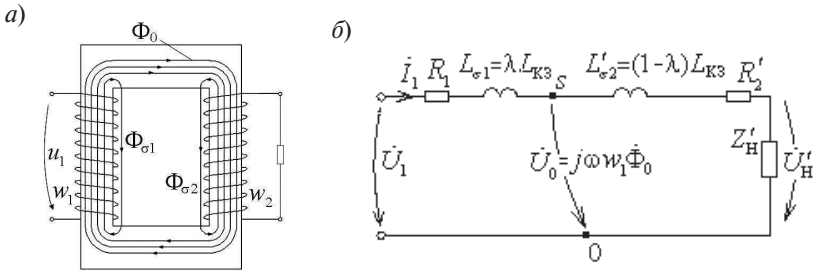


Рис. 4. Представление в современных учебниках виртуальных магнитных потоков в трансформаторе (*а*) и соответствующая им Т-образная схема замещения при бесконечном сопротивлении ветви намагничивания ($\mu_{\text{сталь}} = \infty$)

($\cos\varphi_{\text{н}} = R_{\text{н}} / z_{\text{н}}$) $x_{\delta 0} = \omega L_{\delta 0} = x_{\text{КЗ}}$. Построение начато с отложения вертикально вверх вектора $\dot{U}'_{02} = \dot{U}'_{\text{н}} + R'_2 \dot{I}'_2$, легко определяемого по исходным данным, и величины $\dot{I}'_2 = \dot{I}_1$. К вектору $\dot{U}'_{02}$ под углом 90^0 проведен вектор $\dot{\Phi}_2 = \dot{U}'_{02} / j\omega w_1$, к концу которого параллельно $\dot{I}'_2$ отложен вектор $\dot{\Phi}_{\delta 0} = w_1 \dot{I}_1 / R^{\text{M}}_{\delta 0} = L_{\delta 0} \dot{I}_1 / w_1$, после чего найден поток в стержне $\dot{\Phi}_1 = \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_{\delta 0}$. Образующийся при этом угол между потоками, отсчитываемый от вектора $\dot{\Phi}_2$ к вектору $\dot{\Phi}_1$, обозначен как θ_Ψ. Далее под углом 90° к вектору $\dot{\Phi}_1$ проводится вектор $\dot{U}_{01} = j\omega w_1 \dot{\Phi}_1$. После прибавления к нему вектора $R_1 \dot{I}_1$ получен вектор сетевого напряжения $\dot{U}_1$. Очевидно, угол между векторами $\dot{U}_{01} = j\omega w_1 \dot{\Phi}_1$ и $\dot{U}'_{02} = j\omega w_1 \dot{\Phi}_2$ совпадает с углом θ_Ψ. Чтобы найти его зависимость от нагрузки $Z_{\text{н}}$, обозначим угол, отсчитываемый от вектора тока $\dot{I}'_2$ к вектору $\dot{U}_{01}$, — через φ_{01} (рис. 5, *а*), а угол, отсчитываемый от вектора $\dot{I}'_2$ к вектору $\dot{U}'_{02}$, — через φ_{02}. Это дает возможность написать

$$\theta_\Psi = \varphi_{01} - \varphi_{02}; \qquad (20)$$

$$\text{tg}\theta_\Psi = \text{tg}(\varphi_{01} - \varphi_{02}) = \frac{\text{tg}\varphi_{01} - \text{tg}\varphi_{02}}{1 + \text{tg}\varphi_{01} \cdot \text{tg}\varphi_{02})},$$

где, как следует из рис. 2, *б*,

$$\text{tg}\varphi_{01} = \frac{x_{\text{КЗ}} + X'_{\text{н}}}{R'_2 + R'_{\text{н}}}, \quad \text{tg}\varphi_{02} = \frac{X'_{\text{н}}}{R'_2 + R'_{\text{н}}}. \qquad (21)$$

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

$$\mathbf{tg}\theta_\Psi = \frac{\boldsymbol{x_{\text{КЗ}}(R'_2 + R'_{\text{н}})}}{\boldsymbol{(R'_2 + R'_{\text{н}})^2 + X'_{\text{н}}(x_{\text{КЗ}} + X'_{\text{н}})}}. \qquad (22)$$

В случае емкостной нагрузки $X'_{\text{н}}$ берется со знаком минус.

Диаграммы с реальными потоками на рис. 5 можно назвать векторными диаграммами трех потоков, что принципиально отличает их от приводимых в учебниках «однопоточных»

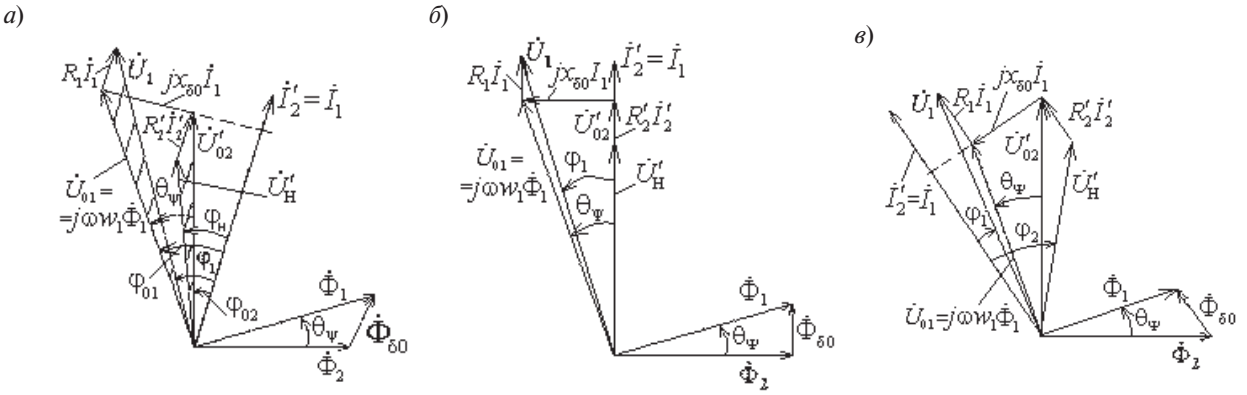


Рис. 5. Векторные диаграммы с *тремя потоками* для активно-индуктивной (*а*), чисто активной (*б*) и активно-емкостной (*в*) нагрузок

диаграмм, т. е. векторных диаграмм с одним искусственным «общим потоком сердечника $\dot{\Phi}_0$», не имеющим, как отмечалось, физического содержания.

Выражение для потока в стержне можно получить из следующей цепочки равенств:

$$\dot{\Phi}_1 = \frac{\dot{U}_1 - R_1\dot{I}_1}{j\omega w_1} = \frac{\dot{U}_1 - R_1\dot{U}_1/(Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}})}{j\omega w_1} =$$

$$= \left(1 - \frac{R_1}{Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}}\right)\frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1}.$$

Таким образом, зависимость потока в стержне от сопротивления нагрузки принимает вид

$$\dot{\Phi}_{\text{ст}} \equiv \dot{\Phi}_1 = \left(1 - \frac{R_1}{Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}}\right)\dot{\Phi}_{\text{XX}}, \qquad (23)$$

где

$$\dot{\Phi}_{\text{XX}} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega w_1} \qquad (24)$$

есть поток XX трансформатора. Непосредственно из схемы рис. 2, *б* получаем

$$\dot{\Phi}_{\text{б}} \equiv \dot{\Phi}_2 = \frac{R'_2 + Z'_{\text{н}}}{Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}}\dot{\Phi}_{\text{XX}}; \qquad (25)$$

$$\dot{\Phi}_{\delta 0} = \frac{jx_{\text{КЗ}}}{Z_{\text{КЗ}} + Z'_{\text{н}}}\dot{\Phi}_{\text{XX}}. \qquad (26)$$

При этом удовлетворяется условие (7).

Пример 2. В табл. 1 представлены рассмотренные величины для номинальных режимов и режима КЗ повышающего трансформатора (рис.1) с данными из **Примера 1**. Сопротивления нагрузки, указанные в колонках 3, 4 и 5 табл.1, обеспечивают номинальное сопротивление на входных зажимах исходя из соотношения

$$z_{1пот} = \sqrt{(R_{\text{КЗ}} + R'_{\text{н}})^2 + (x_{\text{КЗ}} + X'_{\text{н}})^2} =$$

$$= 12{,}095 \text{ Ом}, \qquad (27)$$

где $X'_{\text{н}}$ для емкостного элемента берется со знаком минус. Жирным шрифтом отмечены потоки в стали, имеющие наибольшие отклонения по модулю от потока холостого хода.

Для объяснения *уменьшения* потока $\underline{\Phi}_2^L$ при номинальной индуктивной нагрузке ($R'_{\text{н}} = 0$) учтем, что, как следует из (27), она практически определяется из соотношения

$$Z'^{L}_{\text{н пот}} = jX'^{L}_{\text{н пот}} = j(z_{1пот} - x_{\text{КЗ}}),$$

Таблица 1

Сравнение потоков при номинальных нагрузках и в режиме КЗ

Режим (Нагрузка $z'_{\text{н}}$, Ом)	Величины потоков, отнесенные к Φ_{XX}			Θ_ψ, рад (по ф. (22))
	$\underline{\dot{\Phi}}_1 = \underline{\dot{B}}_1$	$\underline{\Phi}_2 = \underline{\dot{B}}_2$	$\Phi_{\text{окно}} = \Phi_{\text{б}}$	
Активная нагрузка 12 Ом	$0{,}997e^{j0{,}017^0}$	$0{,}991e^{-j5{,}99^0}$	$0{,}105e^{j84{,}0^0}$	0,1059 ($\approx u_{\text{КЗ}} = 0{,}105$)
Индуктивная нагрузка j10,8 Ом	$1{,}000e^{j0{,}172^0}$	$\mathbf{0{,}895e^{j0{,}151^0}}$	$0{,}105e^{j0{,}343^0}$	$3{,}5\cdot10^{-4}$ ($\to 0$)
Емкостная нагрузка $-j$13,4 Ом	$1{,}000e^{j0{,}172^0}$	$\mathbf{1{,}105e^{-j0{,}188^0}}$	$0{,}105e^{j179{,}65^0}$	$2{,}8\cdot10^{-4}$ ($\to 0$)
Короткое замыкание ($z_{\text{н}} = 0$)	$0{,}998e^{j1{,}63^0}$	$\mathbf{0{,}028e^{-j86{,}72^0}}$	$0{,}998e^{j3{,}27^0}$	$1{,}55\left(\to\frac{\pi}{2}\right)$

что позволяет (25) переписать (пренебрегая $R_{\text{КЗ}}$) в виде

$$\underline{\dot{\Phi}}_2^L = \frac{\dot{\Phi}_2^L}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} \approx \frac{j(z_{1nom} - x_{\text{КЗ}})}{jx_{\text{КЗ}} + j(z_{1nom} - x_{\text{КЗ}})} =$$

$$= \frac{z_{1nom} - x_{\text{КЗ}}}{z_{1nom}} \approx 1 - \underline{u}_{\text{КЗ}}.$$

Отсюда $\underline{\dot{\Phi}}_2^L \approx 1 - \underline{u}_{\text{КЗ}} = 0{,}895$, что совпадает с результатом в табл.1 для номинальной индуктивной нагрузки. Аналогичным образом объясняется увеличение потока $\underline{\Phi}_2^C$ при номинальной емкостной нагрузке: эта нагрузка согласно (27) оказывается равной

$$Z'^C_{\text{н}\,nom} = -jX'^C_{\text{н}\,nom} = -j(z_{1nom} + x_{\text{КЗ}}),$$

что приводит (25) к виду

$$\underline{\dot{\Phi}}_2^C = \frac{\dot{\Phi}_2^C}{\dot{\Phi}_{\text{XX}}} \approx \frac{-j(z_{1nom} + x_{\text{КЗ}})}{jx_{\text{КЗ}} - j(z_{1nom} + x_{\text{КЗ}})} =$$

$$= \frac{z_{1nom} + x_{\text{КЗ}}}{z_{1nom}} \approx 1 + \underline{u}_{\text{КЗ}}.$$

Отсюда $\underline{\dot{\Phi}}_2^C \approx 1 + \underline{u}_{\text{КЗ}} = 1{,}105$, что совпадает с результатом табл.1 для емкостной нагрузки.

Замечание 3. В табл.1 представлены также значения угла θ_Ψ, рассчитанного по формуле (22). При номинальной чисто активной нагрузке ($X'_{\text{н}} = 0$) из (27) следует

$$Z'_{\text{н}\,nom} = R'_{\text{н}\,nom} = \sqrt{z_{1nom}^2 - x_{\text{КЗ}}^2} - R_{\text{КЗ}} \approx z_{1nom}.$$

И тогда, упрощая (22), можем написать

$$\text{tg}\theta^{nom}_{\Psi(Z_{\text{н}}=R_{nom})} \approx \frac{x_{\text{КЗ}} R'_{\text{н}\,nom}}{z'^2_{1\,nom}} \approx \frac{x_{\text{КЗ}}}{z'_{1nom}} = \underline{x}_{\text{КЗ}} \approx \underline{u}_{\text{КЗ}},,$$

$$\theta^{nom}_{\Psi(Z_{\text{н}}=R_{nom})} \approx \underline{u}_{\text{КЗ}} = 0{,}105 \text{ рад},$$

что и отражено в табл.1. Для номинальной чисто *реактивной* нагрузки ($R'_{\text{н}} = 0$) формула (22) принимает вид

$$\text{tg}\theta^{nom}_{\Psi(Z_{\text{н}}=X_{nom})} \approx \frac{x_{\text{КЗ}} R'_2}{z^2_{1nom}} \to 0, \quad \theta^{nom}_{\Psi(Z_{\text{н}}=X_{nom})} \to 0.$$

Примечание 4. Из-за малой величины угла $\theta^{nom}_{\Psi(Z_{\text{н}}=R_{nom})}$ поток в окне практически перпендикулярен обоим потокам в стержне и боковом ярме (рис.5,б). Т. е. когда поток, например, в стержне достигает максимума, поток в окне почти нулевой и наоборот. Это обстоятельство плохо вяжется с идеей рассеяния потока, ассоциируемой с простым ответвлением частей потоков стержня и бокового ярма в окно трансформатора.

Треугольник магнитных потоков в режиме КЗ

Векторная диаграмма в режиме КЗ внешней обмотки трансформатора изображена на рис. 6. Пунктир на линии вектора токов подчеркивает их значительную величину ($I'^{\text{КЗ}}_2 = I^{\text{КЗ}}_1 = U_1/z_{\text{КЗ}}$) по сравнению с ними на векторных диаграммах

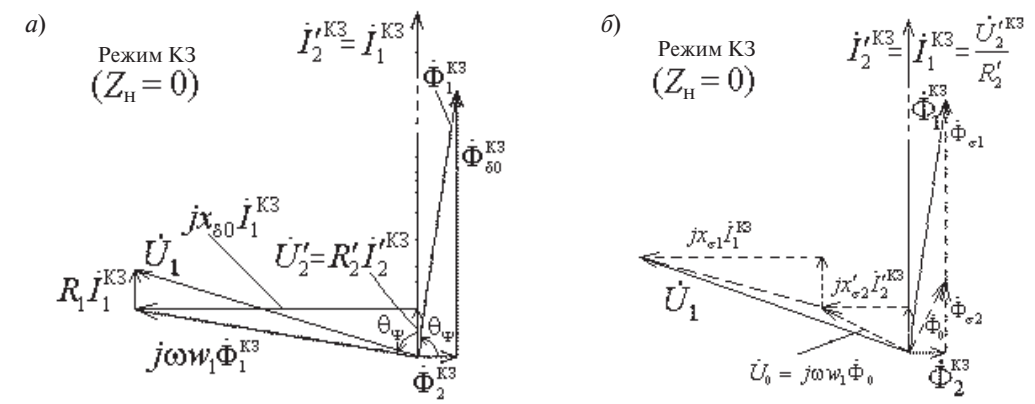


Рис. 6. Векторная диаграмма режима КЗ идеализированного трансформатора с реальными потоками $\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_{\delta 0}$ (*а*) и ее сравнение с диаграммой искусственных потоках $\dot{\Phi}_0, \dot{\Phi}_{\sigma 1}, \dot{\Phi}_{\sigma 2}$ из учебников (*б*)

(рис. 5). Из общего выражения (22) находим, что тангенс угла θ_Ψ при КЗ (то есть при $R'_н$=0 и $X'_н = 0$) оказывается равным

$$\operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ} = \frac{x_{КЗ}}{R'_2}, \qquad (28)$$

Откуда с учетом **Замечания 2** следует, что угол $\theta_\Psi^{КЗ}$ между потоками $\dot\Phi_1^{КЗ}$ и $\dot\Phi_2^{КЗ}$ в мощных трансформаторах весьма близок к 90° (рис. 6, *а*). Это означает, что когда мгновенное значение потока в стержне достигает амплитудного значения $\Phi_{1max}^{КЗ}$, мгновенное значение потока в боковом ярме принимает почти нулевое значение. Чтобы подчеркнуть это, далее поток $\dot\Phi_2^{КЗ}$ будем условно называть антипотоком в режиме КЗ

Полагая в выражении (23) $Z_н = 0$, находим, что поток в стержне при КЗ можно выразить следующими соотношениями:

$$\dot\Phi_1^{КЗ} = \left(1 - \frac{R_1}{Z_{КЗ}}\right)\dot\Phi_{XX} = \frac{R'_2 + jx_{КЗ}}{Z_{КЗ}}\dot\Phi_{XX} =$$

$$= \frac{R'_2}{r_{КЗ}} \cdot \frac{(1 + j\operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ})}{(1 + j\operatorname{tg}\varphi_{КЗ})}\dot\Phi_{XX}. \qquad (29)$$

Аналогично, полагая в (25) $Z_н = 0$, для антипотока в режиме КЗ получаем

$$\dot\Phi_2^{КЗ} = \frac{R'_2}{Z_{КЗ}}\dot\Phi_{XX} = \frac{R'_2}{R'_2 + jx_{КЗ}}\dot\Phi_1^{КЗ} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\theta_\Psi^{КЗ}}} e^{-j\theta_\Psi^{КЗ}}\dot\Phi_1^{КЗ}, \qquad (30)$$

где согласно (28)

$$\theta_\Psi^{КЗ} = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_{КЗ}}{R'_2}\right). \qquad (31)$$

Для потока в межобмоточном пространстве при КЗ можно написать

$$\dot\Phi_{\delta 0}^{КЗ} = \dot\Phi_1^{КЗ} - \dot\Phi_2^{КЗ} = \frac{jx_{КЗ}}{Z_{КЗ}}\dot\Phi_{XX} =$$

$$= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\theta_\Psi^{КЗ}}} e^{-j\theta_\Psi^{КЗ}}\right)\dot\Phi_1^{КЗ}. \qquad (32)$$

Замечание 4. Если, как полагают,

$$R'_2 \approx R_1 = r_{КЗ}/2, \qquad (33)$$

то согласно (28)

$$\operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ} \approx \frac{x_{КЗ}}{r_{КЗ}/2} = 2\operatorname{tg}\varphi_{КЗ}. \qquad (34)$$

Тогда, принимая во внимание **Замечание 2** из п.1, получаем

$$2{,}4 < \operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ} < 180, \qquad (35)$$

и, следовательно, диапазон значений угла отставания антипотока в боковом ярме от потока в стержне при КЗ составляет

$$67° < \theta_\Psi^{КЗ} < 90°. \qquad (36)$$

Из (29), (33) и (34) следует, что в мощных трансформаторах с тонкими обмотками

$$\dot\Phi_1^{КЗ} \approx \frac{1}{2}\frac{\operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ}}{\operatorname{tg}\varphi_{КЗ}}\dot\Phi_{XX} \to \dot\Phi_{XX}, \qquad (37)$$

и для антипотока (учитывая, что $\operatorname{tg}\theta_\Psi^{КЗ} = 2(30–90)$) согласно (30) можем написать

$$\frac{\Phi^{XX}}{2\cdot 30} > \Phi_2^{КЗ} > \frac{\Phi^{XX}}{2\cdot 180}, \qquad (38)$$

при этом практически $\dot\Phi_2^{КЗ}$ почти ортогонален $(\perp)\,\dot\Phi_1^{КЗ}$ и

$$\dot\Phi_{\delta 0}^{КЗ} \to \dot\Phi_1^{КЗ}, \qquad (39)$$

т. е. при КЗ весь магнитный поток стержня уходит в окно трансформатора.

Замечание 5. Почти полную взаимную ортогональность векторов $\dot\Phi_1^{КЗ}$ и $\dot\Phi_2^{КЗ}$ в мощных трансформаторах с тонкими обмотками можно пояснить следующим образом:

токи $\dot I_2'^{КЗ}$ и $\dot I_1^{КЗ}$ совпадают по фазе (т. е. $\dot I_1^{КЗ} \parallel \dot I_2'^{КЗ}$);

поскольку $r_{КЗ} << x_{КЗ}$, то практически $\dot I_1^{КЗ} \perp \dot U_1$;

очевидно, $\dot\Phi_1^{КЗ} \approx \dot\Phi_{XX} \perp \dot U_1$;

следовательно, практически $\dot\Phi_1^{КЗ} \parallel \dot I_1^{КЗ}$, и тогда практически

$$\dot\Phi_1^{КЗ} \parallel \dot I_2'^{КЗ}; \qquad (40)$$

далее, поскольку $\dot{I}_2'^{\text{КЗ}} \parallel \dot{U}_{02}'^{\text{КЗ}}$ и $\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}} \perp \dot{U}_{02}'^{\text{КЗ}}$, то

$$\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}} \perp \dot{I}_2'^{\text{КЗ}}; \qquad (41)$$

из (49) и (41) вытекает, что, действительно, практически

$$\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}} \perp \dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}}. \qquad (42)$$

Кратко это пояснение можно также представить следующей цепочкой связей:

$$\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}} \perp \dot{U}_{02}^{\text{КЗ}} \parallel \dot{I}_2^{\text{КЗ}} \parallel \dot{I}_1^{\text{КЗ}} \perp \dot{U}_1 \perp \dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}}. \qquad (43)$$

Перепишем ее, оставляя только знаки $\perp$ между крайними переменными:

$$\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}} \perp \perp \perp \dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}}. \qquad (44)$$

Поскольку число этих знаков оказалось нечетным, от (44) приходим к (42). Такой же вывод можно сделать, просто подсчитав число знаков $\perp$ между потоками в выражении (43).

Примечание 5. Для сравнения на рис. 6, *б* пунктиром изображена типовая векторная диаграмма КЗ с «общим» потоком $\dot{\Phi}_0$, построенная по схеме замещения из учебников (см. рис. 4, *б*) при выборе коэффициента разбиения $\lambda = 1/3$, т. е. при $L_{\sigma 1} = L_{\text{КЗ}}/3$ и $L'_{\sigma 2} = 2L_{\text{КЗ}}/3$. Векторная диаграмма объясняет, почему этот поток при КЗ получается малым. Однако это не может служить основанием для утверждения о размагниченном состоянии магниторповода при КЗ В действительности в стержне и боковом ярме протекают свои магнитные потоки, различающиеся и по величине и по фазе, причем поток в стержне практически равен потоку ХХ. На рис. 6, *б* показано, как в принципе можно подправить диаграмму, чтобы от общего потока $\dot{\Phi}_0$ перейти к реальным потокам $\dot{\Phi}_1^{\text{КЗ}}$ и $\dot{\Phi}_2^{\text{КЗ}}$. Однако ввиду чисто эвристического характера разбиения индуктивности $L_{\text{КЗ}}$ на величины $L_{\sigma 1}$ и $L'_{\sigma 2}$, это действие бессмысленно. В новой теории разбиение $L_{\text{КЗ}}$ на эти величины исключено!

Круговая диаграмма магнитных потоков, напряжений и токов

При заданном на обмотке НН напряжении $\dot{U}_1 = \text{const}$ все токи, напряжения и магнитные потоки в схеме замещения (см. рис. 2, *б*) представляют собой дробно-линейные функции сопротивления нагрузки $Z'_{\text{н}}$ и, следовательно, могут быть найдены из круговых диаграмм. Удобно представлять напряжения в относительных единицах:

$$\underline{\dot{U}}_1 = \dot{U}_1 / U_1; \ \underline{U}_1 = 1; \ \underline{\dot{U}}'_{02} = \dot{U}'_{02} / U_1,$$

$$\frac{x_{\text{КЗ}} I_1}{U_1} \approx \frac{z_{\text{КЗ}} I_1}{U_1} = \frac{I_1}{I_1^{\text{КЗ}}}. \qquad (45)$$

Потоки также будем выражать в относительных единицах:

$$\underline{\dot{\Phi}}_1 = \dot{\Phi}_1 / \Phi_{\text{ХХ}}; \quad \underline{\dot{\Phi}}_2 = \dot{\Phi}_2 / \Phi_{\text{ХХ}};$$

$$\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0} = \dot{\Phi}_{\delta 0} / \Phi_{\text{ХХ}}. \qquad (46)$$

Учитывая малое влияние сопротивления R_1 обмотки НН на работу мощного трансформатора, примем $R_1 = 0$, что позволяет записать

$$\dot{U}_{01} \approx \dot{U}_1; \quad \underline{U}_{01} = 1;$$

$$\dot{\Phi}_1 \approx \dot{U}_1 / j\omega w_1 = \dot{\Phi}_{\text{ХХ}}; \quad \underline{\Phi}_1 \approx 1; \qquad (47)$$

при этом разность фаз между векторами $\dot{U}_1$ и $\underline{\dot{U}}'_{02}$ станет равной θ_Ψ (см. рис. 5).

Наиболее просто строить круговую диаграмму для чисто активной нагрузки (рис. 7). Вектор заданного напряжения $\underline{\dot{U}}_1$ отложен вертикально вверх, а вектор $\underline{\dot{\Phi}}_1$ — под углом 90° вправо. Как и на диаграмме рис. 5, *б* $\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0} \perp \underline{\dot{\Phi}}_2$. Линия на-

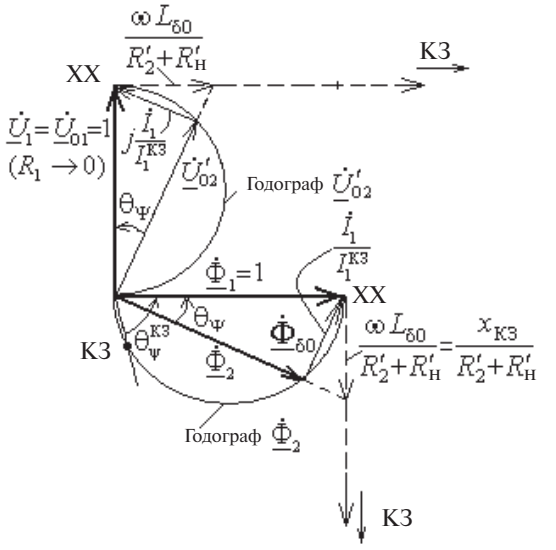


Рис. 7. Круговая диаграмма идеализированного трансформатора (при допущении $R_1 = 0$) для чисто активной нагрузки $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$

грузки в виде шкалы значений $\omega L_{\delta 0}/(R_2'+R_{\text{н}}'))$ отложена вниз перпендикулярно вектору $\underline{\dot{\Phi}}_1$, что согласуется с выражением для угла θ_Ψ

$$\mathbf{tg}\theta_\Psi\big|_{Z_{\text{н}}=R_{\text{н}}}=\frac{x_{\text{КЗ}}}{(R_2'+R_{\text{н}}')}, \qquad (48)$$

полученного из (22) при $X_{\text{н}}'\to 0$. Полуокружность с центром в середине отрезка $\underline{\dot{\Phi}}_1$ есть геометрическое место точек годографа вектора $\underline{\dot{\Phi}}_2$. Аналогичные построения выполнены для годографа вектора $\underline{\dot{U}}'_{02}\perp\underline{\dot{\Phi}}_2$ со шкалой нагрузки, проведенной горизонтально. Вследствие $R_1=0$ здесь, в отличие от диаграммы рис. 5, *б*, угол $\varphi_1=\theta_\psi$. Очевидно, что в рассматриваемом случае чисто активной нагрузки вектор $\dot{I}_2'$ и вектор $\underline{\dot{U}}'_{\text{Н}}=\underline{\dot{U}}'_{02}-R_2'\dot{I}_2'$ совпадают по направлению с вектором $\underline{\dot{U}}'_{02}$. На диаграмме треугольник напряжений представлен согласно уравнению

$$\underline{\dot{U}}_1=\underline{\dot{U}}'_{02}+\frac{jx_{\text{КЗ}}\dot{I}_1}{U_1}\approx\underline{\dot{U}}'_{02}+j\frac{\dot{I}_1}{I_1^{\text{КЗ}}}.$$

Диаграмма показывает, что при $R_{\text{н}}=\infty$ (режим ХХ) вектор $\underline{\dot{\Phi}}_2$ совпадает с $\underline{\dot{\Phi}}_1$, а $\underline{\dot{\Phi}}_\delta$ обращается в нуль. При $R_{\text{н}}'=0$ (режим КЗ) угол между $\underline{\dot{\Phi}}_2$ и $\underline{\dot{\Phi}}_1$ стремится к значению $\theta_\Psi^{\text{КЗ}}$, определяемому выражением (31), при этом вектор $\underline{\dot{\Phi}}_2$ практически стремится к нулю, а вектор $\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0}$ — к слиянию с вектором $\underline{\dot{\Phi}}_1$. Очевидно, смысл имеет лишь часть годографа $\underline{\dot{\Phi}}_2$ от точки ХХ до точки КЗ Поскольку в мощных трансформаторах ток установившегося КЗ

$$I_{\text{КЗ}}=\frac{U_1}{z_{\text{КЗ}}}\approx\frac{U_1}{x_{\text{КЗ}}}=\frac{U_1}{\omega L_{\delta 0}}, \qquad (49)$$

то на основе соотношения

$$\dot{\Phi}_{\delta 0}=w_1\dot{I}_1/R_{\delta 0}^{\text{М}}=L_{\delta 0}\dot{I}_1/w_1$$

можем записать

$$\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0}=\frac{L_{\delta 0}\dot{I}_1}{w_1\Phi_{\text{ХХ}}}=\frac{L_{\delta 0}\dot{I}_1}{w_1(U_1/\omega w_1)}=$$

$$=\frac{\dot{I}_1}{U_1/\omega L_{\delta 0}}\approx\frac{\dot{I}_1}{I_{\text{КЗ}}}. \qquad (50)$$

Стало быть, вектор $\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0}$ на диаграмме одновременно выражает и ток трансформатора отнесенный к току КЗ. При ХХ величина $\dot{I}_1/I_{\text{КЗ}}$ вместе с $\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0}$ обращается в ноль, а при КЗ, когда $\underline{\dot{\Phi}}_{\delta 0}$ стремится к слиянию с $\underline{\dot{\Phi}}_1$, вектор $\dot{I}_1/I_{\text{КЗ}}\to 1$ оказывается практически перпендикулярным вектору $\dot{U}_1$.

Угловые характеристики идеализированного трансформатора

Назовем зависимости передаваемых активной и реактивной мощностей от угла θ_ψ между магнитными потоками угловыми характеристиками идеализированного трансформатора. Выведем их, используя, например, векторную диаграмму рис. 5, *а*, повторенную на рис. 8 без изображения векторов $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_{\text{н}}'$. Очевидно, что треугольник напряжений, состоящий из векторов $\dot{U}_{02}', jx_{\delta 0}\dot{I}_1, \dot{U}_{01}$, может быть получен простым поворотом на угол 90° треугольника потоков $\dot{\Phi}_2, \dot{\Phi}_{\delta 0}, \dot{\Phi}_1$ и умножением его на ωw_1. Произведя на диаграмме дополнительные построения, показанные пунктирными линиями, замечаем, что длина отрезка ab может быть выражена двояко: либо как

$$ab=x_{\delta 0}I_1\cos\varphi_{02}=x_{\delta 0}I_2'\cos\varphi_{02}, \qquad (51)$$

либо как

$$ab=U_{01}\sin\theta_\psi. \qquad (52)$$

Отсюда следует соотношение

$$I_2'\cos\varphi_{02}=\frac{U_{01}\sin\theta_\psi}{x_{\delta 0}}, \qquad (53)$$

и для активной мощности, передаваемой во вторичную обмотку, получаем

$$\boldsymbol{P_{02}=U_{02}'I_2'\cos\varphi_{02}=\frac{U_{01}U_{02}'}{x_{\delta 0}}\sin\theta_\psi}. \qquad (54)$$

В величине P_{02}, помимо активной мощности, передаваемой в нагрузку ($P_{\text{нагр}}$), учитываются и потери активной мощности в сопротивлении R_2' вторичной обмотки трансформатора ($R_2I_2^2=R_2'I_2'^2$).

Замечание 6. Выполнив в (54) подстановки

$$U_{01}=\omega\Psi_1=\omega(w_1\Phi_1), \quad U_{02}'=\omega\Psi_2'=\omega w_1\Phi_2,$$

$$x_{\delta 0}=\omega L_{\delta 0}=\omega w_1^2/R_{\delta 0}^{\text{М}}, \qquad (55)$$

можно представить передаваемую во вторичную обмотку активную мощность через магнитные потоки в стержне и боковом ярме:

$$P_{02} = \omega R_{\delta 0}^{\mathrm{M}} \Phi_1 \Phi_2 \sin\theta_\psi , \qquad (56, a)$$

или, принимая во внимание, что

$$\Psi'_2 = n\Psi_2 = n(w_2\Phi_2),$$

через потокосцепления:

$$P_{02} = \omega \frac{\Psi_1 \Psi'_2}{L_{\delta 0}} \sin\theta_\psi = n\omega \frac{\Psi_1 \Psi_2}{L_{\delta 0}} \sin\theta_\psi . \qquad (56, б)$$

Выразив потоки в стали через индукции $\Phi_1 = B_1 \pi D_{\mathrm{ст}}^2 / 4$, $\Phi_2 = B_2 \pi D_{\mathrm{ст}}^2 / 4$ и воспользовавшись (9), можно мощность P_{02} выразить через геометрические параметры, что дает возможность, задавшись типовыми значениями амплитуд при номинальном режиме $B_{1m} \approx B_{2m} = 1{,}7$ Тл и угла $\theta_\psi^{\mathrm{ном}}$ из соотношения (23), оценить габариты трансформатора для передачи заданной номинальной активной мощности. Формулы (56, *а,б*) представляют несомненный интерес для введения понятий об угловых характеристиках асинхронных машин и пересмотра их теории в целом.

Замечание 7. В мощных трансформаторах даже в режиме КЗ $U_1 \approx U_{01}$. Действительно, поскольку $R'_2 / x_{\mathrm{КЗ}} << 1$ и $R_1 / x_{\mathrm{КЗ}} << 1$, то в режиме КЗ (см. рис. 2, *б*)

$$\dot{I}_1^{\mathrm{КЗ}} = \frac{\dot{U}_{01}}{R'_2 + jx_{\mathrm{КЗ}}} \approx \frac{\dot{U}_{01}}{jx_{\mathrm{КЗ}}} ; \qquad (57)$$

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1^{\mathrm{КЗ}} + \dot{U}_{01} \approx R_1 \frac{\dot{U}_{01}}{jx_{\mathrm{КЗ}}} + \dot{U}_{01} =$$

$$= \left(-j \frac{R_1}{x_{\mathrm{КЗ}}} + 1 \right) \dot{U}_{01} \approx \dot{U}_{01}. \qquad (58)$$

В результате выражение (54) для общего случая может быть представлено в приближенном виде:

$$P_{02} \approx \frac{U_1 U'_{02}}{x_{\delta 0}} \sin\theta_\psi . \qquad (59)$$

В нормальных режимах $U'_{02} \approx U'_{\mathrm{н}}$, что дает возможность также записать

$$P_{\mathrm{н}}^{\mathrm{норм}} \approx P_{02}^{\mathrm{норм}} \approx \frac{U_1 U'_{\mathrm{н}}}{x_{\delta 0}} \sin\theta_\psi^{\mathrm{норм}} , \qquad (60)$$

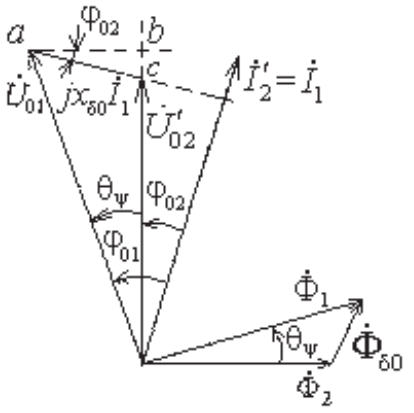


Рис. 8. Упрощенная векторная диаграмма идеализированного трансформатора

где индексы «норм» и «н» соответствует словам нормальная и нагрузка. Полагая далее $U'_{\mathrm{н}} \approx U_1$, получаем

$$P_{\mathrm{н}}^{\mathrm{норм}} \approx P_{02}^{\mathrm{норм}} \approx \frac{U_1^2}{x_{\delta 0}} \sin\theta_\psi^{\mathrm{норм}} . \qquad (61)$$

Принимая во внимание возможность двоякого представления на диаграмме (см. рис. 8) отрезка *св*,

$$cb = x_{\delta 0} I_1 \sin\varphi_{02} = x_{\delta 0} I'_2 \sin\varphi_{02} ;$$

$$cb = U_{01} \cos\theta_\Psi - U'_{02} , \qquad (62)$$

можем написать

$$I'_2 \sin\varphi_{02} = \frac{U_{01} \cos\theta_\Psi - U'_{02}}{x_{\delta 0}} . \qquad (63)$$

И для передаваемой в нагрузку реактивной мощности идеализированного трансформатора получаем

$$\boldsymbol{Q_{\mathrm{н}} = U'_{02} I'_2 \sin\varphi_{02} = \frac{U_{01} U'_{02}}{x_{\delta 0}} \cos\theta_\Psi - \frac{U'^{\,2}_{02}}{x_{\delta 0}}} . \qquad (64)$$

Принимая во внимание, что $\varphi_{01} = \varphi_{02} + \theta_\Psi$ (см. рис. 8), для реактивной мощности на входе трансформатора можно записать

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin\varphi_1 = U_{01} I_1 \sin\varphi_{01} =$$

$$= U_{01} I'_2 \left(\sin\varphi_{02} \cos\theta_\Psi + \cos\varphi_{02} \sin\theta_\Psi \right),$$

что после учета (53) и (55) дает:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin\varphi_1 = \frac{U_{01}^2}{x_{\delta 0}} - \frac{U_{01}U'_{02}}{x_{\delta 0}}\cos\theta_\Psi . \quad (65)$$

Нетрудно проверить, что для комплексной мощности, передаваемой во вторичную обмотку, справедливо соотношение

$$S_{02} = P_{02} + jQ_{02} = \frac{U_{01}U'_{02}}{x_{\delta 0}} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\theta_\Psi\right)} - j\frac{U'^2_{02}}{x_{\delta 0}}, \quad (66)$$

где, очевидно, Q_{02} — то же самое, что $Q_н$, когда $Z_н = R_н$.

Зависимости магнитных потоков от нагрузки

Зависимости потоков в трансформаторе от сопротивления нагрузки даются выражениями (23), (26) и (27), которые в относительных единицах, где все сопротивления отнесены к номинальному $z_{1ном}$ (15), принимают следующий вид:

$$\frac{\dot\Phi_1}{\dot\Phi_{XX}} = 1 - \frac{\underline{R}_1}{\underline{Z}_{K3} + \underline{Z}'_н}; \quad \frac{\dot\Phi_2}{\dot\Phi_{XX}} = \frac{\underline{R}'_2 + \underline{Z}'_н}{\underline{Z}_{K3} + \underline{Z}'_н};$$

$$\frac{\dot\Phi_{\delta 0}}{\dot\Phi_{XX}} = \frac{j\underline{x}_{K3}}{\underline{Z}_{K3} + \underline{Z}'_н}. \quad (67)$$

С другой стороны коэффициент нагрузки $k_{нг} = I_2 / I_{2ном}$ можно представить в виде

$$\frac{I_2}{I_{2ном}} = \frac{I_1}{I_{1ном}} =$$

$$= \frac{U_1 / \sqrt{(\underline{r}_{K3} + \underline{R}'_н)^2 + (x_{K3} + X'_н)^2}}{U_1 / z_{1ном}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{(\underline{r}_{K3} + \underline{R}'_н)^2 + (\underline{x}_{K3} + \underline{X}'_н)^2}}. \quad (68)$$

Задавая значения $\underline{Z}'_н$ от бесконечности (XX) до нуля (КЗ) и вычисляя одновременно с (67) значения (68), можно построить графики зависимости потоков от коэффициента нагрузки. Зависимости (67), (68) универсальны в том смысле, что определяются только относительным значением $\underline{Z}_{K3} = \underline{r}_{K3} + j\underline{x}_{K3}$ и значением угла нагрузки ($\cos\varphi_н = R_н / z_н$).

Пример 3. Идеализированный трансформатор в Примере 1 характеризуется напряжением КЗ $\underline{u}_{K3} = 10{,}5\%$ и $\operatorname{tg}\varphi_{K3} = 17{,}5$. Из этих данных следует:

$$\underline{z}_{K3} = \underline{u}_{K3} / 100\% = 0{,}105; \quad \varphi_{K3} = 86{,}73°;$$

$$\underline{r}_{K3} = \underline{z}_{K3}\cos\varphi_{K3} = 0{,}006;$$

$$\underline{x}_{K3} = \underline{z}_{K3}\sin\varphi_{K3} = 0{,}1048;$$

$$\underline{R}_1 = \underline{r}_{K3} / 2 = 0{,}003; \quad \underline{R}'_2 = \underline{r}_{K3} / 2 = 0{,}003.$$

На рис. 9 иллюстрируется изменение потоков в силовом трансформаторе для случаев активной ($\cos\varphi_н = 1$), активно-индуктивной ($\cos\varphi_н = 0{,}8$) и чисто индуктивной ($\cos\varphi_н = 0$) нагрузок. Диапазон изменения коэффициента нагрузки лежит от $k_{нг}^{XX} = 0$ (т. е. от XX) до значения, соответствующего режиму КЗ:

$$k_{нг}^{K3} = I_2^{K3} / I_{2ном} = 1 / \underline{u}_{K3} = 1 / 0{,}105 = 9{,}524.$$

Показано также изменение угла θ_Ψ между потоками $\dot\Phi_1$ и $\dot\Phi_2$, найденного по формуле

$$\theta_\Psi = \arg(\dot\Phi_1 / \dot\Phi_{XX}) - \arg(\dot\Phi_2 / \dot\Phi_{XX}). \quad (69)$$

Естественно, что вычисления по (69) и по выражению (22) совпадают. Утолщенными линиями выделены кривые для случая чисто активной нагрузки. Кривая Φ_1 / Φ_{XX} дана только для чисто активной нагрузки (для других нагрузок она не отличается от единицы). Кривые для $\cos\varphi_н = 0$ в действительности рассчитаны для угла нагрузки $\varphi_н = 89{,}8°$ (т. е. почти 90°). Кривая $\Phi_{\delta 0}/\Phi_{XX}$ для всех типов нагрузок одинакова. Основываясь на (22), нетрудно показать, что при номинальных нагрузках (то есть при $I_2 / I_{2ном} = 1$) можно написать:

$$\operatorname{tg}\theta_\Psi^{ном} \approx \underline{u}_{K3}\cos\varphi_н.$$

Следовательно

$$\theta_\Psi^{ном}\Big|_{\cos\varphi_н = 1} \approx \operatorname{arctg}(\underline{u}_{K3}\cos\varphi_н) =$$

$$= \operatorname{arctg}(0{,}105 \cdot 1) = 6°$$

$$\theta_\Psi^{ном}\Big|_{\cos\varphi_н = 0{,}8} \approx \operatorname{arctg}(\underline{u}_{K3} 0{,}8) =$$

$$= \operatorname{arctg}(0{,}105 \cdot 0{,}8) = 4{,}8°;$$

$$\theta_\Psi^{ном}\Big|_{\cos\varphi_н = 0} \approx \operatorname{arctg}(\underline{u}_{K3} 0) = 0°,,$$

что согласуется со значениями кривых для θ_Ψ на рис. 9 при $I_2 / I_{2ном} = 1$. В точке КЗ согласно (31) имеем

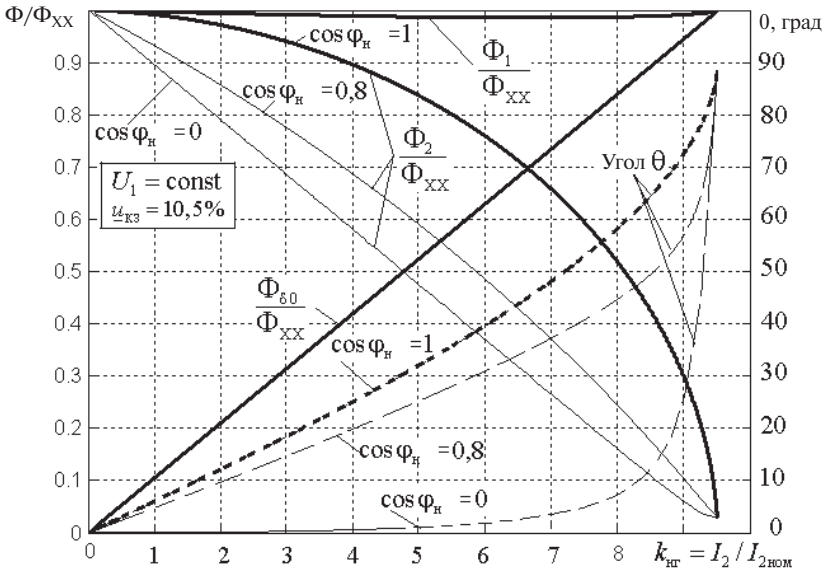


Рис. 9. Изменение магнитных потоков и фазового угла $\theta \equiv \theta_\Psi$ между потоками в стержне и боковом ярме идеализированного трансформатора в зависимости от тока нагрузки (программа: *t_1_paper.m*)

$$\theta_\Psi^{\text{КЗ}} = \operatorname{arctg}\left(\underline{x}_{\text{КЗ}} / \underline{R}'_2\right) =$$

$$= \operatorname{arctg}\left(0{,}1048 / 0{,}003\right) = 88{,}4^\circ , \qquad (70)$$

что также совпадает со значением θ_Ψ в точке КЗ ($I_2 / I_{2\text{ном}} = 9{,}524$) на рис. 9.

Включение идеализированного трансформатора при XX

Из электрической схемы замещения (рис. 10, *а*) следует, что ток холостого хода идеализированного трансформатора равен нулю

$$i_{1\text{идеал}}^{\text{XX}}(t) = 0 , \qquad (71)$$

и мы можем для магнитного потока в стержне трансформатора $\Phi_{\text{ст}}^{\text{XX}}(t) \equiv \Phi_1^{\text{XX}}(t)$ написать уравнение

$$\begin{cases} \dfrac{d(w_1\Phi^{\text{XX}})}{dt} = U_{1m}\sin(\omega t + \psi_u); \\ \Phi_{\text{ст}}^{\text{XX}}(0) = \Phi_{\text{ост}}, \end{cases} \qquad (72)$$

где ψ_u – фазовый угол входного напряжения, а $\Phi_{\text{ост}}$ — остаточный поток в момент включения трансформатора. Решение (72) имеет вид

$$\Phi_{\text{ст}}^{\text{XX}}(t) = \Phi_m^{\text{XX}}\left(\cos\psi_u - \cos(\omega t + \psi_u)\right) + \Phi_{\text{ост}}, \qquad (73)$$

где

$$\Phi_m^{\text{XX}} = \frac{U_{1m}}{\omega w_1} \qquad (74)$$

есть амплитуда установившегося магнитного потока XX. Из (73) следует, что всплеск магнитного потока в стержне определяется двумя величинами — ψ_u и $\Phi_{\text{ост}}$.

На рис. 10,*б* проиллюстрированы случаи включения при $\psi_u = \pi/2$. Как видно, наиболее благоприятные условия имеют место при $\Phi_{\text{ост}} = 0$, когда с первого момента устанавливается нормальный магнитный поток и всплеска потока нет. В остальных случаях, то есть при $\Phi_{\text{ост}} \neq 0$, всплеск магнитного потока всегда будет превышать амплитуду Φ_m^{XX}. В частности, при $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_m^{\text{XX}}$ всплеск потока достигает значения $2\Phi_m^{\text{XX}}$ в момент $\omega t = \pi/2$.

Если фазовый угол напряжения в момент включения трансформатора $\psi_u = 0$, то наиболее благоприятная ситуация в смысле мгновенного установления нормального магнитного потока возникает при $\Phi_{\text{ост}} = -\Phi_m^{\text{XX}}$ (рис. 10, *в*). Если же $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_m^{\text{XX}}$, то переходный процесс происходит наиболее резко, и всплеск потока достигает значения $3\Phi_m^{\text{XX}}$ в момент $\omega t = \pi$. Этот случай рассматривается как наиболее неблагоприятный.

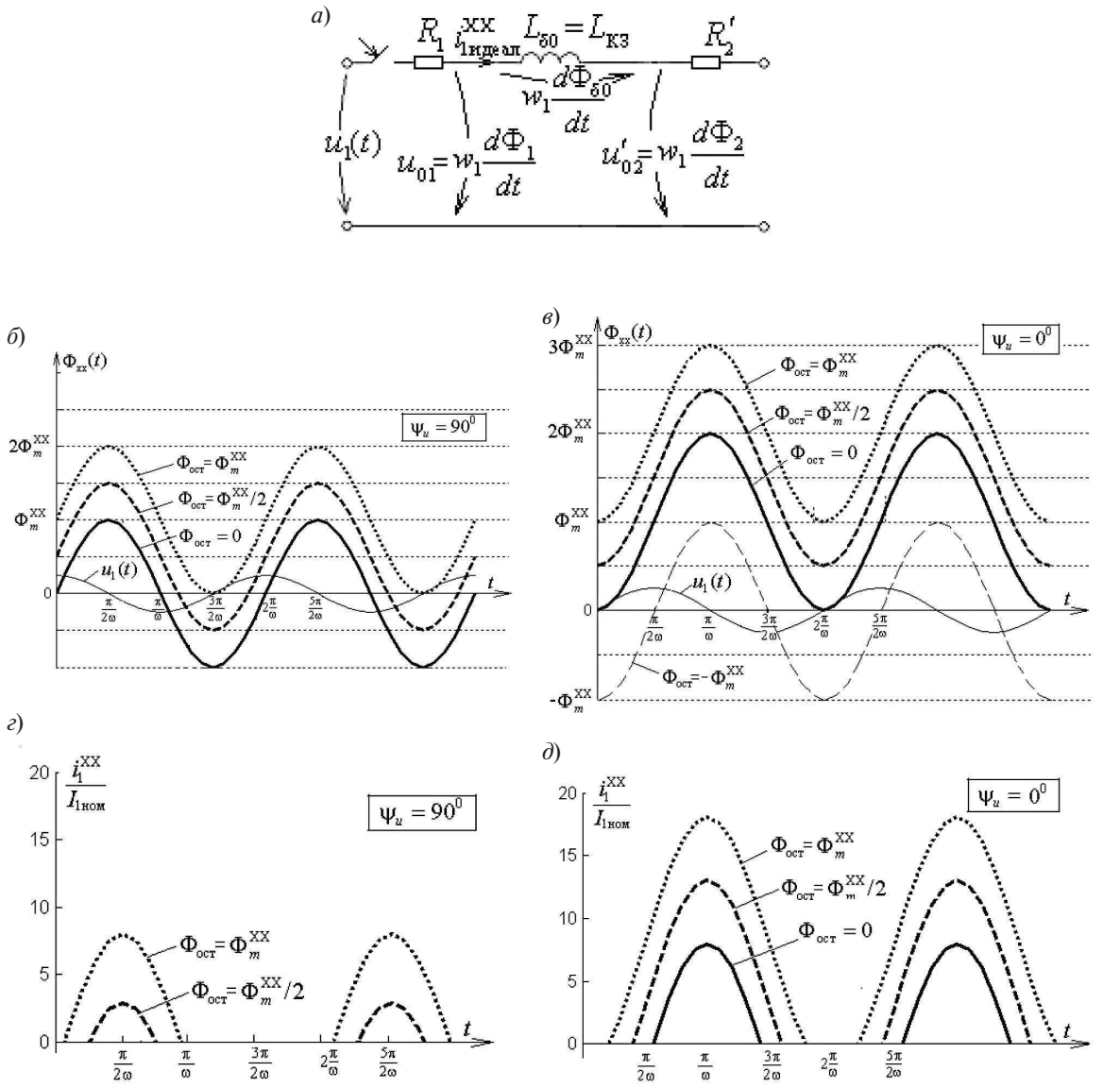


Рис.10. Включение идеализированного трансформатора на XX (программа DINAM_ideal\xx_ideal.m)

Располагая кривой изменения потока $\Phi_{ст}^{XX}(t)$, можно формально по кривой намагничивания $\Psi_{ст}(i)=w_1\Phi_{ст}^{XX}(i)$ искусственным путем найти изменение «реального» тока XX для идеализированного трансформатора $i_1^{XX}(t)$ (который вначале при определении потоков принимался нами равным нулю — см. (71).

Замечание 8. При наиболее простой кусочно-линейной аппроксимации кривой $\Psi(i)$ имеем (рис. 11):

$$i_1^{XX} = 0 \text{ при } |\Phi_{ст}| \le \Phi_S = B_S S_{ст}, \qquad (75)$$

где $B_S = 2\text{Тл}$ — индукция насыщения [8, 9, 11];

$$S_{ст} = \frac{\pi D_{ст}^2}{4}, \qquad L_S = \frac{\mu_0 w^2 S}{h},$$

$$S_{обм} = \frac{\pi D_{обм}^2}{4}. \qquad (76)$$

Здесь $D_{обм} = D_a^0$ — диаметр обмотки НН. Величина L_S представляет собой индуктивность обмотки НН при полном насыщении сердечника («свободная индуктивность» обмотки НН без стали).

Из этой аппроксимации следует, что наибольший ток включения на XX может быть представлен выражением

$$i_{1\,\text{наиб}}^{XX} = w_1 \frac{(\Phi_{\text{наиб}}^{XX} - \Phi_S)}{L_S}, \qquad (77)$$

в которое, как следует из (73), следует подставить величину $\Phi_{\text{наиб}}^{XX} = 2\Phi_m^{XX} + \Phi_{\text{ост}}$:

$$i_{1\text{наиб}}^{XX} = w_1 \frac{(2\Phi_m^{XX} + \Phi_{\text{ост}}) - \Phi_S}{L_S} =$$

$$= \frac{w_1 \Phi_m^{XX}}{L_S}\left(2 - \frac{\Phi_S - \Phi_{\text{ост}}}{\Phi_m^{XX}}\right) =$$

$$= \frac{w_1 \Phi_m^{XX}}{L_S}\left(2 - \frac{B_S - B_{\text{ост}}}{B_m^{XX}}\right).$$

Используя связь $U_{1m} = \omega w_1 \Phi_m^{XX}$, это выражение приведем к виду, известный как формула Шварца для тока включения на ХХ:

$$\boldsymbol{I_{\text{вкл}}^{\text{Шварц}} \equiv i_{1\text{наиб}}^{\text{xx}} = \frac{U_{1m}}{\omega L_S}\left(2 - \frac{B_S - B_{\text{ост}}}{B_m^{XX}}\right).} \qquad (78)$$

Подставив сюда формулу для L_S из (76) и учтя соотношение

$$U_{1m} \approx \omega L_{XX} I_m^{XX} = \omega \frac{\mu_{XX} S_{\text{ст}}}{h}\left(\underline{I}_0 \sqrt{2} I_{1\text{ном}}\right), \qquad (79)$$

можно записать

$$\frac{\boldsymbol{I_{\text{вкл}}^{\text{Шварц}}}}{\boldsymbol{I_{1\text{ ном}}}} = \sqrt{2}\,\underline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0}}\,\frac{\mu_{\text{xx}}}{\mu_{\boldsymbol{0}}}\frac{\boldsymbol{S_{\text{ст}}}}{\boldsymbol{S_{\text{обм}}}}\left[2 - \frac{\boldsymbol{B_S}}{\boldsymbol{B_m^{XX}}} + \frac{\boldsymbol{B_{\text{ост}}}}{\boldsymbol{B_m^{XX}}}\right]. \qquad (80)$$

Пример 4. В силовом трансформаторе из Примера 1 ($U_{1\,\text{ном}} = U_{\text{НН}}$ = 6, 35 кВ, $w_1 = 128$, $z_{1\text{ном}} = 12{,}095$ Ом, $B_m^{XX} = 1{,}65$ Тл) высота обмотки НН равна $h = 873{,}6$ мм, а ее диаметр $D_{\text{обм}} = D_a^0 = 552{,}8$ мм. Исходя из (76) определяем свободную индуктивность обмотки НН

$$L_S = \frac{\mu_0 128^2 (\pi \cdot 0{,}5528^2 / 4)}{0{,}8736} = 0{,}00565 \text{ Гн}.$$

Принимая

$$\frac{B_S}{B_m^{XX}} = \frac{2}{1{,}65} = 1{,}21; \qquad \frac{B_{\text{ост}}}{B_m^{XX}} = 0{,}5,$$

по формуле (78) находим

$$\left.\frac{I_{\text{вкл}}^{\text{Шварц}}}{I_{1\text{ном}}}\right|_{\frac{B_{\text{ост}}}{B_m^{XX}}=0{,}5} =$$

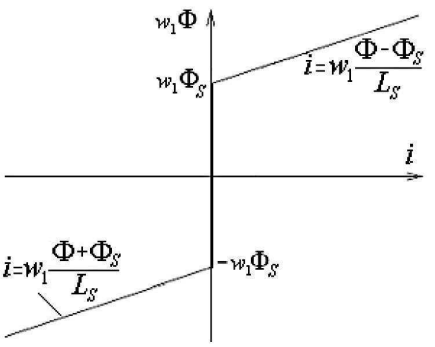


Рис. 11. Вебер-амперная характеристика стержня трансформатора

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot 6350}{314 \cdot 0{,}00565}(2 - 1{,}21 + 0{,}5)\frac{1}{525} = 12{,}6.$$

В случае $B_{\text{ост}} / B_m^{XX} = 1$ имеем

$$\left.\frac{I_{\text{вкл}}^{\text{Шварц}}}{I_{1\text{ном}}}\right|_{\frac{B_{\text{ост}}}{B_m^{XX}}=1} = 17{,}5.$$

Кривые тока включения при $i_1^{XX} > 0$ можно построить исходя из выражения

$$i_1^{XX}(t) = w_1 \frac{\left(\Phi_{\text{ст}}^{XX}(t) - \Phi_S\right)}{L_S} =$$

$$= \frac{\omega w_1 \Phi_m^{XX}}{\omega L_S}\left(\frac{\Phi_{\text{ст}}^{XX}(t) - \Phi_S}{\Phi_m^{XX}}\right) =$$

$$= \frac{U_{1m} / z_{1\text{ном}}}{\omega L_S / z_{1\text{ном}}}\left(\frac{\Phi_{\text{ст}}^{XX}(t)}{\Phi_m^{XX}} - \frac{B_S}{B_m^{XX}}\right),$$

которое для рассматриваемого примера ($\omega L_S / z_{1\,\text{ном}} = 0{,}14$) принимает следующее расчетное соотношение:

$$\frac{i_1^{XX}(t)}{I_{1\text{ном}}} = \frac{\sqrt{2}}{0{,}14}\left(\frac{\Phi_{\text{ст}}^{XX}(t)}{\Phi_m^{XX}} - 1{,}21\right). \qquad (81)$$

По (81) построены кривые тока включения на рис.10, *г* и *д*.

Замечание 9. В реальных трансформаторах все всплески магнитного потока убывают в соответствии с соотношением

$$\Phi_{\text{xx}}(t) \approx$$

$$\approx \Phi_m^{XX}\left(e^{-\frac{t}{\tau}}\cos\psi_u - \cos(\omega t+\psi_u)\right) + \Phi_{ост}\, e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (82)$$

и в магнитопроводе устанавливается поток XX с нормальной амплитудой Φ_m^{XX}. Всплески магнитных потоков оказываются несколько меньше по сравнению с представленными на рис. 10. Полученные соотношения для магнитного потока полностью согласуются с приводимыми в учебниках формулами для переходных процессов в катушках, т. к. при XX трансформатор представляет собой обычный реактор с железным сердечником.

Внезапное КЗ на вторичной обмотке трансформатора

При внезапных КЗ на стороне нагрузки в трансформаторе возникают большие броски токов и механические силы, стремящиеся деформировать обмотки. Под электродинамической стойкостью трансформатора подразумевают его способность без повреждений противостоять действию этих сил. Отсюда понятно, насколько важным является умение находить ударные токи КЗ, т. е. первые наибольшие всплески токов, приводящие к возникновению ударных механических сил, при заданном напряжении сети $u_1 = U_m \sin(\omega t+\psi_u)$. Для определения последних, очевидно, необходимо уметь находить ударные магнитные потоки в межобмоточном пространстве. В этом разделе все выводы сделаны на основе аналитических соотношений. При этом найдена величина постоянного во времени потока $\Delta\Phi_{const}^{КЗ}$, возникающего в стали вследствие внезапного КЗ. Как и ранее, в качестве первичной рассматривается обмотка НН.

Как и в установившемся режиме, необходимо различать три потока: в стержне — $\Phi_1^{КЗ}(t) \equiv \Phi_{ст}^{КЗ}(t)$, в окне — $\Phi_{\delta 0}^{КЗ}(t)$ и в боковом ярме — $\Phi_2^{КЗ}(t) \equiv \Phi_б^{КЗ}(t)$, который по аналогии с (30) следует называть антипотоком внезапного КЗ. Определение потоков требует задания не только начальной фазы напряжения ψ_u в момент внезапного КЗ, но и начального значения магнитного потока в стали $\Phi_{начал}$.

Для получения дифференциальных уравнений переходных процессов следует уравнения (19) переписать для мгновенных значений. Однако проще воспользоваться схемой замещения рис. 2, *б*, представленной также на рис. 11, *а* и *б* для двух наиболее важных случаев внезапного КЗ. В обоих случаях постоянная времени цепи равна

$$\tau_{КЗ} = \frac{L_{\delta 0}}{r_{КЗ}} = \frac{x_{КЗ}}{r_{КЗ}\omega} = \frac{x_{КЗ}T}{r_{КЗ}2\pi} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{КЗ}}{2\pi}T. \quad (83)$$

Замечание 10. Для трансформатора с данными из Примера 1 имеем

$$\tau_{КЗ} = \frac{\underline{x}_{КЗ}}{\underline{r}_{КЗ}\omega} = \frac{0{,}1048}{0{,}006\cdot 314} = 0{,}0556 \text{ сек},$$

что в 2,78 раз больше периода $T = 0{,}02$сек. Если считать, что переходный процесс заканчивается в течение (2–3) τ, то достаточно вывести кривые токов и потоков на интервале (5–7) T. Кривые переходных процессов для трансформатора из Примера 1 представлены на рис. 11. Их подробный анализ представлен ниже в примерах 5, 6 и 7.

Дифференциальное уравнение для тока КЗ в обеих схемах (см. рис. 11) имеет вид

$$r_{КЗ} i_1^{КЗ} + L_{\delta 0}\frac{di_1^{КЗ}}{dt} = U_{1m}\sin(\omega t+\psi_u), \quad (84)$$

где $i_1(0) = 0$.

Решив (84), получаем

$$\boldsymbol{i_1^{КЗ}(t) = I_{1m}^{КЗ}\times}$$

$$\times\left(\boldsymbol{\sin(\omega t+\psi_u-\varphi_{КЗ}) + e^{-\frac{t}{\tau_{КЗ}}}\sin(\varphi_{КЗ}-\psi_u)}\right), \quad (85)$$

где $I_{1m}^{КЗ}$ — амплитуда тока установившегося режима КЗ,

$$I_{1m}^{КЗ} = \frac{U_{1m}}{z_{КЗ}} = \frac{U_{1m}}{\omega L_{\delta 0}}\sin\varphi_{КЗ};\quad \varphi_{КЗ} = \operatorname{arctg}\frac{x_{КЗ}}{r_{КЗ}}. \quad (86)$$

Для мощных трансформаторов $\varphi_{КЗ} \approx 90°$ (см. Замечание 2), что позволяет для них использовать также упрощенное соотношение:

$$i_1^{КЗ}(t) \approx I_{1m}^{КЗ}\left(-\cos(\omega t+\psi_u) + e^{-\frac{t}{\tau_{КЗ}}}\cos\psi_u\right). \quad (87)$$

Здесь и далее пунктиром обводятся приближенные выражения.

Из (87) вытекает, что в мощных трансформаторах:

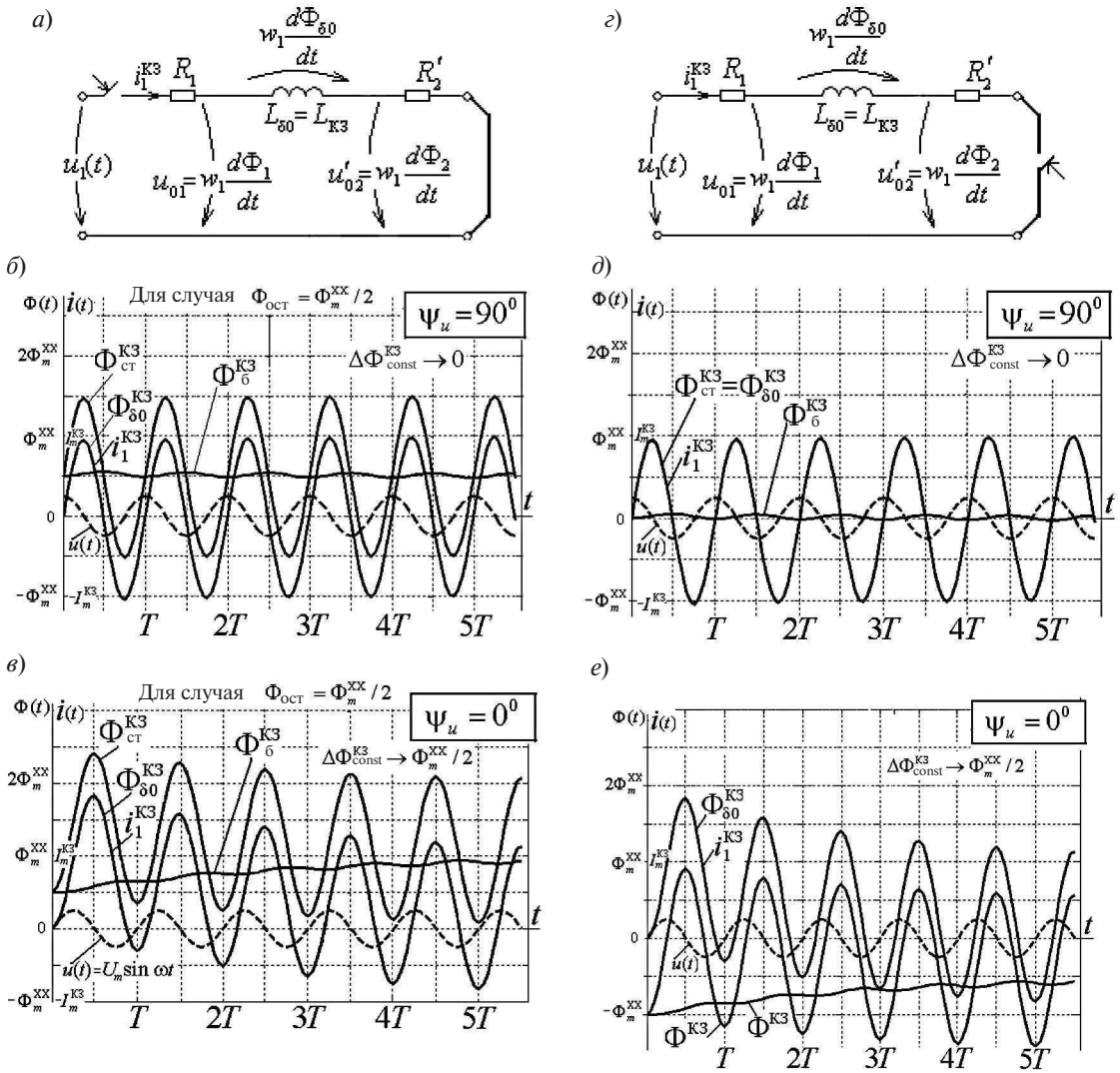


Рис.11. Включение предварительно закороченного трансформатора (*а*, *б*, *в*) и его внезапное КЗ с режима холостого хода (*г*, *д*, *е*) (программа: DINAM_ideal \ kz_paper1c.m)

1. При $\psi_u = 90°$, т. е. в случае, когда напряжение u_1 в момент коммутации имеет максимальное значение, независимо от вида КЗ ток практически с самого начала принимает установившееся синусоидальное значение (рис. 11, *б, д*)

$$i_1^{КЗ}(t)\Big|_{\psi_u = 90^0} \approx I_{1m}^{КЗ} \sin \omega t \,. \qquad (88)$$

2. При $\psi_u = 0°$, т. е. в случае, когда напряжение u_1 в момент коммутации проходит через нуль, независимо от вида КЗ, ток изменяется по закону (рис. 11, *в*, *е*)

$$i_1^{КЗ}(t)\Big|_{\psi_u = 0^0} \approx I_{1m}^{КЗ}\left(e^{-\frac{t}{\tau_{КЗ}}} - \cos \omega t\right), \qquad (89)$$

причем первый всплеск тока (ударный ток КЗ) появляется приблизительно через полпериода после возникновения КЗ, т. е. при $\omega t \approx \pi$ (или $t \approx \pi / \omega = T/2$), и равен

$$i_{1уд}^{КЗ} \approx I_{1m}^{КЗ}\left(e^{-\frac{T/2}{\tau_{КЗ}}} - \cos \pi\right) = I_{1m}^{КЗ}\left(e^{-\frac{T}{2\tau_{КЗ}}} + 1\right). \qquad (90)$$

Отношение

$$K_{уд} = \frac{i_{1уд}^{КЗ}}{I_{1m}^{КЗ}} = e^{-\frac{T}{2\tau_{КЗ}}} + 1 \qquad (91)$$

называют ударным коэффициентом. Из (83) с учетом Замечания 2 следует, что в мощных трансформаторах, в которых

$$\frac{T}{2\tau_{\text{КЗ}}}=\frac{\pi}{\operatorname{tg}\varphi_{\text{КЗ}}}\approx\frac{\pi}{30\text{–}90}, \qquad (92)$$

ударный коэффициент достигает значения

$$K_{\text{уд}}=e^{-\frac{\pi}{30\div90}}+1=1{,}9\text{–}1{,}965, \qquad (93)$$

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

$$i_{1\text{уд}}^{\text{КЗ}}\approx 2I_m^{\text{КЗ}}=2\frac{U_{1m}}{z_{\text{КЗ}}}. \qquad (94)$$

Замечание 11. Для трансформатора из Примера 1 значение тока КЗ со стороны обмотки НН $I_m^{\text{КЗ}}=U_{1m}/z_{\text{КЗ}}=6{,}35\sqrt{2}/1{,}27=7{,}071$ кА, при этом $\tau_{\text{КЗ}}=0{,}0556$ с. По формуле (91) имеем

$$K_{\text{уд}}=e^{-\frac{0{,}02}{2\cdot0{,}0556}}+1=1{,}835,$$

что отображено также на кривых рис. 11, *в* и *е*:

$$K_{\text{уд}}=\frac{\left|i_1^{\text{КЗ}}(t)\right|_{\text{наиб}}}{I_{1m}^{\text{КЗ}}}=1{,}835.$$

Располагая решением для тока в виде (85) или (87), можно по схеме рис. 2, *б* найти выражения для всех трех потоков.

Магнитный поток в межобмоточном пространстве при КЗ связан с током КЗ алгебраической зависимостью

$$\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)=\frac{w_1 i_1^{\text{КЗ}}(t)}{R_{\delta0}^{\text{М}}}=\frac{L_{\delta0}i_1^{\text{КЗ}}(t)}{w_1},$$

или после подстановки правой части (85) с учетом выражения (86)

$$\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)=\frac{L_{\delta0}}{w_1}\left(\frac{U_{1m}}{\omega L_{\delta0}}\sin\varphi_{\text{КЗ}}\right)\times$$

$$\times\left(\sin(\omega t+\psi_u-\varphi_{\text{КЗ}})+\sin(\varphi_{\text{КЗ}}-\psi_u)e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right).$$

По форме кривая $\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)$ повторяет кривую тока $i_1^{\text{КЗ}}(t)$, что иллюстрируется также на рис.11. С учетом обозначения (74) получаем выражение

$$\boldsymbol{\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)}=$$

$$=\boldsymbol{\Phi_m^{\text{XX}}}\left(\boldsymbol{\sin(\omega t+\psi_u-\varphi_{\text{КЗ}})+\sin(\varphi_{\text{КЗ}}-\psi_u)e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}}\right)\times$$

$$\boldsymbol{\times\sin\varphi_{\text{КЗ}}}, \qquad (95)$$

которое для мощных трансформаторов, т. е. при условии $\varphi_{\text{КЗ}}\approx 90^\circ$, можно представить в виде

$$\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)\approx\Phi_m^{\text{XX}}\left(-\cos(\omega t+\psi_u)+\cos\psi_u e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right). \qquad (96)$$

3. На основании (95) и (96) заключаем: как и ток $i_1^{\text{КЗ}}(t)$, установившееся значение потока в окне не может содержать постоянной составляющей.

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

$$\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u=90^\circ}\approx\Phi_m^{\text{XX}}\sin\omega t. \qquad (97)$$

5. Если КЗ произошло при $\psi_u=0^\circ$, то поток в окне будет изменяться со всплесками:

$$\Phi_{\delta0}^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\Psi_u=0^\circ}\approx\Phi_m^{\text{XX}}\left(e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}-\cos\omega t\right). \qquad (98)$$

И в окне трансформатора приблизительно через $t\approx\pi/\omega=T/2$ возникнет ударный поток с тем же ударным коэффициентом, как и для тока, т. е.

$$K_{\text{уд}}=\frac{\Phi_{\delta0\,\text{уд}}^{\text{КЗ}}}{\Phi_m^{\text{XX}}}=\frac{i_{1\text{уд}}^{\text{КЗ}}}{I_{1m}^{\text{КЗ}}}=e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{КЗ}}}}+1. \qquad (99)$$

Следовательно, поскольку $\tau_{\text{КЗ}}>>T$, то

$$\Phi_{\delta0\,\text{уд}}^{\text{КЗ}}\approx 2\Phi_m^{\text{XX}}. \qquad (100)$$

Магнитный поток в стержне после КЗ определяется из уравнения (рис. 11)

$$R_1 i_1^{\text{КЗ}}+\frac{d\left(w_1\Phi_1^{\text{КЗ}}\right)}{dt}=U_{1m}\sin(\omega t+\psi_u), \qquad (101)$$

где $\Phi_1^{\text{КЗ}}(0)=\Phi_{\text{начал}}$; $\Phi_{\text{начал}}$ — значение магнитного потока во всем магнитопроводе в момент КЗ. Поскольку выражение для тока уже известно, то можем написать

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)=\frac{1}{w_1}\int_0^t U_{1m}\sin(\omega t+\psi_u)\,dt-$$

$$-\frac{R_1}{w_1}\int_0^t i_1^{\text{КЗ}}(t)\,dt+\Phi_{\text{начал}}. \qquad (102)$$

Подставив во второй интеграл этого выражения правую часть (85) и выполнив интегрирование, получаем с учетом обозначений (74), (83) и (86)

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t) = \Phi_m^{\text{XX}}\left[-\cos(\omega t + \psi_u) + \right.$$

$$+\left(\frac{R_1}{x_{\delta 0}}\cos(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{КЗ}}) + \right.$$

$$\left.\left.+\frac{R_1}{r_{\text{КЗ}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}} \sin(\varphi_{\text{КЗ}} - \psi_u)\right)\sin\varphi_{\text{КЗ}}\right] +$$

$$+\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}, \qquad (103)$$

где $\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}$ – постоянный магнитный поток, внедренный в сталь в результате внезапного КЗ,

$$\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} = \Phi_m^{\text{XX}}\left[\cos\psi_u - \left(\frac{R_1}{x_{\delta 0}}\cos(\varphi_{\text{КЗ}} - \psi_u) + \right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{R_1}{r_{\text{КЗ}}}\sin(\varphi_{\text{КЗ}} - \psi_u)\right)\sin\varphi_{\text{КЗ}}\right], \qquad (104)$$

что при условии $\varphi_{\text{КЗ}} \approx 90^\circ$ можно представить в виде

$$\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} \approx \Phi_m^{\text{XX}}\left[\left(1 - \frac{R_1}{r_{\text{КЗ}}}\right)\cos\psi_u - \frac{R_1}{x_{\delta 0}}\sin\psi_u\right]. \qquad (105)$$

Так как обычно $R_1 \approx 0{,}5 r_{\text{КЗ}}$ и $R_1 / x_{\delta 0} \approx \approx 1/(2\text{tg}\varphi_{\text{КЗ}})$, то практически

$$\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} \approx \frac{\Phi_m^{\text{XX}}}{2}\cos\psi_u, \qquad (106)$$

причем для потока в стержне можно при этих условиях вместо (103) воспользоваться приближенным выражением

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t) \approx$$

$$\approx \Phi_m^{\text{XX}}\left[-\cos(\omega t + \psi_u) + 0{,}5 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\cos\psi_u\right] + \qquad (107)$$

$$+\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}$$

6. На основании (103) заключаем: колебания потока стержня $\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)$ в переходном процессе определяются косинусоидой

$$\Phi_m^{\text{XX}}\cos(\omega t + \psi_u).$$

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

$$\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} = \Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}. \qquad (108)$$

8. Таким образом, показано, что внезапное КЗ приводит к намагничиванию стали постоянным во времени потоком $\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}$ или индукцией

$$\Delta B_{\text{const}}^{\text{КЗ}} = \frac{\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}}{s_{\text{СТ}}} \approx \frac{B_m^{\text{XX}}}{2}\cos\psi_u. \qquad (109)$$

Более точные соотношения нетрудно написать на основе (103) и (104).

Магнитный поток в боковом ярме после КЗ находим из соотношения

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t) = \Phi_1^{\text{КЗ}}(t) - \Phi_{\delta 0}^{\text{КЗ}}(t),$$

после подстановки в которое правых частей (85) и (95), а также несложной перегруппировки слагаемых получаем выражение

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t) = \Phi_m^{\text{XX}}\left\{-\cos(\omega t + \psi_u) + \right.$$

$$+\left[-\sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{КЗ}}) + \frac{R_1}{x_{\delta 0}}\cos(\omega t + \psi_u - \varphi_{\text{КЗ}}) - \right.$$

$$\left.\left.-\left(1 - \frac{R_1}{r_{\text{КЗ}}}\right)e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\sin(\varphi_{\text{КЗ}} - \psi_u)\right]\sin\varphi_{\text{КЗ}}\right\} +$$

$$+\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}, \qquad (110)$$

которое для мощных трансформаторов ($\varphi_{\text{КЗ}} \approx \approx 90^\circ$) принимает вид

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t) \approx$$

$$\approx \Phi_m^{\text{XX}}\left(\frac{R_1}{x_{\delta 0}}\sin(\omega t + \psi_u) - 0{,}5 e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\cos\psi_u\right) + \qquad (111)$$

$$+\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}$$

9. В отличие от $\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)$ колебания кривой потока $\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)$ в боковом ярме в переходном процессе определяются не косинусоидой, а синусоидой $(R_1 / x_{\delta 0})\Phi_m^{\text{XX}} \sin(\omega t + \psi_u)$, хотя и весьма малой амплитуды.

10. Следовательно, как и при установившемся КЗ, при внезапном КЗ поток $\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)$ в боковом ярме ведет себя как антипоток в том смысле, что его колебания (весьма малые) в переходном процессе отстают от колебаний потока $\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)$ на угол, близкий к 90°. Если пренебречь этими колебаниями, то можно сказать, что в результате внезапного КЗ в боковом ярме возникает практически постоянный магнитный поток, нарастающий по экспоненте:

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t) \approx \Phi_m^{\text{XX}}\left(-0{,}5e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\cos\psi_u\right) + \\ + \Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + \Phi_{\text{начал}}. \quad (112)$$

Эта особенность зависимости $\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)$ наблюдалась и в реальных трансформаторах в начале КЗ, что впервые показано в [15] на основе численных расчетов.

Замечание 12. Графики переходных процессов на рис.11 рассчитаны по точным формулам (85), (95), (103), (104), (110). Однако, поскольку для трансформатора из Примера 1 угол $\varphi_{\text{КЗ}} = 86{,}73°$, т. е. почти 90°, анализ графиков можно вести на основе приближенных соотношений (87), (96) и т. д.

Пример 5. Рассмотрим переходные процессы при включении предварительно «закороченного» трансформатора (рис. 11, *а*) с данными из Примера 1. В этом случае до момента возникновения КЗ в стали мог быть остаточный магнитный поток, т. е. $\Phi_{\text{начал}} = \Phi_{\text{ост}}$.

При $\psi_u = 90°$, т. е. в случае, когда кривая напряжения u_1 в момент замыкания имеет максимальное значение, почти сразу образуются установившиеся значения тока (88) и потока в окне (97) (см. рис. 11, *б*). Согласно (106) внедряемый в сталь постоянный поток стремится к нулю. $\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u=90°} \to 0$ (точное значение по (104) равно $5{,}86\cdot10^{-5}\Phi_m^{\text{XX}}$), в соответствии с (107) поток в стержне будет практически изменяться по закону

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u=90°} \approx \Phi_m^{\text{XX}} \sin\omega t + \Phi_{\text{ост}}, \quad (113)$$

совпадая по фазе с потоком в окне $\Phi_{\delta 0}^{\text{КЗ}}(t)$. Очевидно, что в реальном трансформаторе в этом случае при значительной величине $\Phi_{\text{ост}}$ стержень будет насыщаться. В боковом ярме согласно (111) практически сразу установится поток

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u=90°} \approx \frac{R_1}{x_{\delta 0}}\Phi_m^{\text{XX}} \cos\omega t + \Phi_{\text{ост}}, \quad (114)$$

отстающий по фазе на $\pi/2$ от потока в стержне. Практически (см. также (112))

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u=90°} \approx \Phi_{\text{ост}}, \quad (115)$$

что наглядно иллюстрирует рис. 11, *б* при $\Phi_{\text{ост}} = \Phi_m^{\text{XX}}/2$.

При $\psi_u = 0°$ имеют место значительные всплески тока и потоков (рис. 11, *в*). Ток практически изменяется по закону (89). Ударный ток КЗ возникает примерно в момент $t = T/2$. В этот же момент возникает ударный поток в окне, изменяющийся по закону (98). В отличие от рассмотренного выше случая, внедряемый в сталь вследствие внезапного КЗ постоянный магнитный поток оказывается весьма значительным. Согласно (106)

$$\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u=0} \approx \frac{1}{2}\Phi_m^{\text{XX}}. \quad (116)$$

Пользуясь соотношением (107), для потока в стержне получаем

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)_{\psi_u=0} \approx$$

$$\approx \Phi_m^{\text{XX}}\left(-\cos\omega t + \frac{1}{2}e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right) + \frac{1}{2}\Phi_m^{\text{XX}} + \Phi_{\text{ост}}. \quad (117)$$

Поток в боковом ярме находим по формуле (111):

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u=0} \approx$$

$$\approx \Phi_m^{\text{XX}}\left(\frac{R_1}{x_{\delta 0}}\sin\omega t - \frac{1}{2}e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right) + \frac{1}{2}\Phi_m^{\text{XX}} + \Phi_{\text{ост}}, \quad (118)$$

Если пренебречь незначительными колебаниями, то получаем апериодический процесс (см. также (112))

$$\Phi_{\text{дст}}^{\text{КЗ}}(t) \approx \frac{\Phi_m^{\text{XX}}}{2}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right) + \Phi \quad , \qquad (119)$$

объясняющий практически экспоненциальный характер нарастания потока в боковом ярме.

Пример 6. Рассмотрим переходные процессы при внезапном КЗ вторичной обмотки трансформатора, работавшего в режиме ХХ (рис. 11, *г*). В режиме ХХ поток $\dot{\Phi}_m^{\text{XX}}$ отставал по фазе от напряжения $\dot{U}_1$ на 90° (рис. 12, *а*). Поэтому, в отличие от предыдущего варианта, здесь значение $\Phi_{\text{начал}}$ не произвольно, а определяется значением магнитного потока в магнитопроводе в установившемся режиме ХХ в момент, предшествующий КЗ.

В случае $\psi_u = 90°$ очевидно, что

$$\Phi_{\text{начал}}\Big|_{\psi_u = 90°} = 0 \, . \qquad (120)$$

Поскольку ток в первичной обмотке и поток в окне не зависят от $\Phi_{\text{начал}}$, то их выражения (как и в Примере 5 при $\psi_u = 90°$) совпадают с выражениями (88), (97). Ориентируясь на (106), находим, что внедряемый постоянный поток $\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u = 90°} = 0$, и для потока в стержне согласно (107) получаем выражение

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u = 90°} \approx \Phi_m^{\text{XX}} \sin \omega t \, , \qquad (121)$$

совпадающее с формулой (97) для потока в окне $\Phi_{\delta 0}^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u = 90°}$. Поток в боковом ярме, определяемый по формуле (111), равен

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u = 90°} \approx \frac{R_1}{x_{\delta 0}} \Phi_m^{\text{XX}} \cos \omega t, \qquad (122)$$

что и демонстрирует почти равный нулю график $\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)$ на рис. 11, *д*.

В случае $\psi_u = 0°$ очевидно, что

$$\Phi_{\text{начал}}\Big|_{\psi_u = 0°} = -\Phi_m^{\text{XX}} \, . \qquad (123)$$

Однако ток и магнитный поток в окне будут изменяться так же, как в Примере 5 при $\psi_u = 0°$, т. е. в соответствии с выражениями (89) и (98) (см. рис. 11, *е*) с образованием ударных значений при $t \approx T/2$. Также одинаковыми будут внедряемые в сталь постоянные потоки (106) вследствие внезапного КЗ, то есть

$$\Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u = 0} \approx \frac{1}{2}\Phi_m^{\text{XX}} \, ,$$

и, следовательно,

$$\Phi_{\text{начал}}\Big|_{\psi_u = 0°} + \Delta\Phi_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u = 0} = -\frac{1}{2}\Phi_m^{\text{XX}} . \qquad (125)$$

В результате согласно (107) для потока в стержне получаем выражение

$$\Phi_1^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u = 0°} = -\Phi_m^{\text{XX}}\left[\cos \omega t + \frac{1}{2}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right)\right], \qquad (126)$$

из которого следует, что при $t \to \infty$ этот поток колеблется относительно величины $(-0{,}5\Phi_m^{\text{XX}})$, что видно на графике рис. 11, *е*. Видно также, что относительно этой же величины при $t \to \infty$ будет колебаться (хотя и с весьма малой амплитудой) и поток в боковом ярме. Действительно, из (111) следует

$$\Phi_2^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\psi_u = 0°} \approx$$

$$\approx \Phi_m^{\text{XX}}\left[\frac{R_1}{x_{\delta 0}} \sin \omega t - \frac{1}{2}\left(1 + e^{-\frac{t}{\tau_{\text{КЗ}}}}\right)\right]. \qquad (127)$$

Используя (108) и (109), для постоянной индукции в стали получаем

$$B_{\text{const}}^{\text{КЗ}}\Big|_{\psi_u = 0} = \Delta B_{\text{const}}^{\text{КЗ}} + B_{\text{ост}} \approx$$

$$\approx \frac{B_m^{\text{XX}}}{2} \cos \psi_u + B_{\text{ост}} \, . \qquad (128)$$

Сравнительный анализ кривых на рис.11 подтверждает известный факт, что наиболее опасной с точки зрения электромагнитных перегрузок является ситуация, иллюстрируемая на рис. 11, *в*: видно, что при более значительных величинах остаточного потока $\Phi_{\text{ост}}$ эти перегрузки еще более увеличатся. Влияние остаточного намагничивания демонстрирует рис.12 для графиков магнитных индукций в стержне ($B_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}(t) = \Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}(t)/s_{\text{ст}}$, где $s_{\text{ст}}$ — сечение стержня) и в боковом ярме $B_{\text{б}}^{\text{КЗ}}(t) = \Phi_{\text{б}}^{\text{КЗ}}(t)/s_{\text{б}}$ (где $s_{\text{б}} = s_{\text{ст}}$). Очевидно, гра-

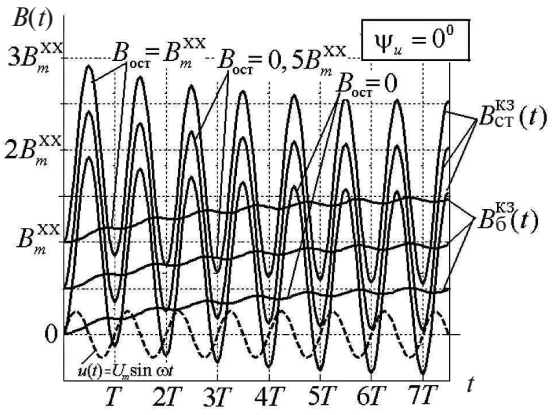


Рис. 12. Изменение индукции в стержне $B_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}(t)$ и боковом ярме $B_{\text{б}}^{\text{КЗ}}(t)$ при включении трансформатора с короткозамкнутой обмоткой ВН при наличии в стали остаточной индукции $B_{\text{ост}}$

фики для случая $B_{\text{ост}} = 0{,}5B_m^{\text{XX}}$ повторяют по форме кривые $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}(t)$ и $\Phi_{\text{б}}^{\text{КЗ}}(t)$ на рис. 11, *в*.

Наибольшее значение индукции практически имеет место при $t = T/2$. Пользуясь выражениями (107) и (109), для этого момента времени находим формулу для наибольшей индукции, возникающей при подаче напряжения на короткозамкнутый трансформатор (рис.11, *а*):

$$B_{\text{ст(наиб)}}^{\text{КЗ}} = B_{\text{ст}}^{\text{КЗ}}(t)\Big|_{\substack{\psi_u=0 \\ t=T/2}} \approx \approx B_m^{\text{XX}}\left(1{,}5 + 0{,}5\cdot e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{КЗ}}}}\right) + B_{\text{ост}}. \qquad (129)$$

Пример 7. Для трансформатора из Примера 1 значение $B_m^{\text{XX}} = 1{,}65$ Тл. Далее из Замечания 10 следует, что для него $2\tau_{\text{КЗ}}/T = 2\cdot 2{,}78 = 5{,}56$ и

$$1{,}5 + 0{,}5\cdot e^{-\frac{T}{2\tau_{\text{КЗ}}}} = 1{,}5 + 0{,}5\cdot e^{-\frac{1}{5{,}56}} = 1{,}91.$$

По формуле (129) находим значения наибольшей индукции при КЗ (табл. 2).

Данные табл.2 соответствуют графикам рис.12. Как видим, во всех трех случаях индукция в стержне существенно превышает значение индукции насыщения 2 Тл (рис.11), что указывает на необходимость использования более точных моделей при значительном увеличении ударного тока КЗ [15]. В последней колонке табл.2 представлены также значения постоянной составляющей индукции в стали, рассчитанной по (128). Ее возникновение в стали при отсутствии $B_{\text{ост}}$ впервые демонстрировалось в [15], где также впервые наблюдался общий вид кривых $B_{\text{б}}(t)$ (в виде $\Phi_{\text{б}}(t) = B_{\text{б}}(t)s_{\text{стали}}$).

Завершающим этапом анализа электродинамической устойчивости является расчет ударных сил, действующих на обмотки при КЗ. При одинаковой высоте обмоток на них действуют только радиальные силы, сжимающие обмотку НН и растягивающие обмотку ВН. Для их определения надо знать среднее значение индукции по ширине обмоток при ударном токе КЗ. В случае тонкой обмотки ее можно представить в виде

$$B_{\text{ср}}^{\text{ударн}} = \frac{1}{2}B_{\delta}^{\text{ударн}} =$$

Таблица 2

Наибольшая индукция при подаче напряжения на «закороченный» трансформатор

$B_{\text{ост}}$	$B_{\text{ст наиб}}^{\text{КЗ}}$ (по ф. (129))	$B_{\text{ст наиб}}^{\text{КЗ}}$, Тл	$B_{\text{const}}^{\text{КЗ}}$ (по ф. (128))
0	$1{,}91B_m^{\text{XX}}$	3,2	$0{,}5B_m^{\text{XX}}$
$0{,}5B_m^{\text{XX}}$	$2{,}41B_m^{\text{XX}}$	3,9	B_m^{XX}
B_m^{XX}	$2{,}91B_m^{\text{XX}}$	4,8	$1{,}5B_m^{\text{XX}}$

$$= \frac{1}{2}\mu_0 \frac{w_1 i_{1уд}^{КЗ}}{h} = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{w_1}{h} I_{1m}^{КЗ} K_{уд}. \qquad (130)$$

Тогда для силы, действующей на виток обмотки НН длиной πD_a^0, имеем

$$f_1^{ударн} = B_{ср}^{ударн} i_{1уд}^{КЗ} \pi D_a^0 =$$

$$= B_{ср}^{ударн} K_{уд} I_{1m}^{КЗ} \pi D_a^0 = f_{1m}^{КЗ} K_{уд}^2, \qquad (131)$$

где $f_{1m}^{КЗ}$ — амплитуда радиальной силы, сжимающей виток обмотки НН при установившемся КЗ, равная

$$f_{1m}^{КЗ} = -\frac{\mu_0 w_1 \pi D_a^0}{2h} (I_{1m}^{КЗ})^2. \qquad (132)$$

Сжимающая виток сила в его поперечном сечении равна

$$f_{1\sigma}^{ударн} = \frac{f_1^{ударн}}{2\pi} = f_{1\sigma m}^{КЗ} K_{уд}^2, \qquad (133)$$

где $f_{1\sigma m}^{КЗ}$ — амплитуда силы, сжимающей виток обмотки НН в его поперечном сечении, при установившемся КЗ

$$f_{1\sigma m}^{КЗ} = \frac{f_{1m}^{КЗ}}{2\pi} = \frac{\mu_0 w_1 D_a^0}{4h} (I_{1m}^{КЗ})^2. \qquad (134)$$

Аналогичным образом выражаются растягивающие усилия обмотки ВН:

$$f_2^{ударн} = f_{2m}^{КЗ} K_{уд}^2; \quad f_{2\sigma}^{ударн} = f_{2\sigma m}^{КЗ} K_{уд}^2;$$

$$f_{2\sigma m}^{КЗ} = f_{2m}^{КЗ} / 2\pi. \qquad (135)$$

Однако их проще найти пересчетом сил, полученных для обмотки НН:

$$f_2^{ударн} = \frac{w_1 D_b^0}{w_2 D_a^0} f_1^{ударн}; \quad f_{2\sigma}^{ударн} = \frac{w_1 D_b^0}{w_2 D_a^0} f_{1\sigma}^{ударн};$$

$$f_{2\sigma m}^{КЗ} = \frac{w_1 D_b^0}{w_2 D_a^0} f_{1\sigma m}^{КЗ}. \qquad (136)$$

Пример 8. Для трансформатора с данными из Примера 1 согласно формуле (134) сила, сжимающая НН-виток при установившемся КЗ равна

$$f_{1\sigma m}^{КЗ} = \frac{\mu_0 128 \cdot 0{,}5528}{4 \cdot 0{,}8736} (7071)^2 = 1272 \frac{Н}{виток}.$$

А сила, растягивающая ВН-виток, при установившемся КЗ будет

$$f_{2\sigma m}^{КЗ} = \frac{w_1 D_b}{w_2 D_a} f_{1\sigma m}^{КЗ} =$$

$$= \frac{128 \cdot 0{,}7226}{1341 \cdot 0{,}5528} 1272 = 159 \frac{Н}{виток}.$$

Для ударных значений этих сил при внезапном КЗ можно записать

$$\frac{f_{1\sigma}^{ударн}}{f_{1\sigma m}^{КЗ}} = \frac{f_{2\sigma}^{ударн}}{f_{2\sigma m}^{КЗ}} = K_{уд}^2 = 1{,}835^2 = 3{,}367.$$

Для определения механических напряжений необходимо задать сечения витков.

Заключение

Показано, что традиционная точка зрения с ее представлениями об общем потоке и общей МДС в магнитопроводе завела в тупик и задержала развитие теории трансформатора более чем на 100 лет. Новый взгляд, основанный на учете реальных потоков, привел к открытию ряда положений, существенных для понимания принципа действия и проектирования трансформаторов.

В частности, показана необходимость существования фазового сдвига между потоками в стержне и боковом ярме как условия передачи энергии в трансформаторе в установившихся режимах.

В режимах установившегося КЗ эти потоки в трансформаторе с тонкими обмотками почти взаимно ортогональны. Внезапное КЗ сопровождается появлением постоянного магнитного потока в стали. При этом характеры изменения магнитных потоков в стержне и боковом ярме различны: в то время как один из них имеет колебательный характер, другой изменяется почти по экспоненте (с пренебрежимо малыми колебаниями).

Достоверность этих положений подтверждаются аналитическими соотношениями, методика получения которых может служить ориентиром для исследования реальных трансформаторов, а также пересмотра теории асинхронных машин. В целом представленный материал является базовым для построения общей теории трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, Г.Н.** Трансформаторы и реакторы. Новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.

2. **Шакиров, М.А.** Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / М.А. Шакиров.— Электричество, 2005, № 11.— С. 15–27.

3. **Васютинский, С.Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов [Текст] / С.Б. Васютинский.— Л.: Энергия, 1970.

4. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек.— Л: Энергия, 1974.

5. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины [Текст] / А.В. Иванов-Смоленский.— М.: Энергия, 1980.

6. **Сергеенков, Б.Н.** Электрические машины: Трансформаторы [Текст] / Б.Н. Сергеенков, В.М. Кисилев, Н.А. Акимова.— М.: Высшая школа, 1989.

7. **Копылов, И.П.** Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов.— М.: Высшая школа, 2001.

8. Силовые трансформаторы [Текст]: Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова и А.К. Лоханина.— М.: Энергоиздат, 2004.

9. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях [Текст] // Труды ВЭИ / Под редакцией А.И Лурье.— М.: Знак, 2005.

10. **Лейтес, Л.В.** Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов.— М.: Энергия, 1974.

11. **Лейтес, Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л.В. Лейтес.— М.: Энергия, 1981.

12. **Лейтес, Л.В.** Эквивалентная схема двухобмоточного трансформатора: опыты XX и КЗ [Текст] / Л.В. Лейтес // Труды ВЭИ. Вып.79.— М., 1964.

13. **Шакиров, М.А.** Теоретические основы электротехники. Тензоры в ТОЭ. Электродинамика. Теория относительности [Текст] / М.А. Шакиров.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.

14. **Шакиров, М.А.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиюн // Электричество.— 2010. № 3.

15. **Шакиров, М.А.** 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2010, №5.

16. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов, Лиюн Дуань // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 1(95).

17. **Брон, О.Б.** Электромагнитное поле как вид материи [Текст] / О.Б. Брон.— М.: ГЭИ, 1962.

УДК 533.9.15

Е.Ю. Степанов, Р.В. Долиновская, С.А. Шабалин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ПЛАЗМОТРОНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИЗМЕНЕНИЕМ РОДА И РАСХОДА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ

Электродуговые генераторы плотной плазмы (плазмотроны) представляют собой мощные электроразрядные устройства, в которых происходит преобразование энергии сильноточных импульсов в энергию рабочего газа с высокой энтальпией. Эти устройства генерируют низкотемпературную плазму, которая находит широкое применение в масштабных физических экспериментах, моделировании воздействия высоких температур, плазмохимии и промышленности.

На базе Института электроэнергетики и электрофизики Российской академии наук (ИЭЭ РАН) разработано множество конструкций однофазных и трехфазных плазмотронов переменного тока. Устройства имеют мощность от единиц до сотен кВт и рабочее напряжение от 700 В до 10 кВ. На рис. 1 показан однофазный плазмотрон с электродами стрежневого типа в процессе работы на воздух.

Корпус плазмотрона выполнен из нержавеющей стали. Конструкция включает в себя

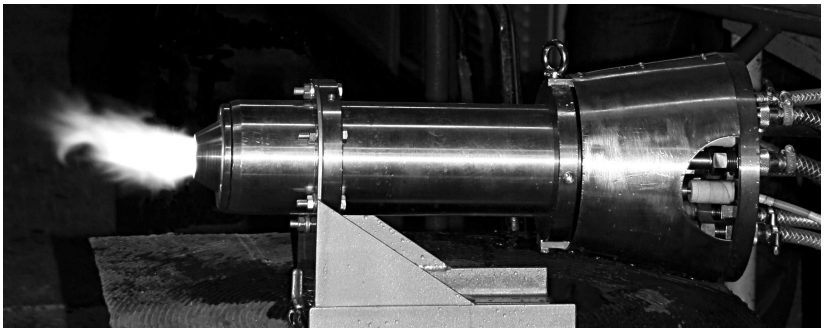


Рис. 1. Высоковольтный генератор плазмы переменного тока
со стержневыми электродами

рубашки водяного охлаждения. В корпусе плазмотрона предусмотрены сходящиеся цилиндрические каналы, в каждом из которых реализован тангенциальный вдув газа. Такая мера помогает защитить корпус от воздействия химически и термически агрессивных сред. Электроды — сменные и изготавливаются из сплава железа и меди.

Приведем краткое описание принципа работы плазмотрона, изображенного на рис. 1. При подаче на электроды рабочего напряжения (10 кВ) происходит электрический пробой между ними и стенками каналов. Образовавшиеся электрические дуги движутся в сторону сопла под действием электродинамических и газодинамических сил. В начальный момент времени дуга движется в радиальном направлении. Вместе с этим изменяется зазор между электродом и стенкой канала. Одна из привязок дуги в результате такого движения фиксируется на торце электрода, а другая продолжает двигаться по стенке канала и доходит до торцевой кромки. В этот момент происходит сцепление с дугой другого канала. Непременным условием протекания описанного процесса является такая длина канала плазмотрона, которая меньше длины самоустанавливающейся дуги. При смене полярности питающего напряжения дуга инициируется в канале, насыщенном носителями заряда предыдущего рабочего полупериода. В случае их малой концентрации зажигание происходит в месте наименьшего пути дуги. Плазмообразующий газ, являясь рабочим телом плазмотрона, нагревается и выходит из сопловой части.

На рис. 2 приведены осциллограммы работы однофазного высоковольтного электродугового плазмотрона переменного тока при разных расходах плазмообразующего газа.

Анализ осциллограмм показывает: в данном диапазоне расходов плазмообразующего газа ток дуги не изменяется. Это свидетельствует о том, что поведение системы питания носит характер источника тока. Для ограничения тока дуги в цепь системы питания включают мощные водоохлаждаемые реакторы. При работе на частоте сети падение напряжения на токоограничивающем реакторе составляет до половины амплитуды напряжения питания. Данное обстоятельство увеличивает проектную стоимость конструкции источника питания. Напряжение на нагрузке испытывает видимое влияние смены расхода газа. Падение напряжения на дуге увеличивается с ростом расхода газа. Данное утверждение справедливо и для случая использования углекислого газа. Диапазон исследуемых расходов в случае опытов с углекислым газом составлял 1,1–1,6 г/с.

При рассмотрении системы «источник питания — электродуговой плазмотрон как нагрузка» интересен анализ мгновенного сопротивления дугового канала в зависимости от мгновенных значений тока и напряжения, что позволит узнать мощность, выделяемую в дуге, — один из важнейших качественных показателей работы системы. Разработчики стремятся добиться увеличения вклада сопротивления дугового канала в общее сопротивления электрической цепи. Зависимость динамического изменения сопротивления от времени приведена на рис. 3.

Из аналиа данной зависимости следует, что минимальное значение сопротивления дугового канала составляет 40 Ом для исследуемого диапазона расходов газа. Данная величина достига-

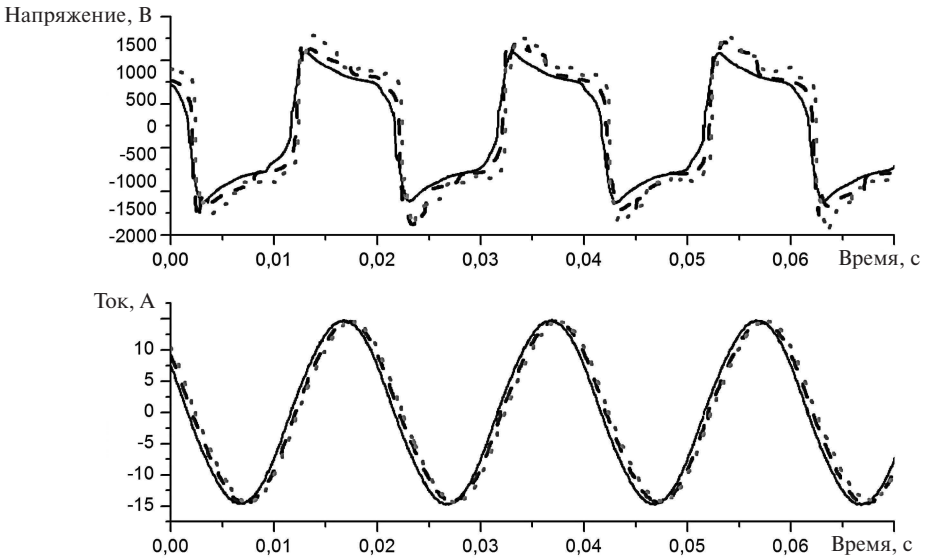


Рис. 2. Зависимость тока и напряжения от времени при расходе воздуха 1,26 (——), 2,52 (– –) и 3,78 (- - -) г/с

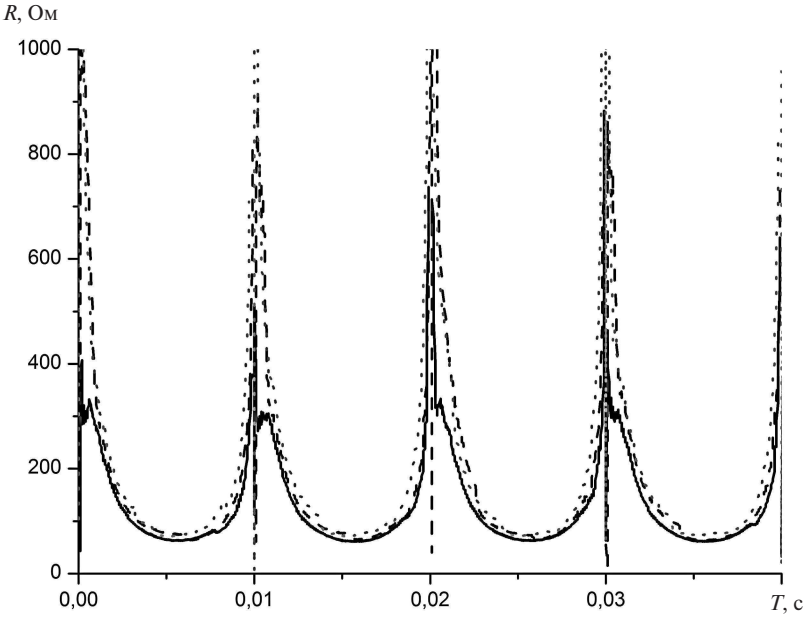


Рис. 3. Графики зависимости динамического изменения сопротивления от времени при расходе воздуха 1, 26 (——), 2, 52 (– – -) и 3,78 (- - - -) г/с

ется в момент протекания максимального тока. Ранее сделанные выводы о том, что падение напряжения на дуге увеличивается с ростом расхода плазмообразующего газа, подтверждаются и зависимостью рис. 3, так как сопротивление дугового столба возрастает в случае большего расхода газа.

В таблице представлены данные серии экспериментов по измерению падения напряжения на дуге плазмотрона при различных расходах плазмообразующей среды.

Для воздуха и углекислого газа зависимости носят сходный характер, а именно растут с увеличением расхода газа. Данное обстоятельство в первую очередь объясняется увеличением удельного сопротивления дугового канала. Было подсчитано, что при одинаковых прочих условиях эксперимента падение напряжения на дуге при использовании углекислого газа на четверть больше аналогичной величины для воздуха. Однако углекислый газ не нашел широкого применения в практике создания учеными ИЭЭ РАН мощных плазмотронов. Решающий фактор при выборе плазмообразующей среды — экономический. Вопрос особо актуален ввиду большого расхода газа. С этой точки зрения углекислый газ дает недостаточный для широкого применения прирост падения напряжения на нагрузке.

Полученные в результате экспериментов осциллограммы позволяют однозначно определять в каждом конкретном случае минимальное сопротивление дугового канала, соответствующее по времени максимуму протекающего тока. Данное высказывание неправомерно лишь для моментов перехода тока дуги через нулевое значение. Этот момент наименее изучен в ходе исследований. Полученные графики показывают: в этот момент сопротивление дуги стремится к бесконечности, что неверно. Современная теория электрической дуги утверждает, что в момент перехода тока через ноль электрические процессы в рабочей камере зависят от предшествующих процессов в ней. В частности, плазмообразующая среда сохраняет остаточное сопротивление, которое в свою очередь определяется совокупностью различных факторов. Классический электроэнергетический подход, описанный в [1], ставит сопротивление дуги в однозначную зависимость от теплосодержания в канале. Данный труд также рассматривает удобные для диагностики модели дуг переменного тока, основанные, в частности, на работах О. Майра.

Таблица 1

Влияние расхода плазмообразующего газа на падение напряжения на дуге плазматрона

Расход газа, г/с	Падение напряжения, В, на дуге в зависимости от вида газа	
	Воздух	Углекислый газ
1,2	870	1070
1,5	930	1130
1,7	950	1180
2	970	1230

В заключение выделим важнейшие аспекты проведенных исследований. В ходе экспериментов было установлено: в случае использования в качестве плазмообразующих сред воздуха и углекислого газа падение напряжения растет с увеличением расхода газа.

Напряженность электрического поля зависит от плазмообразующего газа. Полученные в ИЭЭ РАН экспериментальные данные показывают значения 10–15 В/см для воздуха и 15–20 В/см для углекислого газа.

С помощью анализа семейства динамических вольтамперных характеристик системы «источник питания — электрическая дуга» можно оценить совокупность значений установившейся вольтамперной характеристики, которая показывает, на какую нагрузку работает система питания.

Минимальное значение сопротивления дугового канала может быть определено из полученных временных зависимостей. Однако этих зависимостей недостаточно для определения сопротивления дуги в момент перехода тока системы питания через ноль. Нахождение сопротивления канала дуги в момент перехода тока через ноль требует применения методов математического моделирования и знания постоянной времени исследуемой дуги.

Использование в качестве плазмообразующей среды смеси воздуха и водяного пара имеет перспективы. Данная мера позволила бы значительно увеличить теплообмен между дугой и окружающей ее средой, а так же добиться боль-

шего значения напряженности электрического поля в дуговом канале.

Перспективно использование импульсных источников питания для работы с плазмотронами малой и средней мощности. Повышение частоты преобразования энергии и введение обратной связи по току позволит уменьшить величину индуктивности токоограничивающего реактора. Кроме того, существенно уменьшаются габаритные размеры сердечника реактора и трансформатора при переходе к полупроводниковому источнику питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рюденберг, Р.** Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок [Текст] / Р. Рюденберг / Пер. с нем.— Л. : Энергия, 1980 . — 578 с.

2. **Глебов, И.А.** Мощные генераторы плазмы [Текст] / И.А. Глебов, Ф.Г. Рутберг.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 152 с.

3. **Жуков, М.Ф.** Плазмотроны. Исследования. Проблемы [Текст] / М.Ф. Жуков [и др.].— Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995.— 203 с.

УДК 621.1.013

В.А. Барилович

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

К фундаментальным исследованиям в области расчета тепловых насосов можно отнести монографии [1–4], в которых рассматриваются возможные термодинамические циклы, рациональность использования различных рабочих тел в заданном интервале температур, эффективность, надежность установок и конструктивные решения. Однако процессы, происходящие в испарителях и конденсаторах, с позиций гидрогазодинамики и тепло- и массообмена не рассматриваются, так как в основе всех исследований в [1–4] лежит термодинамический метод.

В предлагаемой статье делается попытка исправить это положение.

Составлена система обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющая выполнить расчет испарителя и конденсатора теплового насоса в одномерной постановке на основе предложенной автором модели расслоенного (двухфазного) течения, которая позволяет использовать классические критериальные уравнения по теплоотдаче и трению для однофазных сред на участках испарения и конденсации пара, имеющих различные коэффициенты теплоотдачи для жидкой и паровой фаз, и модели, когда поток имеет паро-капельную структуру.

Для устранения гидродинамической неустойчивости в двухслойной модели предусматривается горизонтальное расположение трубок конденсатора и испарителя. Предполагается, что движущиеся жидкость и пар находятся в термодинамическом равновесии, а например, подведенная теплота идет на испарение жидкости или капель, при этом скорости движения фаз различны. Трубки конденсатора и переохладителя, имеющие с наружной стороны круглые ребра постоянной толщины, обдуваются потоком воздуха от вентилятора.

В качестве примера рассматривается расчет теплового насоса мощностью 15 кВт, работающего на изобутане в интервале давлений 0,13–0,7 МПа. Внутренний относительный КПД компрессора принят равным 0,75. Перепад температуры при переохлаждении изобутана — 8 градусов.

Расчет испарителя

После дросселя двухфазный поток поступает в испаритель (рис. 1), где изобутан получает теплоту от 20 %-го водного раствора этиленгликоля, получившего теплоту от грунтового теплообменника. Испаритель выполнен из пучков горизонтальных трубочек. Каждый пучок со-

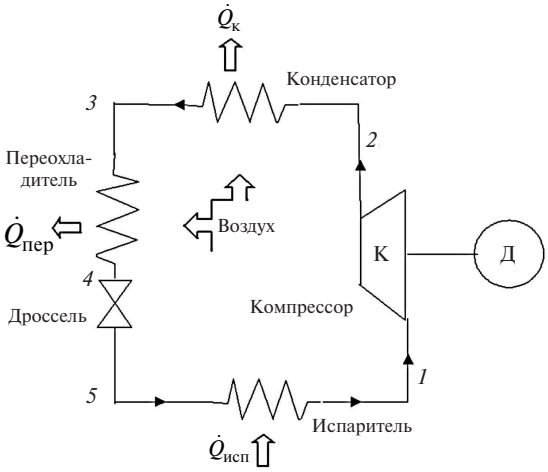


Рис. 1. Принципиальная схема теплового насоса

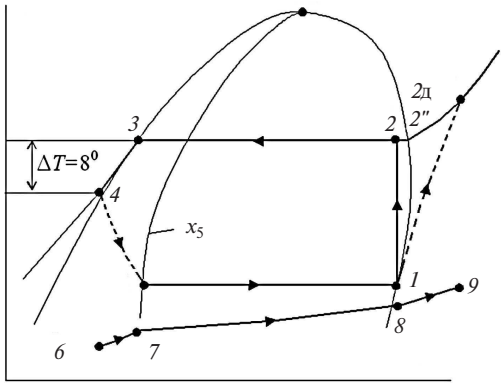


Рис. 2 . Процессы в тепловом насосе

стоит из двух рядов. В каждом ряду 63 трубки длиной 0,6 метра. Испаряющийся изобутан движется внутри трубок с диаметрами 5×6 мм, а этиленглюколь течет в межтрубном пространстве. Шаги между трубками по горизонтали s_1 и вертикали s_2 одинаковы и равны 8 мм.

Тепловой и гидравлический расчеты выполняются для одной трубки.

Для нашего случая после дросселирования степень сухости пара на входе в испаритель (точка *5* на рис. 2) составляет 0,324.

Этой степени сухости соответствует объемное паросодержание

$$\beta = \frac{\dot{V}''}{\dot{V}' + \dot{V}''} = \frac{\rho' x_5}{\rho'' + x_5(\rho' - \rho'')} = 0{,}987 .$$

В случае, когда $\rho' >> \rho''$, поток с пузырьковой структурой при $\beta \approx 0{,}5$ переходит в капельно-паровой. Поэтому можно предположить, что после дросселя поток имеет мелкодисперсную гомогенную структуру.

Считается, что после дросселирования скорости жидкой и паровой фаз одинаковы и равны $w_{см} = \dot{G}/(\rho_{см} F_1)$, где $\rho_{см} = \dfrac{\rho'\rho''}{x\rho' + (1-x)\rho''}$, но затем поток под действием сил гравитации расслаивается и площадь поперечного сечения, занятая жидкостью, составляет $f_{ж5} = \dfrac{\dot{G}(1-x_5)}{\rho' w_{см}}$.

Начальная высота уровня жидкости в трубке (рис.3) находится из решения уравнения $\dfrac{9}{16} f^2{}_{ж5} - h_ж^3 (D_1 - h_ж) = 0$. Если $h_ж < D_1/2$, что соответствует величине $x_5 = 0{,}324$, то из геометрических соображений

$$b = 2\left(D_1 h_ж - h_ж^2\right)^{0,5} = D_1 \sin(\beta/2);$$

$$l_ж = \pi D_1 \beta / 360 ;$$

$$h_ж = \frac{D_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} ; \quad f_п = \frac{\pi D_1^2}{4} - f_ж ;$$

$$l_п = \pi D_1 - l_ж .$$

Эквивалентный диаметр для потока этиленглюколя равен

$$D_e = \frac{4(s_1 \cdot s_2 - \pi D_2^2 / 4)}{\pi D_2} .$$

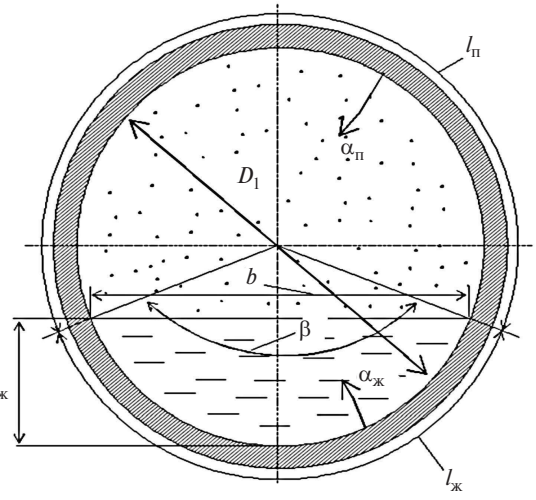


Рис. 3. Геометрические размеры двухслойного потока в трубке теплообменника

Коэффициент теплоотдачи определим по формулам

$$\alpha_e = \left(0{,}023\,\mathrm{Re}_e^{\,0{,}8}\,\mathrm{Pr}_e^{\,0{,}43}\right)\frac{\lambda_e}{D_e}$$

$$\text{при } \mathrm{Re}_e = \left(\frac{wD\rho}{\mu}\right)_e > 4\times10^3,$$

$$\alpha_e = \left(0{,}15\,\mathrm{Re}_e^{\,0{,}32}\,\mathrm{Pr}_e^{\,0{,}33}\right)\frac{\lambda_e}{d_e} \text{ при } \mathrm{Re}_e \le 2300.$$

Далее находим линейное термическое сопротивление

$$R_{tl} = \frac{1}{\alpha_e D_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_м}\ln\frac{D_2}{D_1} + \frac{\pi}{\alpha_п l_п + \alpha_ж l_ж},$$

$$k_l = 1/R_{tl},$$

где, например, для паровой фазы эквивалентный диаметр равен

$$D_{эк\,п} = \frac{4(\pi D_1^2/4 - f_ж)}{(\pi D_1 - l_ж)}; \qquad \mathrm{Re}_п = \frac{w_п D_{экп}\rho_п}{\mu_п};$$

$$\alpha_п = \left(0{,}023\,\mathrm{Re}_п^{\,0{,}8}\,\mathrm{Pr}_п^{\,0{,}43}\right)\frac{\lambda_п}{D_1}$$

$$\text{или} \quad \alpha_п = \left(0{,}15\,\mathrm{Re}_п^{\,0{,}32}\,\mathrm{Pr}_п^{\,0{,}33}\right)\frac{\lambda_п}{D_1},$$

элементарный поток теплоты $d\dot{Q} = k_l(T_e - T_s)\pi dz$.

Из уравнения движения испаряющегося жидкостного потока (в этом случае сила Мещерского отсутствует)

$$\frac{dw_ж}{dz} = \frac{1}{\dot{G}_ж}\left[-f_ж\frac{dp}{dx} - \tau_{ст\text{-}ж}l_ж + \tau_{п\text{-}ж}b\right] \qquad (1)$$

и уравнения сплошности с учетом переменной массы

$$\frac{d(w_ж f_ж)}{dz} =$$

$$= -\frac{1}{r\rho_ж}\frac{d\dot{Q}}{dz} - \frac{k_l(T_e - T_s)\pi}{r\rho_ж} = -\frac{q_w\pi D_1}{r\rho_ж} \qquad (2)$$

(где $\tau_{п\text{-}ж} = c_{f\,п\text{-}ж}\rho''\frac{(w_п - aw_ж)^2}{8}$;

$\tau_{ст\text{-}ж} = c_{f\,ст\text{-}ж}\rho'\frac{w_ж^2}{8}$; $c_f = f(\mathrm{Re})$; $a = 1{,}5\text{–}2{,}5$ — коэффициент, учитывающий скорость жидкости на разделе фаз [9]; $\mathrm{Re}_ж = \frac{w_ж\rho' l_ж}{\mu_ж}$; $l_ж$ — смоченный жидкостью периметр) определим производную

$$\frac{df_ж}{dz} = -\frac{1}{w_ж^2\rho_ж}\left(-f_ж\frac{dp}{dz} - \tau_{ст\text{-}ж}l_ж + \tau_{п\text{-}ж}b\right) -$$

$$-\frac{q_w\pi D_1}{r\rho_ж w_ж}.$$

Дифференцируя уравнение

$$\frac{9}{16}f^2{}_ж - h_ж^3(D_1 - h_ж) = 0,$$

найдем связь между $\frac{dh_ж}{dz}$ и $\frac{df_ж}{dz}$:

$$\frac{dh_ж}{dz} = \frac{3}{8}\frac{f_ж}{h_ж^2(D_1 - \frac{4}{3}h_ж)}\frac{df_ж}{dz}.$$

Уравнение движения для парового потока и уравнение сплошности для всего потока запишем в виде

$$\frac{dw_п}{dz} =$$

$$= \frac{1}{\dot{G}_п}\left[-f_п\frac{dp}{dz} - \tau_{ст\text{-}ж}l_ж - \tau_{п\text{-}ж}b - \right.$$

$$\left. -(w_п - w_ж)\frac{d\dot{G}_{ж\text{-}п}}{dz}\right]; \qquad (3)$$

$$f_ж\rho_ж\frac{dw_ж}{dz} + \rho_ж w_ж\frac{df_ж}{dz} + f_п\rho_п\frac{dw_п}{dz} +$$

$$+ f_п w_п\frac{d\rho_п}{dp}\frac{dp}{dz} + \rho_п w_п\frac{df_п}{dz} = 0, \qquad (4)$$

где $\frac{d\dot{G}_{ж\text{-}п}}{dz} = \frac{d\dot{Q}}{rdz}$.

Разрешая систему дифференциальных уравнений (1)–(4) относительно $\frac{dp}{dz}$, получим

$$\frac{dp}{dz} = \frac{w_n}{\left[\frac{w_п^2}{dp/d\rho_п} - \frac{\dot{G}_ж}{\dot{G}_п}\left(\frac{w_п}{w_ж}\right)^3\left(\frac{\rho_п}{\rho_ж}\right)^2 - 1\right]f_п}\times$$

$$\times\left[\frac{\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж^2}\tau_{ст\text{-}ж}l_ж + \frac{\tau_{ст\text{-}п}l_п}{w_п} - \left(\frac{\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж^2} - \frac{1}{w_п}\right)\tau_{п\text{-}ж}b - \right.$$

$$\left. -\left(\frac{\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж} - \frac{w_ж}{w_п}\right)\frac{d\dot{G}_{ж-п}}{dz}\right].$$

Степень сухости пара определим из уравнения $\frac{dx}{dz}=\frac{1}{r\dot{G}}\frac{d\dot{Q}}{dz}$.

Зная текущие значения $h_ж$ и x, можно найти $b, l_ж, l_п, f_ж, f_п$, а также

$$w_п=\frac{\dot{G}x}{\rho'' f_п} \text{ и } w_ж=\frac{\dot{G}(1-x)}{\rho' f_ж}. \qquad (5)$$

Непосредственное использование дифференциальных уравнений (1) и (3) для нахождения скоростей пара и жидкости может приводить к трудностям вычислительного характера, поэтому, например, в процессе испарения, когда $\dot{G}_ж \to 0$, не следует использовать уравнение (1) (так как в этом случае $dw_ж/dz \to \infty$), а находить скорость жидкости из формулы (5).

Если считать, что за дросселем поток имеет капельно-паровую структуру, то в этом случае можно написать следующие уравнения:

$$\frac{d(w_ж f_ж)}{dz}=-\frac{\pi D_к^2 n_v j_{к\text{-}п} F_1}{\rho_ж};\ \dot{n}=\frac{6\dot{G}_к}{\rho'\pi D_к^3}=\frac{6\dot{G}(1-x)}{\rho'\pi D_к^3};$$

$$F_1=\frac{\pi D_1^2}{4};\quad n_v=\frac{\dot{n}}{w_к F_1};\quad j_{к\text{-}п}=\frac{1}{\pi D_к^2 n_v F_1 r}\frac{d\dot{Q}}{dz};$$

$$\frac{dD_к}{dz}=-\frac{2}{\pi D_к^2 \dot{n}\rho'}\frac{d\dot{Q}}{rdz};$$

$$\frac{dw_к}{dz}=\frac{1}{\dot{G}_ж}\left[-f_ж\frac{dp}{dx}+D^* n_v F_1\right];$$

$$\frac{dw_п}{dz}=\frac{1}{\dot{G}_п}\times$$

$$\times\left[-f_п\frac{dp}{dx}-D^* n_v F_1-(w_п-w_к)\frac{d\dot{Q}}{rdz}-\frac{c_f\rho'' w_п^2\pi D_1}{2}\right];$$

$$\frac{dp}{dz}=$$

$$=\left\{\frac{3}{4}c_x\rho'' w_п\frac{f_ж}{D_к}\left(\frac{w_п}{w_к}-1\right)\left|\frac{w_п}{w_к}-1\right|\left(\left(\frac{w_к}{w_п}\right)^2-\frac{\rho''}{\rho'}\right)+\right.$$

$$\left.+c_f\frac{w_п\rho''}{2}\pi D_1+\left(2-\frac{w_к}{w_n}-\frac{w_n}{w_к}\frac{\rho''}{\rho'}\right)\frac{1}{r}\frac{d\dot{Q}}{dz}\right\}\times$$

$$\times\frac{w_n}{\left[\frac{w_п^2}{dp/d\rho''}-\frac{\dot{G}_к}{\dot{G}_п}\left(\frac{w_п}{w_к}\right)^3\left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^2-1\right]f_п},$$

где $\dot{n}$ — поток капель; $D_к$ — диаметр капли; $f_ж=\frac{\dot{G}_к}{w_к\rho'}$; n_v — объемная концентрация капель; $j_{к\text{-}п}$ — плотность потока массы пара от испаряющейся капли; $D^*=c_x\pi D_к^2\rho(w_п-w_к)|w_п-w_к|/8$ — сила сопротивления одной капли; $c_f=f(\mathrm{Re})$ — коэффициент трения; $c_x=f(\mathrm{Re}_к)$ — коэффициент сопротивления капли.

Расчет конденсатора

После компрессора хладагент поступает в семнадцать горизонтальнх трубок первого ряда конденсатора, а затем в трубки переохладителя, расположенные ниже, двигаясь сверху вниз. Воздух из помещения в первую очередь омывает горизонтальные трубки нижнего ряда переохладителя, а затем, двигаясь снизу вверх, — трубки конденсатора

Так как конденсатор и переохладитель состоят из горизонтальных оребренных трубок, обдуваемых воздушным потоком, то вначале, следуя [7], запишем уравнения для определения приведенного коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха для шахматного расположения труб: $\mathrm{Nu}=0,36\,\mathrm{Re}^n\,\mathrm{Pr}^{0,33}C_z C_s\varphi^{0,5}$, где $\mathrm{Nu}=\frac{\alpha l_0}{\lambda_в}$; $\mathrm{Re}=\frac{\rho w_в l_0}{\mu_в}$; $\mathrm{Pr}=\frac{\mu_в c_{pв}}{\lambda_в}$; $w_в$ — скорость воздуха в наиболее сжатом сечении;

$l_0=\frac{d_4 F_c}{F_{рс}}+\sqrt{\frac{\pi}{4}(D_R-d_4)}\frac{F_р}{F_{рс}}$ — характерный размер;

$$n=0,6\varphi^{0,07};$$

$$\varphi=\frac{F_{рс}}{F}=\frac{\left[\left(D_R^2-d_4^2\right)/2+D_R\delta+d_4\left(S_p-\delta\right)\right]\pi}{d_4 S_p\pi}$$

— коэффициент оребрения; d_4 — наружный диаметр трубки конденсатора и испарителя; D_R — диаметр ребра; δ — толщина ребра; $S_р$ — шаг между ребрами; F — площадь наружной поверхности неоребренной трубки на шаге ребра; $F_{рс}$ — площадь оребренной поверхности на шаге;

$F_р$ — площадь поверхности одного ребра; $F_с$ — наружная поверхность трубки между ребрами; $C_S = \left(\frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1}\right)^{0,1}$; $\sigma_1 = \frac{S_1}{d_4}$, $\sigma_2' = \frac{\sqrt{S_1^2/4 + S_2^2}}{d_4}$ — относительные поперечный и диагональный шаги между трубками; S_1 и S_2 — поперечный и продольный шаги. Если число рядов трубок, обдуваемых поперечным потоком воздуха, больше пяти, то $C_Z = 1$; при трех рядах — $C_Z = 0{,}96$, при двух — $C_Z = 0{,}9$.

Приведенный коэффициент теплоотдачи на шаге $S_р$:

$$\alpha_{пр} = \alpha_р E \frac{F_р}{F_{рс}} + \alpha \frac{F_с}{F_{рс}},$$

где $E = \frac{\psi}{\frac{d_4}{4\delta}\left[\left(\frac{D_R}{d_4}\right)^2 - 1\right]\sqrt{2\mathrm{Bi}}}$ — коэффициент эффективности ребра; $\mathrm{Bi} = \frac{\alpha_р \delta}{\lambda}$ — число Био;

$$\psi = \frac{K_1(m D_R/2) I_1(m d_4/2) - K_1(m d_4/2) I_1(m D_R/2)}{K_1(m D_R/2) I_0(m d_4/2) + K_0(m d_4/2) I_1(m D_R/2)};$$

I_0, K_0, I_1, K_1 — модифицированые функции Бесселя; $m = \frac{1}{\delta}\sqrt{2\mathrm{Bi}}$.

В первом приближении считают, что коэффициент теплоотдачи α от наружной стенки трубки равен коэффициенту теплоотдачи от ребра $\alpha_р$; детальное изучение этого вопроса изложено в [8].

Интегральный подход

Длину трубок на участках однофазного потока (процессы 2д–2″ и 3–4 на рис. 2) определим по формулам

$$l_{2д\text{-}2''} = \frac{\dot{G}\left(i_{2д} - i_2''\right)}{k\left(\overline{t}_{2д\text{-}2''} - \overline{t}_{8\text{-}9}\right)\pi d_4};$$

$$l_{3\text{–}4} = \frac{\dot{G}\left(i_3' - i_4\right)}{k\left(\overline{t}_{3\text{–}4} - \overline{t}_{6\text{-}7}\right)\pi d_4},$$

где $k = \left(\frac{1}{\alpha_3}\frac{d_4}{d_3} + \frac{d_4}{2\lambda_м}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{пр}\varphi}\right)^{-1}$;

$$\alpha_3 = \left(0{,}023\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{0,43}\right)\frac{\lambda}{d_3}$$

при $\mathrm{Re} = \frac{w d_3 \rho}{\mu} > 4\times10^3$,

$$\alpha_3 = \left(0{,}15\,\mathrm{Re}^{0,32}\,\mathrm{Pr}^{0,33}\right)\frac{\lambda}{d_3}$$ при $\mathrm{Re} \le 2300$.

Тепловой поток от конденсатора к окружающей среде на участке двухфазного течения *2″–3′*, длину трубки и расход воздуха через вентилятор найдем из уравнений

$$\dot{Q}_{2''\text{–}3'} = \dot{G}\left(i_2'' - i_3'\right);$$

$$l_{2''\text{–}3'} = \frac{\dot{Q}_{2''\text{–}3'}}{k_{2''\text{–}3'}\left(t_S - \overline{t}_{7\text{–}8}\right)\pi d_4},$$

где $k_{2''\text{–}3'} = \left(\frac{1}{\alpha_{3(2''\text{–}3')}}\frac{d_4}{d_3} + \frac{d_4}{2\lambda_м}\ln\frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{пр}\varphi}\right)^{-1}$;

$$\alpha_{3(2''\text{–}3')} =$$

$$= \left\{0{,}5\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}_ж^{0,43}\left[\sqrt{1 + x_1\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)} + \sqrt{1 + x_2\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)}\right]\right\}\frac{\lambda_ж}{d_3}$$ [5];

$$x_1 = 1,\ x_2 = 0;$$

$$\mathrm{Re} = \frac{4\dot{G}}{\pi d_3 \mu_ж};\qquad \dot{G}_в = \frac{\dot{G}\left(i_{2д} - i_4\right)}{\overline{c}_{pв}\left(t_{вых} - t_{вх}\right)},$$

где $t_{вх}$ — температура воздуха на входе в переохладитель, $t_{вых}$ — температура воздуха на выходе из конденсатора.

Нагрев воздуха определяется из уравнений теплового баланса, например $\dot{G}_в \overline{c}_{pв}\left(t_7 - t_6\right) = \dot{G}\left(i_3' - i_4\right)$.

Дифференциальный подход

Текущие значения давления, температуры, плотности хладагента и тепловой поток, отдаваемый окружающей среде на участке 2д–2″, определяются путем интегрирования системы уравнений

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\tilde{k} M^2 \pi d_3}{\left(\tilde{k} M^2 - 1\right)\dot{G}}\left[\frac{\tilde{k} - 1}{\tilde{k}} q_w \rho + \frac{p \tau_w}{w}\right];$$

$$\frac{dw}{dz} = -\frac{1}{\dot{G}}\left(F\frac{dp}{dz} + \tau_w \pi d_3\right);$$

$$\frac{dT}{dz}=\left(\frac{q_w\pi d_4}{\dot G}-w\frac{dw}{dz}\right)\frac{1}{c_p};$$

$$\frac{d\rho}{dz}=\frac{\rho}{p}\frac{dp}{dz}-\frac{\rho}{T}\frac{dT}{dz};$$

$$\frac{d\dot Q_2}{dz}=q_w\pi d_4,$$

где $q_w=-k\left(\overline{t}_{2д\text{-}2''}-\overline{t}_{8-9}\right)$; $\tilde k=c_p/c_v$; $\tau_w=c_f\,\rho w^2/2$.

Поскольку процесс 2д–2″ происходит вблизи правой пограничной кривой, уравнение состояния следует записывать с учетом коэффициента сжимаемости: $pv=\gamma RT$. Кроме того, если в уравнении $\dot G di^*=q_w\pi d_4 dz$ учитывать слагаемое *wdw*, то выражения для *dp/dz* и *dρ/dz* примут вид

$$\frac{dp}{dz}=\frac{4\left[q_w+\left(\dfrac{\tilde k pv}{\left(\tilde k-1\right)\gamma w}+w\right)\tau_w\right]}{\left[\dfrac{1}{\left(\tilde k-1\right)\gamma}\left(\dfrac{\tilde kM^2-1}{M^2}\right)-1\right]d_3w};$$

$$\frac{d\rho}{dz}=\frac{\rho}{\gamma}\left(\frac{1}{p}\frac{dp}{dz}-\frac{1}{T}\frac{dT}{dz}\right).$$

Аналогичные уравнения можно написать для переохладителя (участка *3–4*):

$$\frac{dp}{dz}=-\frac{2c_f\overline{\rho}w^2}{d_3};$$

$$\frac{dT}{dz}=\frac{q_w\pi d_4}{\dot G\overline{c}_p};$$

$$\frac{d\dot Q_3}{dz}=q_w\pi d_4,$$

где $q_w=\dfrac{\overline{t}_{3-4}-\overline{t}_{6-7}}{\dfrac{d_4}{\alpha_ж d_3}+\dfrac{d_4}{2\lambda}\ln\left(\dfrac{d_4}{d_3}\right)+\dfrac{1}{\alpha_{пр}\varphi}}$; $\overline{\rho},\overline{c}_p$ — средние значения плотности и удельной изобарной теплоемкости хладагента в процессе *3–4*.

В двухфазной области уравнение сплошности для конденсирующегося парового потока с учетом переменной массы для двухслойной модели имеет вид $d(\rho wf)_п=-\dfrac{q_w\pi d_4}{r}dz$, где

$$q_w=\frac{t_s(p_2)-\overline{t}_{воз}}{\dfrac{\pi d_4}{\alpha_ж l_ж+\alpha_п l_п}+\dfrac{d_4}{2\lambda}\ln\left(\dfrac{d_4}{d_3}\right)+\dfrac{1}{\alpha_{пр}\varphi}}.$$

Интегрирование уравнения $\dfrac{d\dot Q_2}{dz}=q_w\pi d_4$ позволяет определить тепловой поток, отдаваемый окружающей среде двухфазным потоком.

$$\frac{dw_ж}{dz}=$$

$$=\frac{1}{\dot G_ж}\left[-f_ж\frac{dp}{dx}-\tau_{ст\text{-}ж}l_ж+\tau_{п\text{-}ж}b+\left(w_п-w_ж\right)\frac{d\dot Q_2}{rdz}\right].$$

Из уравнения сплошности и движения для парового потока

$$\frac{dw_п}{dz}=\frac{1}{\dot G_п}\left[-f_п\frac{dp}{dz}-\tau_{ст\text{-}ж}l_ж-\tau_{п\text{-}ж}b\right]$$

с учетом того, что для цилиндрического канала $df_п=-df_ж$, определим $df_ж/dz$ и $dh_ж/dz$:

$$\frac{df_ж}{dz}=\frac{1}{(\rho w^2)_п}\times$$

$$\times\left[f_п(M^2-1)\frac{dp}{dz}-\tau_{ст\text{-}ж}l_ж-\tau_{п\text{-}ж}b+\frac{q_w\pi d_4w_п}{r}\right],$$

где $M^2=dp/d\rho_п$.

$$\frac{dh_ж}{dz}=\frac{3}{8}\frac{f_ж}{h_ж^2(D_3-\dfrac{4}{3}h_ж)}\frac{df_ж}{dz}.$$

Здесь следует отметить, что если $h_ж$ меньше $D_3/2$, то $h=h_ж$; при $h_ж$ больше $D_3/2$ $h=D_3-h_ж$, $b=2\left(D_3h-h^2\right)^{0,5}$, $l_ж=2\left(2f_ж+b(D_3/2-h)\right)/D_3$, $l_п=\pi D_3-l_ж$.

Разрешая уравнения сохранения относительно градиента давления, получим

$$\frac{dp}{dz}=\frac{w_п}{\left[M^2-\dfrac{\dot G_ж}{\dot G_п}\left(\dfrac{w_п}{w_ж}\right)^3\left(\dfrac{\rho_п}{\rho_ж}\right)^2-1\right]f_п}\times$$

$$\times\left(\frac{\tau_{ст\text{-}п}l_п}{w_п}+\frac{\tau_{ст\text{-}ж}l_ж\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж^2}-\left(\frac{\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж^2}-\frac{1}{w_п}\right)\tau_{п\text{-}ж}b+\right.$$

$$\left.+\left[\frac{\rho_п w_п}{\rho_ж w_ж}\left(\frac{w_п-w_ж}{w_ж}-1\right)+1\right]\frac{d\dot Q_2}{rdz}\right).$$

Значение температуры потока по длине канала определим интегрируя уравнение

$$\frac{dT}{dz}=\frac{T}{r}\frac{(\rho_ж-\rho_п)}{\rho_ж^2}\frac{dp}{dz}.$$

Текущая степень сухости пара находится из уравнения $\frac{dx}{dz}=\frac{1}{r\dot{G}}\frac{d\dot{Q}_2}{dz}$. Длина трубки конденсатора на участке двухфазного потока определяется условием $x=0$.

Для конденсирующегося паро-капельного потока можно написать:

$$\frac{d(w_{ж}f_{ж})}{dz}=\frac{\pi D_{к}^2 n_v j_{п\text{-}к} F_3}{\rho_{ж}};\ \dot{n}=\frac{6\dot{G}_{к}}{\rho'\pi D_{к}^3}=\frac{6\dot{G}(1-x)}{\rho'\pi D_{к}^3};$$

$$F_3=\frac{\pi D_3^2}{4};\ n_v=\frac{\dot{n}}{w_{к}F_3};\ j_{п\text{-}к}=\frac{1}{\pi D_{к}^2\ n_v F_3 r}\frac{d\dot{Q}_2}{dz};$$

$$\frac{dD_{к}}{dz}=\frac{2}{\pi D_{к}^2\dot{n}\rho'}\frac{d\dot{Q}_2}{rdz};$$

$$\frac{dw_{к}}{dz}=\frac{1}{\dot{G}_{ж}}\left[-f_{ж}\frac{dp}{dx}+D^* n_v F_3+(w_{п}-w_{к})\frac{d\dot{Q}_2}{rdz}\right];$$

$$\frac{dw_{п}}{dz}=\frac{1}{\dot{G}_{п}}\left[-f_{п}\frac{dp}{dx}-D^* n_v F_3-\frac{c_f\rho'' w_{п}^2\pi D_3}{2}\right];$$

$$\frac{dp}{dz}=\left\{c_f\frac{w_{п}\rho''}{2}\pi D_3-\left(\frac{\rho_{п}w_{п}}{\rho_{к}w_{к}^2}-\frac{1}{w_{п}}\right)D^* n_v F_3-\right.$$

$$\left.-\left(1+\frac{\rho_{п}w_{п}(w_{п}-2w_{к})}{\rho_{к}w_{к}^2}\right)\frac{1}{r}\frac{d\dot{Q}_2}{dz}\right\}\times$$

$$\times\frac{w_{п}}{\left[\frac{w_{п}^2}{dp/d\rho''}-\frac{\dot{G}_{к}}{\dot{G}_{п}}\left(\frac{w_{п}}{w_{к}}\right)^3\left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^2-1\right]f_{п}}.$$

Отопительный коэффициент, определяющий эффективность теплового насоса, находился так: $K=\frac{\dot{G}(i_{2д}-i_4)}{N_k+N_{в}}=2{,}78.$

Система уравнений реализована на языке Visual Fortran и позволяет определить протяженность каналов теплообменников теплового насоса и текущие физические величины потока.

Длина одной трубки испарителя (D_2/D_1 = = 0,006/0,005) на основе двухслойной модели составила 3,42 м, а суммарная длина всех трубок (126 шт.) — 430,9 м. Модель капельно-парового потока дает 3,41 метра, при этом, например, капля с начальным диаметром $100\cdot10^{-6}$ м уменьшается в своих размерах до $7{,}6\cdot10^{-6}$ м, что отвечает степени сухости пара 0,9998, а потеря давления в этом случае составляет $\Delta p_{п}$ = 563 Па. Для конденсатора, в котором весь расход изобутана (44,86 г/с) проходит через 17 трубочек (D_4/D_3 = 0,008/0,006), при двухслойной модели длина всех трубок в двухфазной области равна 106,71 м, $\Delta p_{п}$ = 0,0372 МПа (при интегральном подходе имеем 99,52 м), при этом поток теплоты, отдаваемый окружающей среде составляет 13,39 кВт (в области перегретого пара он равняется 0,945 кВт, а в переохладителе — 0,653 кВт). В конденсаторе на участке паро-капельного потока суммарная длина трубок — 98,93 м ($\Delta p_{п}$ = = 1384,4 Па), в области перегретого пара — 16,6 м, в переохладителе — 6,13 м.

Экспериментальные исследования позволят определить, какая из моделей в большей мере отражает реальный процесс.

Выполненный расчет грунтового теплообменника, состоящего из вертикальных трубок, не приводим. Однако можно отметить, что поток теплоты от грунта в нашем случае составил 10,24 кВт, расход 20 %-го раствора этиленгликоля — 0,52 кг/с, длина трубки (27×29 мм) — 304,4 м при коэффициенте теплопроводности грунта $\lambda_{гр}$ = 2,08 Вт/(м·гр), потеря давления без учета поворотов составила 0,1041 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рей, Д.** Тепловые насосы [Текст] / Д. Рей, Д. Макмайкл.— М.: Энергоиздат, 1982.— 224 с.

2. **Мартыновский, В.С.** Циклы, схемы и характеристики термотрнсформаторов [Текст] / В.С. Мартыновский.— М.: Энергия, 1979.— 288 с.

3. **Янтовский, Е.И.** Парокомпрессионные теплонасосные установки [Текст] / Е.И. Янтовский, Ю.В. Пустовалов.— М.: Энергоиздат, 1982.— 285 с.

4. **Зысин, В.А.** Комбинированные парогазовые установки и циклы [Текст] / В.А. Зысин.— М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. 186 с.

5. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.— М., 1984.— 486 с.

6. **Крейт, Ф.** Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк.— М.: Мир, 1983.— 512 с.

7. **Юдин, В.Ф.** Конвективный теплообмен при поперечном обтекании пучков ребристых труб [Текст] / В.Ф. Юдин, Л.С. Тохтарова // Энергомашиностроение.— 1974. №1.

8. **Стасюлявичус, Ю.** Теплоотдача поперечно-обтекаемых пучков ребристых труб [Текст] / Ю. Стасюлявичус, А. Скринская.— Вильнюс: Минтис, 1974.

9. **Стырикович, М.А.** Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций [Текст] / М.А. Стырикович, В.С. Полонский, Г.В. Циклаури.— М.: Наука, 1982.— 368 с.

УДК 62–23

Д.Е. Бортяков, В.П. Соколов

УЧЕТ ТРЕНИЯ В ШАРНИРАХ МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Силовые расчеты многозвенных механизмов выполняются не первое столетие и основаны на использовании уравнений равновесия твердого тела [1–3]. Однако авторам не удалось найти публикации, в которых было бы указано, что при расчетах многозвенных механизмов следует учитывать моменты трения в шарнирах и трение в ползунах. Причем механизмы, в силовых расчетах которых трение не было учтено, могут оказаться совершенно недееспособными.

В качестве примера такого механизма рассмотрим подъемник ножничного типа (рис. 1), который состоит из двух идентичных механизмов, лежащих в параллельных плоскостях.

Распределенная нагрузка q на половину механизма приложена на грузовой площадке QB; рычаги AD и BE связаны между собой шарниром C.

Кроме того, рычаги AD и BE снабжены в точках A и E ползунами или роликами, перемещающимися по направляющим, которые прикреплены к грузовой площадке AB и к нижнему основанию ED. Механизм приводится в движение силовым звеном NM толкающего типа, обычно — силовым гидроцилиндром. Возможен вариант с установкой одного гидроцилиндра в промежутке между «ножницами».

Угол MND наклона гидроцилиндра в начальном нижнем положении зависит от высоты консоли FM над осью звена AD.

По условиям эксплуатации подъемника почти всегда желательно уменьшение начальной высоты грузовой площадки QB. Но это с неизбежностью влечет уменьшение высоты консоли FM и угла MND.

Очевидно, что при $FM = 0$ и расположении силового звена NM строго параллельно основанию ED механизм даже без учета трения будет не в состоянии выйти из нижней «мертвой точки». Усилие в силовом звене NM будет стремиться к бесконечности.

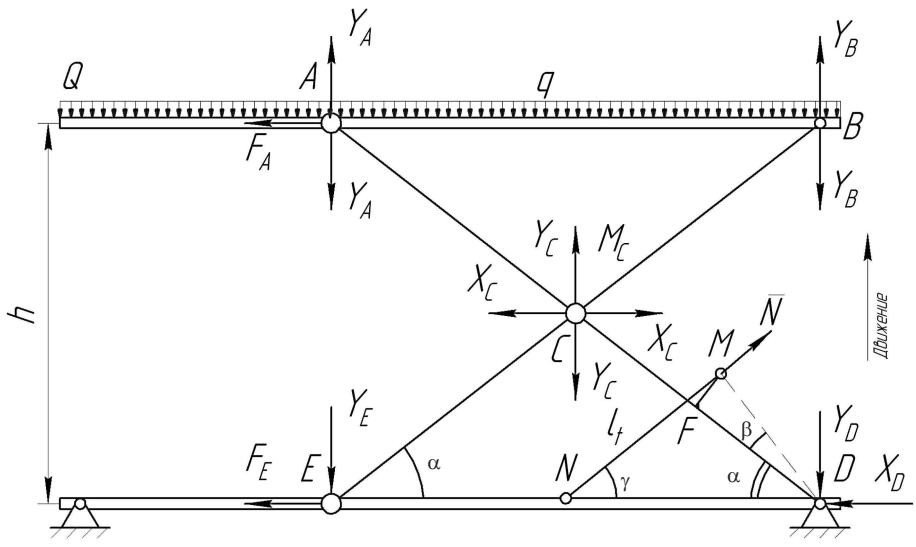


Рис. 1. Расчетная схема подъемника ножничного типа

Моменты трения в концевых шарнирах гидроцилиндров, шарнирах рычагов, роликах, трение в ползунах механизма приводят к тому, что усилие в силовом звене *NM* может оказаться чрезмерным и при существенно больше нуля начальном угле *MND* наклона гидроцилиндра.

Авторы статьи выполнили расчет усилий в описанном ножничном подъемнике с учетом трения в шарнирах и ползунах.

Основные параметры механизма следующие:

Распределенная нагрузка на половину механизма — q, тс 0,2355
Диаметр цапфы — d_c, м 0,08
Диаметр ролика — $d_р$, м 0,11
Коэффициент трения скольжения — f_c 0,2
Коэффициент трения качения — f 0,00015
Длины рычагов *AD* и *BE* — l_c, м 3,6
Длина планшета *QB* — $l_р$, м 4,245
Длина отрезка *ND* — l_n, м 1,874
Длина нижней части *EC* и *DC* рычагов *BE* и *AD* — l_x, м 1,8
Высота точки *M* над осью рычага *AD* — h_0, м 0,13
Длина до точки *M* вдоль оси рычага *AD* — l_0, м 1,0
Диаметры пальцев в шарнирах *N*, *M* — $d_{п\,м}$, м ... 0,05
Диаметры пальцев в шарнирах *D*, *C* — $d_{п\,с}$, м 0,05

Рассчитаем некоторые величины:

приведенный коэффициент трения в ролике (точки *A* и *E*) — $w_c = \dfrac{(f_c d_c + 2f)}{d_р} = 0{,}142$;

коэффициент трения в точках *A* и *E* принимаем $w_c = 0{,}2$;

длина отрезка *DM*, м, — $l_1 = \sqrt{h_0^2 + l_0^2} = 1{,}008$;

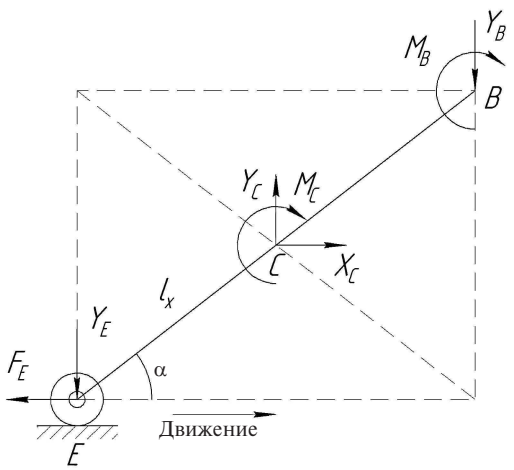


Рис. 2. Расчетная схема рычага *BE*

угол между отрезками *DM* и *DC*, рад, — $\beta = \arctan\left(\dfrac{h_0}{l_0}\right) = 0{,}129$;

начальный угол установки рычагов *AD* и *BE*, рад, — $\alpha_0 = \dfrac{\pi 2{,}85}{180} = 0{,}05$.

Механизм (рис. 1) представляет собой многозвенную систему, которая приводится в движение поступательно движущимся звеном толкающего типа *NM*; его длина имеет начальное значение в зависимости от величины отрезка *ND*, а также высоты шарнира *M* над осью звена *AD* и в процессе расчета будет вычисляться для нескольких положений.

Определение усилий Y_A и Y_B:

$$Y_A + Y_B = qQB = ql_p;$$

$$\sum M_B = 0 = \frac{ql_p^2}{2} - Y_A AB \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} Y_A = \dfrac{ql_p^2}{2AB}; \\ Y_B = ql_p - \dfrac{ql_p^2}{2AB} = ql_p\left(1 - \dfrac{l_p}{2AB}\right). \end{cases}$$

Определение усилий и моментов, действующих на рычаг *BE* (рис. 2):

$$M_B = Y_B \frac{d_c}{2} f_c;$$

$$M_C = (Y_C + X_C)\frac{d_c}{2} f_c;$$

$$F_E = Y_E w_c;$$

$$\begin{cases} \sum F_X = 0 = X_C - Y_E w_c; \\ \sum F_X = 0 = Y_B - Y_C + Y_E; \\ \sum M_B = 0 = Y_B \dfrac{d_c}{2} f + Y_B(l_c + l_x)\cos\alpha - \\ \qquad - Y_E l_x \cos(\alpha) + Y_E l_x w_c \sin\alpha + \\ \qquad + (Y_C + X_C)\dfrac{d_c}{2} f; \end{cases}$$

$$X_C = Y_E w_c;$$

$$Y_C = Y_B + Y_E;$$

$$Y_B \frac{d_c}{2} f_c + Y_B(l_c - l_x)\cos\alpha -$$

$$-Y_E\left(l_x\cos\alpha - w_c l_x\sin\alpha\right)+$$

$$+\left(Y_B+Y_E+Y_E w_c\right)\frac{d_c}{2}f_c+$$

$$+Y_B\frac{d_c}{2}f_c+Y_E(1+w_c)\frac{d_c}{2}f_c=0\Rightarrow$$

$$\Rightarrow Y_B\,d_c f_c+Y_B(l_c-l_x)\cos\alpha=$$

$$=Y_E\left[-(1+w_c)\frac{d_c}{2}f_c+l_x\cos\alpha-w_c l_x\sin\alpha\right];$$

$$Y_E=Y_B\frac{d_c f+(l_c-l_x)\cos\alpha}{-(1+w_c)\frac{d_c}{2}f_c+l_x\cos\alpha-w_c l_x\sin\alpha}.$$

Определение усилий и моментов, действующих на рычаг AD (см. рис. 3):

$$\alpha+\beta+\delta+\gamma=\pi/2;$$

$$r_n=MD\cos\delta=MD\sin(\alpha+\beta+\gamma);$$

$$F_A=Y_A w_c;$$

$$M_D=\left(X_D+Y_D\right)\frac{d_c}{2}f_c;$$

$$M_N=N\frac{d_c}{2}f_c;$$

$$\sum F_X=0=F_A+X_c-N\cos\gamma+X_D;$$

$$\sum F_Y=0=Y_A+Y_c-N\sin\gamma+Y_D;$$

$$\sum M_D=0=M_C+2M_N+M_D+F_A l_c\sin\alpha+$$

$$+X_C l_x\sin\alpha+Y_C l_x\cos\alpha+Y_A l_c\cos\alpha-$$

$$-Nl\sin(\alpha+\beta+\gamma);$$

$$X_D=N\cos\gamma-Y_A w_c-X_C;$$

$$Y_D=-Y_A-Y_C+N\sin\gamma;$$

$$M_D=\frac{d_c}{2}f_c\times$$

$$\times\left[N\left(\cos\gamma+\sin\gamma\right)-Y_A w_c-X_C-Y_A-Y_C\right];$$

$$M_C+2N\frac{d_c}{2}f_c+N\frac{d_c}{2}f_c\left(\cos\gamma+\sin\gamma\right)-$$

$$-\frac{d_c}{2}f_c\left(Y_A w_c-X_C-Y_A-Y_C\right)+Y_A l_c w_c\sin\alpha+$$

$$+X_C l_x\sin\alpha+Y_C l_x\cos\alpha+Y_A l_c\cos\alpha-$$

$$-Nl\sin(\alpha+\beta+\gamma)=0;$$

$$N=\frac{B}{l\sin(\alpha+\beta+\gamma)-\frac{d_c}{2}f_c\left(2+\cos\gamma+\sin\gamma\right)},$$

$$B=M_C-\frac{d_c}{2}f_c\left(Y_A w_c-X_C-Y_A-Y_C\right)+$$

$$+Y_A l_c w_c\sin\alpha+Y_A l_c\cos\alpha+l_x\left(X_C\sin\alpha+Y_C\cos\alpha\right).$$

Расчет действующих усилий и моментов

На основании приведенных выше зависимостей между геометрическими параметрами механизма и действующими на него нагрузками была составлена расчетная программа в среде MathCad для определения усилий, возникающих

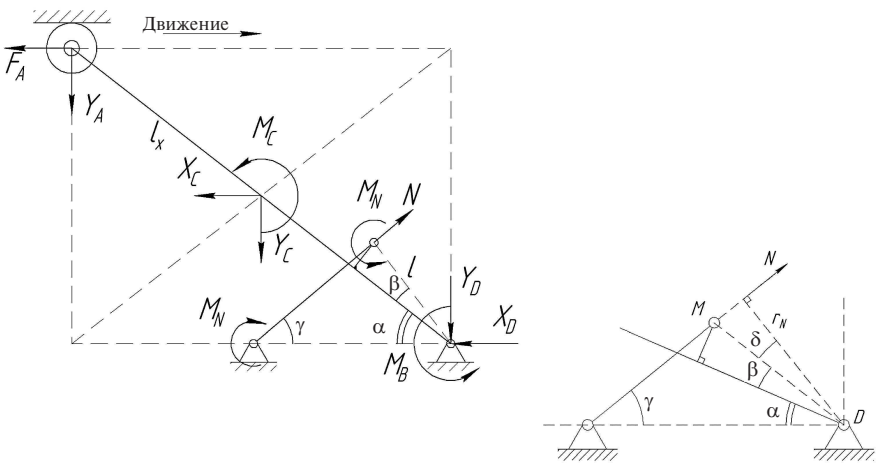


Рис. 3. Расчетная схема рычага AD

Результаты расчета усилий в зависимости от угла наклона звена *BE* к горизонтальной плоскости

Искомая величина, ед. измерения	Значения величины в зависимости от угла α, град									
	2,85	7,85	12,85	17,85	22,85	27,85	32,85	37,85	42,85	47,85
l_t, м	0,9	0,939	0,991	1,054	1,124	1,201	1,282	1,367	1,453	1,541
h, м	0,179	0,492	0,801	1,103	1,398	1,682	1,953	2,209	2,448	2,669
AB, м	3,596	3,566	3,51	3,427	3,317	3,183	3,024	2,843	2,639	2,416
γ, град	11,51	16,41	20,619	24,098	26,868	28,99	30,542	31,602	32,242	32,528
Y_A, т	0,59	0,595	0,605	0,619	0,64	0,667	0,702	0,746	0,804	0,878
Y_B, т	0,41	0,405	0,395	0,38	0,36	0,333	0,298	0,253	0,196	0,121
Y_C, т	0,829	0,827	0,815	0,793	0,76	0,712	0,647	0,559	0,441	0,281
X_C, т	0,084	0,084	0,084	0,083	0,08	0,076	0,07	0,061	0,049	0,032
Y_E, т	0,42	0,422	0,42	0,413	0,4	0,379	0,348	0,306	0,245	0,16
Y_D, т	0,677	0,652	0,638	0,624	0,604	0,58	0,552	0,522	0,495	0,478
X_D, т	10,092	3,839	5,265	4,346	3,747	3,326	3,01	2,76	2,549	2,36
N_t, т	10,505	7,342	5,845	4,987	4,433	4,041	3,739	3,488	3,262	3,045
M_C, тм$\cdot 10^{-3}$	7,305	7,291	7,195	7,008	6,717	6,301	5,73	4,961	3,922	2,503
M_B, тм$\cdot 10^{-3}$	3,277	3,238	3,161	3,044	2,881	2,665	2,385	2,026	1,566	9,712
F_E, т	0,084	0,084	0,084	0,083	0,08	0,076	0,07	0,061	0,049	0,032
M_D, тм	0,086	0,06	0,047	0,04	0,035	0,031	0,028	0,026	0,024	0,023
M_N, тм	0,084	0,059	0,047	0,04	0,035	0,032	0,03	0,028	0,026	0,024
F_A, т	0,118	0,119	0,121	0,124	0,128	0,133	0,14	0,149	0,161	0,176

в элементах механизма. В процессе расчета величина наклона звена *BE* к горизонтальной плоскости варьировалась от минимального до максимального своего значения с шагом $\Delta\alpha = 5°$. Результаты расчета приведены в таблице.

Из этого расчета вытекает следующее:

максимальное усилие N_t в силовом гидроцилиндре *NM* при начальном положении механизма, определенное с учетом трения в узлах механизма, составляет 10,50 т;

если этот расчет повторить, исключив из него учет трения в узлах механизма, то максимальное усилие N_t в силовом гидроцилиндре *NM* в начальном положении механизма получится равным 9,60 т. Если учесть, что предельное рабочее усилие для стандартного гидроцилиндра диаметром 100 мм при максимальном рабочем давлении 175 атм составляет 13,7 т, то получается, что учет трения существенно снижает коэффициент запаса усилия в механизме;

если бы начальный угол наклона гидроцилиндра γ составлял не 11,51°, а 9°, то усилие с учетом трения составило бы 13,7 т и сработал бы предохранительный клапан гидросистемы, а механизм остался бы в нижнем положении;

если бы начальный угол наклона гидроцилиндра γ составлял 8° и менее, то усилие в силовом звене с учетом трения могло бы возрастать неограниченно.

Таким образом, авторами статьи сделано следующее:

впервые учтено влияние трения, ограничивающее область допустимых углов между элементами многозвенных механизмов;

выполнены примеры силовых расчетов механизма с учетом трения, определены критические значения углов между звеньями механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коловский, М.З.** Теория механизмов и машин [Текст] / М.З. Коловский, А.Н. Евграфов, Ю.А Семенов, А.В Слоуц.— М.: Академия, 2006.

2. Справочник по технической механике [Текст] / Под ред. акад. А.Н. Динника.— М: ОГИЗ, 1949.— 734 с.

3. **Лойцянский, Л.Г.** Курс теоретической механики [Текст] / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье.— М.: Гостехиздат, 1948.— 520 с.

УДК 621.825

Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК БАЛЛОНОВ ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МУФТ

В связи с повышающимися со стороны потребителей требованиями к эксплуатационным свойствам шинно-пневматических муфт (ШПМ), получающих все большее применение в приводах машин и оборудования различного назначения как в отечественной, так и зарубежной промышленности, возникала необходимость постоянного совершенствования их проектирования.

Это в свою очередь требует от проектировщиков и изготовителей ШПМ и их основных элементов — резино-кордных баллонов:

проведения дополнительного объема стендовых и эксплуатационных испытаний изделий;

пересмотра основных расчетных формул и применяемых методик в связи с широким внедрением новых кордных материалов и эластомеров (резин на основе новых синтетических каучуков и других ингредиентов);

решения вопросов совершенствования и создания новых ШПМ с повышенными эксплуатационными параметрами.

Резино-кордный баллон ШПМ во время работы воспринимает статические и динамические нагрузки. К статическим относятся нагрузки от давления сжатого воздуха в резинокордном баллоне и постоянной составляющей момента вращения, а к динамическим — нагрузки от переменной составляющей момента вращения и от расцентровки осей валов, соединяемых муфтой. При этом наиболее нагруженными элементами баллона являются резинокордный каркас и расположенное на меньшем диаметре внутреннее протекторное кольцо.

При динамических нагрузках муфты закон изменения момента вращения (T), передаваемого муфтой, принято считать заданным в виде простого гармонического колебания:

$$T = T_{\text{п}} + T_{\text{а}} \sin(2\pi\lambda t_{\text{т}}), \qquad (1)$$

где $T_{\text{п}}$ — постоянная составляющая момента вращения, Н·м; $T_{\text{а}}$ — амплитуда переменной составляющей момента вращения, Н·м; λ — частота крутильных колебаний, Гц; $t_{\text{т}}$ — текущее время нагружения, с.

График периодического изменения момента вращения T (рис. 1), выраженный формулой (1), представляет собой синусоидальную зависимость от времени t (цикл ассиметричный положительный). Синусоида смещена по оси T на величину $T_{\text{п}}$. Максимальное значение момента вращения

$$T_{\max} = T_{\text{п}} + T_{\text{а}}. \qquad (2)$$

При статическом нагружении муфты $T_{\text{а}} = 0$ и, следовательно, $T = T_{\text{п}}$.

Максимально возможный момент вращения, определяемый величиной сил трения на поверхности барабана трения, который может передать ШПМ (увеличение нагрузки на муфту приводит к проскальзыванию), принято называть момен-

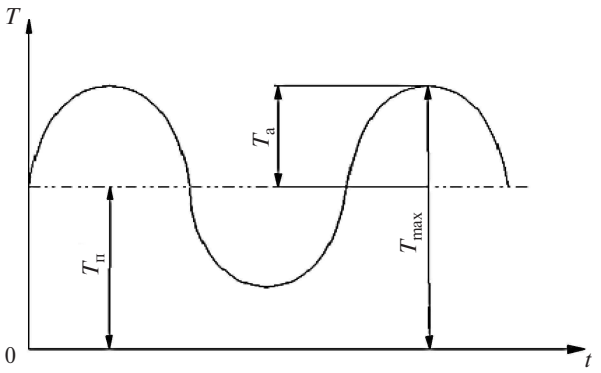


Рис. 1. График периодического изменения момента вращения муфты

том проскальзывания $T_{пр}$, Н·м. Он вычисляется по формуле

$$T_{пр} = 2\pi R^2_{тр} B f p_{уд}, \qquad (3)$$

где $R_{тр}$, м, — радиус трения на поверхности барабана; B, м, — ширина поверхности трения; f — коэффициент трения фрикционной поверхности о барабан муфты (для баллона, снабженного фрикционными колодками, $f = 0{,}2–0{,}3$); для бесколодочного баллона, где фрикционной поверхностью является резиновый протектор самого баллона, $f = 0{,}4$); $p_{уд}$, Н/м^2, — удельное давление на поверхности трения баллона и барабана муфты.

Рассмотрим основные принципы выбора, от которых зависит момент проскальзывания $T_{пр}$.

Ширина поверхности B и радиус трения $R_{тр}$ чаще всего назначаются из условия компоновки узла с учетом прочности несущего каркаса резино-кордного баллона. Поэтому в ряде случаев ШПМ по этой причине могут быть в двух и даже в трех баллоном исполнении. Существующие типоразмеры баллонов дают следующие пределы геометрического соотношения:

$$\frac{B}{R_{тр}} = 0{,}3–0{,}4.$$

Увеличение соотношения $\frac{B}{R_{тр}}$ потребует учета также таких факторов, как провисание основания баллона и технологические сложности изготовления.

Значение коэффициента трения f зависит от материала деталей фрикционных контактных пар («колодки — барабан трения» или «протектор баллона — барабан трения»), удельного давления $p_{уд}$, температуры на поверхности трения, а также скорости скольжения на фрикционной поверхности.

Неточности выбора коэффициента трения f обязательно должны компенсироваться коэффициентом запаса муфты по моменту вращения T согласно выражению

$$K = \frac{T}{T_{max}}. \qquad (4)$$

Рекомендуемое значение коэффициента запаса по моменту вращения составляет $K = 2–2{,}5$.

Величина удельного давления на поверхности трения $p_{уд}$, Н/м^2, рассчитывается по выражению

$$p_{уд} = \frac{R_в}{R_{тр}}\left(p - \Delta p - p_ц\right), \qquad (5)$$

где $R_в$, м, — наименьший радиус воздушной полости баллона во включенном состоянии (радиус вращения по внутренней поверхности камеры со стороны рабочего протектора); p, Н/м^2, — абсолютное давление сжатого воздуха в камере баллона при наполнении; Δp, Н/м^2, — потери давления, расходуемые на сжатие или растяжении стенки баллона со стороны рабочего протектора и деформацию боковин при включении; $p_ц$, Н/м^2, — давление, учитывающее влияние центробежных сил (знак «–» — для муфт обжимного типа, знак «+» — для муфт разжимного типа).

Величина $p_ц$ может быть определена по формуле

$$p_ц = \omega^2\left[3\cdot 10^{-10}\rho_{ст} p\left(R_{тр} + h\right) + 1{,}592\cdot 10\frac{-5m_k}{B}\right],$$

где ω, с$^{-1}$, — угловая скорость вращения муфты; $\rho_{ст}$, Н·с/м^3, — средняя плотность материала стенки резино-кордного баллона со стороны внутреннего протектора; h, м, — толщина стенки баллона со стороны внутреннего протектора, включающая толщины камеры, кордного каркаса и протектора; $m_к$, кг, — общая масса фрикционных колодок со шпильками.

Формула (6) выводится с помощью интегрирования центробежных сил по объему внутреннего протектора, кордного каркаса и прилегающей к нему камеры. Величина $p_ц$ получается несколько заниженной вследствие скругления радиусов центра тяжести вращающихся масс.

Потери давления на деформацию рабочего протектора Δp ориентировочно могут быть рассчитаны по выражению

$$\Delta p \approx \frac{S}{R_{\text{в}}^2} \times$$

$$\times \left[100 z_{\text{сл}} i_{\alpha} E_{\text{к}} F_{\text{к}} \sin^2 \alpha + E_p \left(h - z_{\text{сл}} i_{\alpha} F_{\text{к}} \right) \right],$$

где S, мм, — радиальный зазор между фрикционной поверхностью колодки и барабаном трения; $z_{\text{сл}}$ — число слоев корда в каркасе баллона; i_{α}, нить/мм, — частота нитей в слое корда; α, град, — угол закроя нитей в корде; $E_{\text{к}}$, МПа, — модуль упругости нитей корда; $E_{\text{р}}$, МПа, — модуль упругости резины; $F_{\text{к}}$, мм^2, — площадь поперечного сечения нити корда.

Величину $F_{\text{к}}$ можно приближенно взять в выражении $[h - zi_{\alpha} F_{\text{к}}]$, а произведение $E_{\text{к}} F_{\text{к}}$ для уменьшения погрешности определить по формуле

$$E_{\text{к}} F_{\text{к}} = \frac{1}{\text{И}} \sum_{i=1}^{i=\text{И}} \frac{N_i}{\varepsilon_i}, \text{Н}, \qquad (8)$$

где N_i, Н, — нагрузка на нить при испытаниях; ε_i — относительное удлинение нити корда (безразмерная величина); И — количество испытаний.

Формула (7) выведена из условия сжатия резино-кордного кольца с внутренним диаметром $2(R_{\text{тр}} + h)$ до диаметра $2R_{\text{тр}}$.

На основании формул (3)–(7) момент проскальзывания $T_{\text{пр}}$ может быть представлен в следующем виде:

$$T_{\text{пр}} = 2\pi R_{\text{тр}} R_{\text{в}} B a \times$$

$$\times \left\{ P - \frac{S}{R_b^2} \left[100 z_{\text{сл}} i_{\alpha} E_{\text{к}} F_{\text{к}} \sin^2 \alpha + E_p \left(h - z_{\text{сл}} i_{\alpha} F_{\text{к}} \right) \right] - \right.$$

$$\left. - \omega^2 \left[3 \cdot 10^{-10} \rho_{\text{ст}} h \left(R_{\text{тр}} + h \right) + 1{,}592 \cdot 10 \frac{-5 m_k}{B} \right] \right\}.$$

Пренебрегая незначительной потерей давления сжатого воздуха на упругую деформацию резино-кордного баллона и выбирание радиального зазора S, можно принять напряжение сжатия в резине приближенно равным рабочему давлению. При обычно рекомендуемом в ШПМ 2–2,5-кратном запасе по моменту проскальзывания $T_{\text{пр}}$ и коэффициенте трения $f = 0{,}3–0{,}4$ постоянные напряжения сдвига в протекторной резине в 7–10 раз меньше, чем указанные напряжения сжатия. Переменные напряжения сдвига от крутильных колебаний меньше постоянных или равны им, т. к. допускаемые значения амплитуды приведенного эластического момента $T_{\text{а}}$ не превышают передаваемого муфтой максимального момента вращения $T_{\max}$. Сдвиговые напряжения τ в рабочем протекторе можно определить по формуле

$$\tau = \frac{T_{\max}}{2\pi R_{\text{пр}}^2 B}, \qquad (10)$$

где $R_{\text{пр}}$, м, — средний расчетный радиус протектора.

Для муфты с резино-кордным баллоном, снабженным фрикционными колодками, значение может быть выбрано равным наибольшему радиусу вращения по шпилькам, на которых подвешены фрикционные колодки во включенном состоянии муфты, а для баллона бесколодочного исполнения $R_{\text{пр}} = R_{\text{тр}}$. Принципиальная схема шинно-пневматической муфты с резинокордным баллоном, обозначения их основных геометрических размеров, а также основные механические характеристики, необходимые для расчетов параметров муфты, приведены в [1] (рис. 1, стр. 242 и табл. 3, стр. 246) и [2] (рис. 1, стр.140).

Величина напряжений сдвига в протекторе ограничена условием

$$\tau \le [\tau] \approx 0{,}5 \text{ МПа}, \qquad (11)$$

где $[\tau]$, МПа, — допускаемое напряжение сдвига в протекторе.

Расчет баллона, состоящего из резины и кордного каркаса, на прочность — достаточно сложная задача, поскольку баллон представляет оболочку сложной конфигурации с сугубо анизотропной структурой. При работе баллона действие нагрузок на отдельные элементы не поддается точному определению. Материалы, из которых изготовлен баллон, обладают нелинейными характеристиками. Кроме того, наблюдающееся теплообразование в баллоне, а также периодическое с высокой частотой изменяющееся напряжение от момента вращения существенно затрудняют выбор величины допустимых нагрузок. Поэтому расчет баллонов обычно производится приближенно.

Силовой основой баллона служит каркас, составленный из нескольких перекрещивающихся слоев обрезиненного корда. Каждый слой представляет собой ряд параллельных нитей корда, покрытых сырой резиной. При сборке баллона такие слои накладываются друг на друга под определенным углом и после придания баллону необходимой конфигурации вулканизуются. Число слоев корда — четное, если каркас имеет преимущественно применяемую диагональную конструкцию.

При рассмотрении деформаций каркаса баллона, составленного из скрещивающихся слоев обрезиненного корда, следует помнить, что используемые в конструкции материалы (резина и корд) имеют резко различную жесткость. Так, модуль упругости резины находится в пределах 0,1–0,5 МПа, тогда как модуль продольной упругости текстильного корда (капрон, нейлон и др.) — порядка 100–200 МПа, а для металлического корда — около 10^4 МПа. Поэтому деформации, связанные с удлинением нити корда, чрезвычайно затруднены.

Вместе с тем существует вид деформации, которая происходит без изменения длины нитей корда и соответствует изменению углов ромбиков, образованных нитями корда соседних слоев (рис. 2). При чем деформации ромбов остаются взаимно-перпендикулярными и, следовательно, представляют собой направления главных деформаций. При расчете резино-кордной конструкции можно считать, что нити корда нерастяжимы, а деформации описанного типа — единственно возможные.

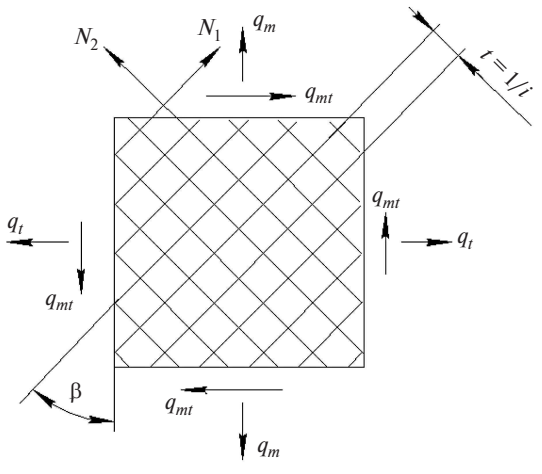


Рис. 2. Схема сил, приложенных к бесконечно малому элементу каркаса

Напряжения в резине весьма малы по сравнению с напряжениями в нитях корда, и поэтому деформации перекоса ромбов происходят без затраты энергий.

Таким образом, резино-кордную конструкцию баллона можно рассматривать как нерастяжимую сетку с ромбическими ячейками. Из предположения малости напряжений в нитях следуют определенные соотношения между усилиями в нитях корда и интенсивностями сил, отнесенных к единице длины сечения резино-кордного баллона. Возможная неравномерность распределения нагрузки между всеми слоями и нитями должна учитываться введением опытных поправочных коэффициентов.

Нити корда не обладают однородной структурой по сечению, а представляют собой сложное сочетание прядей и стренг; понятие напряжения для нитей корда — чисто условное. Поскольку механические характеристики определяются для нити в целом, целесообразно напряженное состояние каркаса характеризовать величиной усилия, Н/нить, в нити данной точки профиля баллона.

Для расчета на прочность баллона с диагональным каркасом можно применить теорию пневматических шин [3].

Резино-кордный баллон ШПМ рассматривается как тонкостенная гибкая торообразная оболочка, нагруженная одновременно внутренним давлением сжатого воздуха и моментом вращения.

В основу расчета баллона могут быть положены следующие допущения:

нити корда нерастяжимы;

напряжения в резине пренебрежимо малы;

изменение угла между нитями и радиальной плоскостью вследствие передачи момента вращения пренебрежимо мало;

действие центробежных сил на боковине баллона на прочность нити и равновесную форму каркаса не учитывается;

вся нагрузка на боковых свободных участках воспринимается только кордным каркасом, причем нагрузка между всеми слоями и нитями последнего распределяется равномерно;

при работе баллона расположение (направление) нитей относительно друг друга, а также относительно меридиональной плоскости, проходящей через ось вращения, не изменяется и соответствуют первоначальному состоянию;

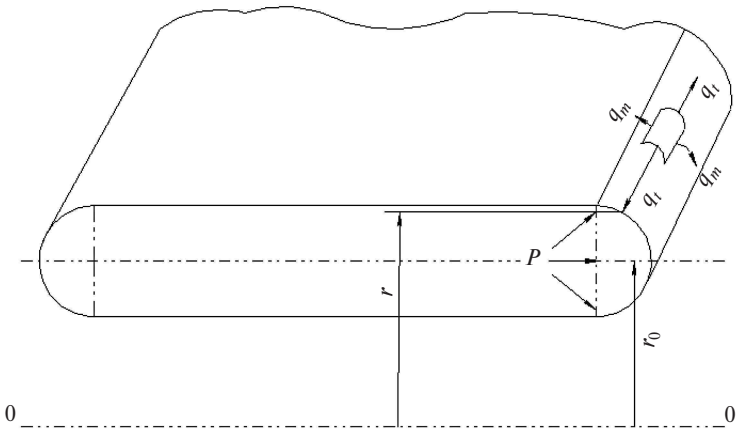


Рис. 3. Участок каркаса баллона с бесконечно малым элементом

в кордном каркасе и в нитях корда действуют только растягивающие усилия от внутреннего давления и приложенного момента вращения.

Опыт показывает, что принятые допущения обеспечивают достаточную для практических целей точность расчета резино-кордной конструкции баллона ШПМ [4].

Конфигурация каркаса баллона, при которой нагрузки от внутреннего давления воспринимаются только кордными нитями, получила название равновесной.

Расчет прочности резино-кордного баллона включает:

определение линейных напряжений, возникающих как под действием давления сжатого воздуха, так и вследствие действия приложенного момента вращения;

вычисление по этим напряжениям величины сил, растягивающих нити корда.

На рис. 3 показан участок каркаса с выделенным на нем бесконечно малым элементом. На рис. 4 представлена схема равновесия под действием внутреннего давления сжатого воздуха конечной части оболочки каркаса.

Схема сил, приложенных к бесконечно малому элементу каркаса резино-кордного баллона, была приведена на рис. 2.

На рис. 2–4 обозначены:

О-О — ось вращения баллона; r, м, — текущий радиус вращения точки, лежащей на профиле каркаса; r_0, м, — радиус вращения точки профиля, соответствующей максимальной ширине оболочки (баллона); q_m, Н/м, — единичное меридиональное усилие; q_t, Н/м, — единичное окружное усилие; q_{mt}, Н/м, — единичное сдвиговое усилие; q_{m0}, Н/м, — усилие q_m, соответствующее радиусу r_0; ρ_m, м, — радиус кривизны оболочки в радиальной плоскости сечения; ρ_t,

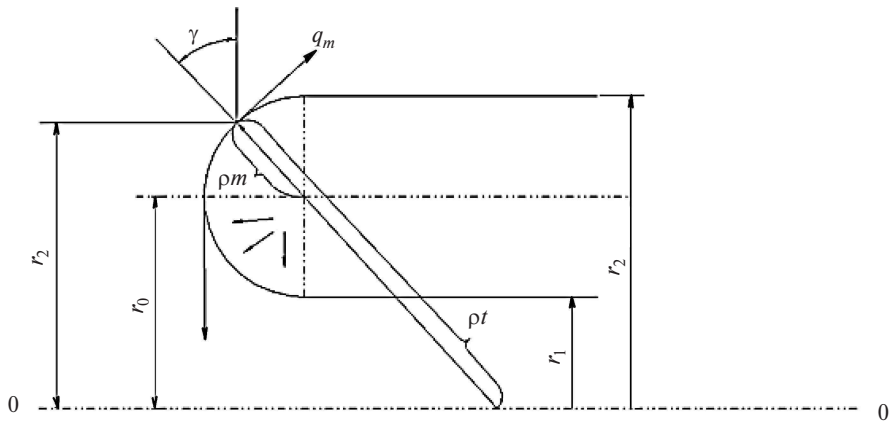


Рис. 4. Схема равновесия конечной части оболочки каркаса под действием внутреннего давления

м, — радиус кривизны оболочки в плоскости, перпендикулярной радиальной плоскости; φ, град, — угол между нормалью к оболочке и плоскостью, перпендикулярной оси вращения; r_1, м, — наименьший радиус вращения оболочки; r_2, м, — наибольший радиус вращения оболочки; N_1, Н/нить, — наибольшее усилие в нити; N_2, Н/нить, — наименьшее усилие в нити; β, град, — угол между нитью и радиальной плоскостью сечения; t, м, — шаг между нитями по нормали; i_α, нить/м, — частота нитей в слое корда по нормали.

На основании уравнений равновесия элементарного участка с единичной длиной сторон для многослойных конструкций (см. рис. 2) можно записать следующие зависимости для единичных соответственно меридионального, окружного и сдвигового усилий, Н/м:

$$q_m = 1/2 z_{сл} i_\alpha (N_1 + N_2)\cos^2\beta; \quad (12)$$

$$q_t = 1/2 z_{сл} i_\alpha (N_1 + N_2)\sin^2\beta; \quad (13)$$

$$q_{mt} = 1/2 z_{сл} i_\alpha (N_1 - N_2)\sin\beta\cos\beta, \quad (14)$$

где $z_{сл}$ — число слоев корда в каркасе.

Из выражений (12) и (13) следует, что, если напряжениями в резине можно пренебречь и нагрузки воспринимаются только нитями корда, то

$$q_t = q_m \operatorname{tg}^2\beta. \quad (15)$$

Из условия равновесия элементарного участка каркаса под действием внутреннего давления сжатого воздуха p и усилий q_m, q_t следует (см. рис. 3)

$$\frac{q_m}{\rho_m} + \frac{q_t}{\rho_t} = p. \quad (16)$$

Выражение (16) известно в механике оболочек как уравнение Лапласа, связывающее интенсивности меридионального и окружного усилий [5].

По условию равновесия конечного участка оболочки, ограниченного радиусами r_0 и r (см. рис. 4), следует, что

$$q_m = \frac{P\left(r^2 - r_0^2\right)}{2r\cos\varphi}. \quad (17)$$

Из рис. 4 также видно, что

$$\rho_t = \frac{r}{2r\cos\varphi}. \quad (18)$$

Подставляя в выражение (16) зависимости (15), (17) и (18), получим следующее:

$$\frac{1}{\rho_m} + \frac{\operatorname{tg}^2\beta\cos\varphi}{2} = \frac{2r\cos\varphi}{r^2 - r_0^2}. \quad (19)$$

Из теории шин [3] известно, что угол между нитью корда и радиальной плоскостью сечения (синус угла в любой точке оболочки) отвечает закону

$$\sin\beta = \frac{r}{r_2}\sin\beta_2. \quad (20)$$

На рис. 5 представлена расчетная схема, позволяющая выразить зависимость ρ_m от φ и r.

Из схемы видно, что

$$\frac{1}{\rho_m} = -\frac{d\varphi}{dr}\sin\varphi. \quad (21)$$

Подставляя в выражение (19) зависимости (20) и (21), получим выражение

$$-\frac{d\varphi}{dr}\sin\varphi + \frac{2\cos\varphi}{\dfrac{r_2^2}{\sin^2\beta_2} - r^2} =$$

$$= \frac{2r}{r^2 - r_0^2} - \frac{r}{\dfrac{r_2^2}{\sin^2\beta_2} - r^2}. \quad (22)$$

При условии $r = r_2$ и $\varphi = 0$ дифференциальное уравнение (20) решается в виде

$$\cos\varphi = \frac{\left(r^2 - r_0^2\right)\sqrt{1 - \dfrac{\sin^2\beta_2}{r_2^2}r^2}}{\left(r_2^2 - r_0^2\right)\cos\beta_2} =$$

$$= \frac{\left(r^2 - r_0^2\right)\cos\beta}{\left(r_2^2 - r_0^2\right)\cos\beta_2}. \quad (23)$$

Если далее в уравнения (10), (12) и (14) сделать, соответственно, подстановки

$$i_\alpha = i_2 \frac{r_2}{r}\frac{\cos\beta_2}{\cos\beta}, \quad (24)$$

и

$$q_{mt} = \frac{T_{\max}}{4\pi r^2}, \quad (25)$$

то получим выражения

$$N_1 - N_2 = \frac{T_{\max}}{2\pi r z_{\text{сл}} i_2 r_2 \sin\beta\cos\beta_2} \qquad (26)$$

и

$$N_1 - N_2 = \frac{P\left(r_2^2 - r_0^2\right)}{z_{\text{сл}} i_2 r_2 \cos^2\beta}. \qquad (27)$$

Из совместного рассмотрения зависимостей (26) и (27) следует выражение

$$N_{1,2} = \frac{1}{2z_{\text{сл}} i_2 r_2}\left[\frac{P\left(r_2^2 - r_0^2\right)}{\cos^2\beta} \pm \frac{T_{\max}}{2\pi r \sin\beta\cos\beta_2}\right]. \qquad (28)$$

Поскольку при $\varphi = 180^\circ$ $\cos\varphi = -1$, то из выражения (23) следует

$$r_0^2 = \frac{r_2^2\cos\beta_2 + r_1^2\cos\beta_1}{\cos\beta_1 + \cos\beta_2}$$

и

$$r_2^2 - r_0^2 = \frac{\left(r_2^2 - r_1^2\right)\cos\beta_1}{\cos\beta_1 + \cos\beta_2}.$$

При подстановке выражения (29) в зависимость (28) при $r = r_1$ и $\beta_1 = \alpha$ получим выражение усилие в нитях корда каркаса:

$$N_{1,2} = \frac{\cos\beta_k}{2z_{\text{сл}} i_\alpha \cos\alpha} \times$$

$$\times\left[\frac{P\left(r_2^2 - r_1^2\right)}{\left(\cos\alpha + \cos\beta_k\right)\cos\alpha} \pm \frac{T_{\max}}{2\pi r_1 \sin\alpha\cos\beta_k}\right]. \qquad (30)$$

Если пренебречь изменением частоты нитей i_α и угла β по профилю поперечного сечения в процессе сборки и последующей вулканизации резино-кордного баллона, то на основании (30) можно записать

$$N_{1,2} = \frac{1}{4z_{\text{сл}} i_\alpha \cos\alpha}\left[\frac{P\left(r_2^2 - r_1^2\right)}{\cos\alpha} \pm \frac{T_{\max} r_2}{\pi r_1^2 \sin\alpha}\right]. \qquad (31)$$

При анализе выражения (31) видно, что если

$$T_{\max} \le \frac{\pi r_1^2\left(r_2^2 - r_1^2\right)P}{r_2}\operatorname{tg}\alpha, \qquad (32)$$

то нити каркаса нагружены только растягивающими усилиями.

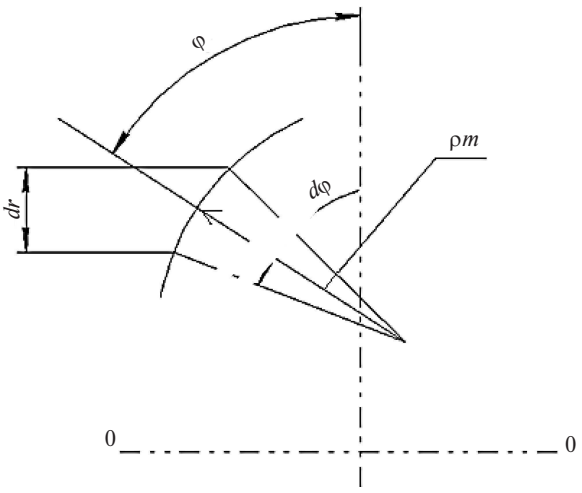


Рис. 5. Расчетная схема для выражения зависимости ρ_m от φ и r

Практика эксплуатаций резино-кордных баллонов ШПМ и торообразных элементов высокоэластичных муфт показала, что в определенных пределах допускается возникновение сжимающей нагрузки в нитях кордного каркаса.

Из теории оболочек [6] предел сжимающей нагрузки на нить можно установить по соотношению

$$\frac{N_1}{N_2} \ge -3. \qquad (33)$$

Тогда из формул (31) и (33) следует

$$T_{\max} \le \frac{2\pi r_1^2\left(r_2^2 - r_1^2\right)}{r_2}\operatorname{tg}\alpha. \qquad (34)$$

Максимальное возможное усилие растяжения нити определяется по зависимости

$$N_{\max} = k_{\text{н}} N_1, \qquad (35)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент неравномерности распределения нагрузок.

Величина $k_{\text{н}}$ может быть выбрана из условия

$$k_{\text{н}} = 2{,}15. \qquad (36)$$

Коэффициент запаса прочности нити $k_{\text{зап}}$ может быть определен по зависимости

$$k_{\text{зап}} = \frac{N_{\text{разр}}}{N_{\max}[k]}, \qquad (37)$$

где $N_{\text{разр}}$, Н/нить, — разрывная нагрузка на нить; $[k]$ — допускаемый запас прочности каркаса на

разрыв, который при расчетах и проектировании [4] баллонов ШПМ принимают не ниже $[k] = 5$.

В заключение следует указать, что принятый ряд допущений и предложенные выражения позволяют достаточно полно и объективно учитывать основные статические нагрузки при расчете шинно-пневматических муфт.

Применение теории тонких оболочек пневматических шин позволило получить зависимости для определения линейных напряжений и последующего расчета по ним и полученным выражениям усилий в нитях каркаса резинокордного баллона ШПМ.

Результаты расчетов по предложенным формулам хорошо согласуются с результатами стендовых испытаний и эксплуатации ШПМ на объектах.

Поэтому предложенные выражения могут быть применены при модернизации существующих и разработке новой, предполагающей использование компьютерной программы методики расчета и проектирования ШПМ с повышенными эксплуатационными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кукаленко, Б.Д.** Нагрев поверхности трения шинно-пневматических муфт агрегатов нефтебуровых и газобуровых установок [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 3 (130).— С. 241–247.

2. **Кукаленко, Б.Д.** Упруго-демпфирующие характеристики шинно-пневматических муфт [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. №4 (135).—С. 138–141.

3. **Бидерман, В.Л.** Автомобильные шины. Конструкция, расчет, испытание, эксплуатация [Текст] / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер, С.П. Захаров [и др.].— М.: ГХИ, 1963.— 383 с.

4. **Кукаленко, Б.Д.** Силовые элементы упругих муфт. Конструирование, производство, эксплуатация [Текст] / Б.Д. Кукаленко.— Л.: Химия,1977.— 143 с.

5. **Пономарев, С.Д.** Расчеты на прочность в машиностроении [Текст] / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев [и др.].— М.: Маштиз, 1958.— Том 2.—974 с.

6. **Новожилов, В.В.** Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов.— Л.: Судпромгиз, 1962.— 431 с.

УДК 629.1.032.001

Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов, И.М. Герасимов

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания, в которой изначально исключаются чисто тепловые потери, а учитывается только тепловая энергия рабочего тела, используемая непосредственно для производства механической энергии [1], сравнительно проста и обеспечивает хорошее совпадение результатов расчета по ней с эксплуатационными показателями реальных циклов.

Последнее обстоятельство объясняется отсутствием в предлагаемой расчетной модели каких-либо произвольно принимаемых коэффициентов, снижающих точность вообще достаточно сложных традиционных методов расчета теплового цикла [2].

Суммарно тепловые потери в двигателях обратно пропорциональны разности $1-\eta_i$, где η_i — индикаторный КПД теплового процесса.

Таким образом, в механическую работу, которая определяет индикаторную мощность двигателя, из общего количества вводимого в цикл с топливом количества теплоты Q_0 преобразуется только доля $Q_1 = Q_1' + Q_1'' = \eta_i Q_0$ (рис. 1).

Величина Q_0 зависит от теплотворной способности $Q_т^н$ топлива, коэффициента избытка воздуха α при сгорании топлива и массы воздуха L_0, теоретически необходимой для сгорания единицы массы топлива :

$$Q_0 = Q_т^н / (1 + \alpha L_0).$$

Помимо знания Q_1, для построения расчетной модели и ее использования при анализе влияния на выходные показатели двигателей различных действующих факторов необходимо знать и ряд других данных, в том числе весьма специфических, которые могут быть известными разве что только для уже эксплуатируемых силовых объектов.

Дело в том, что, помимо просто задаваемых исходных параметров рабочего процесса — давления p_a и температуры T_a рабочего тела в начале процесса его сжатия в цилиндре двигателя, степени сжатия ε, количества теплоты Q_1, показателей политроп процессов сжатия n_1 и расширения n_2, теплоемкостей рабочего тела при постоянном объеме c_v и постоянном давлении c_p, возникает проблема, вызванная невозможностью однозначного построения расчетного цикла из-за незнания, прежде всего, максимального давления сгорания p_z, определяемого соотношением теплот Q_1' и Q_1''.

От последнего же зависит степень повышения давления $\lambda = p_z / p_c$ и само P_z, а также степень предварительного расширения $\rho = V_z / V_y$, кстати говоря, влияющая, как и λ, на эффективность рабочего процесса и на мощность двигателя.

Таким образом, при отсутствии должного метода построения модели определение ее параметров в узловых точках a, c, y, z, b (см. рис. 1) требует кропотливого поиска соотношения Q_1' и Q_1'' (λ и ρ), обеспечивающего приемлемые результаты по эффективным показателям теплового цикла, в первую очередь — по среднему индикаторному (эффективному) давлению p_i (p_e) и индикаторному (эффективному) КПД η_i (η_e), но в общем случае не соответствующего оптимальным показателям.

Для исключения подобной ситуации целесообразно производить построение математической модели цикла и расчет по ней для целого ряда согласованных соотношений теплот Q_1' и Q_1'' в функции от ρ с последующим анализом полученных результатов.

Таким образом, прежде следует определить аналитическую зависимость между ρ и λ.

Так (см. рис. 1),

$$Q_1' = c_v\left(T_y - T_c\right) = c_v T_c\left(T_y / T_c - 1\right) = c_v T_c\left(\lambda - 1\right);$$

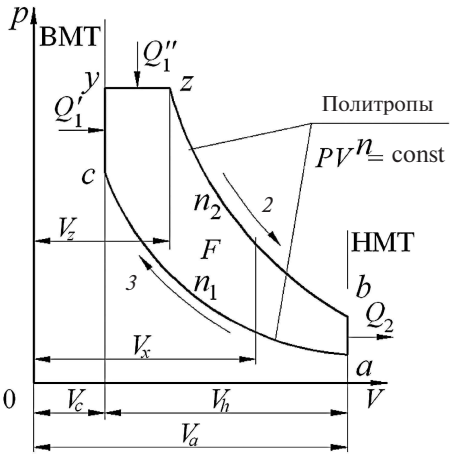


Рис. 1. Математическая модель теплового цикла быстроходного дизеля:

p — давление в цилиндре; V — объем цилиндра; V_a — полный объем цилиндра; V_c — объем камеры сгорания; V_h — рабочий объем; V_z — объем в конце предварительного расширения; V_x — текущий объем; $Q_1' + Q_1'' = Q_1$ — теплота, подводимая к рабочему телу; Q_2 — отводимая теплота; n_1 и n_2 — показатели политроп сжатия и расширения; F — площадь индикаторной диаграммы; ВМТ — верхняя мертвая точка положения поршня; НМТ — нижняя мертвая точка

$$Q_1'' = c_p\left(T_z - T_y\right) = c_p T_y\left(T_z / T_y - 1\right) = c_p T_y\left(\rho - 1\right);$$

$$Q_1' + Q_1'' = Q_1 = c_v T_c\left(\lambda - 1\right) + c_p T_y\left(\rho - 1\right),$$

откуда $\lambda = \dfrac{Q_1 + c_v T_c}{T_c\left[c_p\left(\rho - 1\right) + c_v\right]}$.

Попутно заметим, что наибольшая эффективность теплового процесса имеет место при $\rho = 0$ ($Q_1'' = 0$), когда истинное расширение рабочего тела (линия «$z - b$» на рис. 1) соответствует полному ходу поршня (полному рабочему объему цилиндра двигателя — V_h), т. е. осуществляется при наиболее полном истинном (не «предварительном») расширении рабочего тела с максимальным использованием его теплосодержания, преобразуемого в механическую работу.

Однако при относительно большом λ возрастает теплота Q_1', а следовательно, увеличивается и максимальное давление в камере сгорания двигателя $p_z = \lambda p_c$, могущее быть и недопустимым по условию прочности и надежности всего силового агрегата в целом.

В связи с данным обстоятельством желательно ограничить численное значение ρ достаточно узкими пределами — порядка 1,0–1,5.

В конечном итоге при наличии данных по количеству вводимой в цикл теплоты Q_1, функциональной зависимости $\lambda = f(\rho)$ и другим исходным показателям для любого принимаемого значения ρ решение задачи построения расчетной модели цикла становится элементарным.

Так [1], $p_c = p_a \varepsilon^{n_1}$; $T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}$.

Далее, используя приведенные выше формулы:

$$\lambda = \frac{Q_1 + c_v T_c}{T_c[c_p(\rho - 1) + c_v]}; \quad Q_1'' = c_p T_y(\rho - 1);$$

$$-p_y = p_z = \lambda p_c; \quad T_y = \lambda T_c; \quad T_z = Q_1''/c_p + T_y;$$

$$p_b = p_z/\delta^{n_2}; \quad T_b = T_z/\delta^{n_2 - 1}.$$

Среднее индикаторное давление теплового цикла

$$p_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1}\left[\lambda(\rho - 1) + \frac{\lambda\rho}{n_2 - 1}\left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}}\right) - \frac{1}{n_1 - 1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}}\right)\right];$$

индикаторный КПД ($\rho = 1$)

$$\eta_i = \frac{T_z - T_b}{T_z}.$$

Применительно к вариантам $\rho > 1$ при расчете η_i следует учитывать, что площадь F индикаторной диаграммы (см. рис. 1), как и оцениваемое ею среднее индикаторное давление p_i, характеризует работу единичного цикла, а следовательно, в пропорциональном отношении — и объем тепловой энергии, затрачиваемой на ее производство.

Таким образом, в этом случае для расчетных значений ρ

$$\eta_{i\rho} = \eta_i p_{i\rho} / p_i,$$

где η_i и p_i — для $\rho = 1$.

Индикаторная мощность двигателя $N_i = 13{,}1 D^2 S p_i n i/m$, где D — диаметр цилиндра, м; S — ход поршня, м; n — число оборотов коленчатого вала двигателя, мин$^{-1}$; i — число цилиндров; m — коэффициент тактности (для двухтактных двигателей $m = 1$, для четырехтактных $m = 2$); p_i – МПа.

Механический КПД, зависящий от нагрузки двигателя, в частности в функции p_i при ориентировании, к примеру, на фактические соотношения индикаторного КПД и механических потерь четырехтактного дизеля ЯМЗ-238 [1], $\eta_м = 1 - 0{,}12/p_i$ и среднее эффективное давление — $p_e = \eta_м p_i$; эффективная мощность двигателя — $N_e = 13{,}1 D^2 S p_e n i/m$; эффективный КПД цикла — $\eta_e = \eta_м \eta_i$; удельный эффективный расход топлива — $g_e = 3600/42000\eta_e$.

Для показа принципа построения математической модели по предлагаемому методу и возможности достаточно объективного анализа получаемых при этом сравнительных результатов при его использовании, рассмотрим пример применительно к вновь проектируемому восьмицилиндровому четырехтактному дизелю, аналогичному по конструкции реальному дизелю ЯМЗ-238 (N_e = 176,5 кВт при числе оборотов коленчатого вала 2100 мин$^{-1}$; ε = =16,5; $\eta_i = 0{,}43$; $\eta_м = 0{,}85$; $g_e = 0{,}236$ кг/кВт·ч; η_e = 0,360; D = 130 мм; s = 140 мм).

Примем для него $\varepsilon = 18$; $p_a = 0{,}085$ МПа (0,87 кгс/см^2); $T_a = 290$ К; (n_1 = 1,37; n_2 = 1,22; $c_v = 0{,}17$ ккал/кг·град; $c_p = 0{,}23$ ккал/кг·град).

При теплотворной способности дизельного топлива $Q_T^н$ = 10000 ккал/кг и L_0 = 14,3 кг/кг общее теплосодержание единицы массы рабочей смеси для дизеля ЯМЗ-238

$$Q_0 = Q_т^н/(1 + \alpha L_0) = 10000/(1 + 1{,}5 \cdot 14{,}3) = 445{,}4 \text{ ккал/кг.}$$

При этом доля тепловой энергии, вводимой в тепловой цикл этого дизеля для производства только механической энергии, равна

$$Q_1 = \eta_i Q_0 = 0{,}43 \cdot 445{,}4 = 191{,}5 \text{ ккал/кг.}$$

Примем для нового двигателя с целью показа «контрастности» сопоставляемых итоговых результатов несколько формализованный вариант, в принципе реальный по итоговым результатам только при газотурбинном наддуве, с увеличением подводимого количества теплоты Q_1 — до 250 ккал/кг.

Тогда

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = 0{,}085 \cdot 18^{1{,}37} = 4{,}46 \text{ МПа;}$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n\ -1} = 290 \cdot 18^{1{,}37 - 1} = 845{,}0 \text{ К.}$$

Расчетные данные теплового цикла на базе его математической модели

№ п/п	ρ	δ	λ	p_z, МПа	T_y, К	Q_1', ккал/кг	Q_1'', ккал/кг	T_z, К	T_y, К	p_i, МПа	η	η	η	p_e, МПа	g_e, г/кВт·ч	N_e, кВт
1	1,0	18,00	2,74	12,22	2315,3	250,0	0,0	2315,3	1226,0	1,061	0,4370	0,887	0,417	0,941	206	245,0
2	1,1	16,36	2,41	10,75	2070,3	208,3	41,7	2251,6	1217,5	1,049	0,465	0,886	0,412	0,929	208	241,9
3	1,2	15,00	2,16	9,63	1825,2	166,6	83,4	2187,8	1205,8	1,035	0,458	0,884	0,405	0,915	212	238,2
4	1,3	13,85	1,95	8,70	1647,8	136,5	113,5	2141,3	1201,0	1,015	0,450	0,882	0,397	0,895	216	233,0
5	1,4	12,86	1,78	7,94	1504,1	112,0	138,0	2104,1	1199,6	1,000	0,443	0,880	0,390	0,880	219	229,1

Исходные данные: ε =18; $Q_1 = Q_1' + Q_1'' = 250$ ккал/кг; $p_0 = 0{,}085$ МПа (0,87 кгс/см^2); $T_a = 290$ К; $p_e = 4{,}46$ МПа; $T_c = 845{,}0$ К; $n_1 = 1{,}37$; $n_2 = 1{,}22$; $c_v = 0{,}17$ ккал/кг·град; $c = ,23$ ккал/кг·град; $Q_T^н = 42000$ кДж/кг (10000 ккал/кг)

Далее для принимаемых значений $\rho = 1; 1{,}1; 1{,}2; 1{,}2; 1{,}3$ и $1{,}4$ рассчитываются соответствующие значения λ, максимального давления сгорания $p_z = p_y$, давления p_b, температур T_y, T_z и T_b, а затем — среднего индикаторного давления p_i и индикаторного КПД η_i.

В частности, для $\rho = 1$ будет

$$\lambda = \frac{250 + 0{,}17 \cdot 845{,}0}{845{,}0\left[0{,}23(1-1) + 0{,}17\right]} = 2{,}74;$$

$$P_z = P_y = 2{,}74 \cdot 4{,}46 = 12{,}22 \text{ МПа};$$

$$T_y = T_z = \lambda T_c = 2{,}74 \cdot 845{,}0 = 2315{,}3 \text{ К};$$

$$T_z = Q_1'' / c_p + T_y;$$

$$p_b = P_z / \varepsilon^{n_2 - 1} = 12{,}22 / 18^{1{,}22} = 0{,}36 \text{ МПа};$$

$$T_b = T_z / \varepsilon^{n_2 - 1} = 2315{,}3 / 18^{1{,}22-1} = 1226{,}0 \text{ К}.$$

Среднее индикаторное давление

$$p_i = \frac{4{,}46}{18-1}\left[2{,}74(1-1) + \frac{2{,}74}{1{,}22-1}\left(1 - \frac{1}{18^{1{,}22-1}}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{1{,}37-1}\left(1 - \frac{1}{18^{1{,}37-1}}\right)\right] = 1{,}061 \text{ МПа}.$$

Индикаторный КПД

$$\eta_i = \frac{2315{,}3 - 1226{,}0}{2315{,}3} = 0{,}470.$$

При механическом КПД $\eta_м = 1 - 0{,}12/p_i$ = =1–0,12/1,061 = 0,887; среднее эффективное давление цикла — $p_e = \eta_м p_i$ = 0,877·1,061 = =0,941 МПа; эффективный КПД — $\eta_e = \eta_м \eta_i$ = = 0,887·0,470 = 0,417; удельный расход топлива — $g_e = 3600 / \left(Q_T^н \cdot \eta_e\right)$ = 3600/42000·0,417 = = 0,206 кг/кВт·ч, а мощность —

N_e = 13,1·0,13²·0,14·0,941·2100·8/2 = 245,0 кВт.

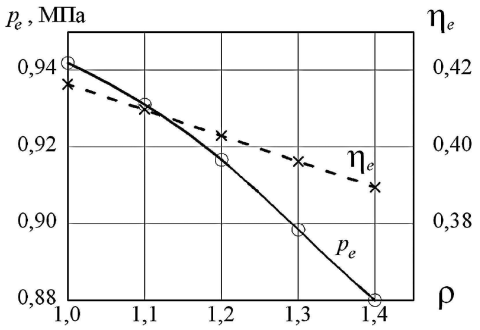


Рис. 2. Среднее эффективное давление p_e и эффективный КПД η_e циклов в функции степени предельного расширения ρ

Если для вновь проектируемого двигателя механический КПД отличается от такового для дизеля ЯМЗ-238 (более совершенный технологический процесс производства, использование более качественных смазочных масел) и, к примеру, составляет 0,87 (для ЯМЗ-238 $\eta_м = 0{,}85$), то в этом случае расчетное значение $\eta_м$ надлежит умножить на отношение 0,87/0,85.

Полные расчетные данные для предлагаемой модели теплового цикла по принятому ряду значений ρ приведены в таблице.

По результатам расчетов представлены графики зависимостей p_e и η_i в функции от ρ (рис. 2), подтверждающие, как и следовало ожидать, что при принятых для двигателя более прогрессивных исходных данных имеет место явное преимущество, особенно первого расчетного варианта цикла ($\rho = 1$), по сравнению с таковыми для прототипа при допустимом, кстати говоря, максимальном давлении сгорания (поз. 1 табл.).

Также с очевидностью неоспоримы сравнительные преимущества и малых значений ρ по экономичности (η_e, g_e) и по среднему эффективному давлению (p_e), а следовательно, и по мощности N_e двигателя.

Обращает на себя внимание также реальность полученных расчетных данных, касающихся удельного расхода топлива, не выходящего за уже достигнутые в настоящее время пределы g_e и превышение до 40 % мощности N_e по сравнению с таковой дизеля ЯМЗ-238, в данном случае объясняемое существенным повышением вводимой в цикл теплоты, увеличением степени сжатия ε и максимального давления сгорания p_z — до 12,22 МПа против 8,5 МПа у дизеля ЯМЗ-238.

При этом удельный расход топлива относительно такового у прототипа снизился примерно на 14 %; в абсолютном выражении они составили соответственно 206 и 236 г/кВт·ч.

Очевидно и то, что при наличии высококалорийного топлива, аналогичного принятому в расчете, можно было бы получить весьма высокие эксплуатационные показатели по среднему эффективному давлению рабочего цикла и экономичности двигателя и без его форсирования путем наддува.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русинов, Р.В.** Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости, СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 1 (142).— С. 182–188.

2. Теория ДВС [Текст]: учебное пособие / Под ред. Н.Х. Дьяченко. — М.: Машиностроение, 1974.— С. 121–133.

УДК 539.384: 629.12.011.001.24

С.О. Барышников

СЛОЖНЫЙ ИЗГИБ ОБШИВКИ СУДНА

Обшивка судна, помимо поперечной нагрузки (давление воды и др.), испытывает и действие усилий в ее срединной поверхности, которые могут быть как растягивающими, так и сжимающими. Наиболее неприятен случай действия сжимающих сил, которые могут привести к потере устойчивости элементов обшивки. Основным силовым набором (шпангоуты, стрингеры) обшивка делится на прямоугольные панели (пластины), которые можно считать защемленными по всему контуру.

Известные решения (см. [1–4]) получены для шарнирно опертой пластины и пластины, две противоположные кромки которой защемлены, а две другие свободно оперты; там же приводятся исследования, касающиеся определения эйлеровой нагрузки. Однако во многих случаях расчетной схемой является пластина, защемленная по всем граням. Эта задача — более сложная и не имеет точного решения в замкнутой форме, а ее приближенные решения оставляют открытым вопрос о точности результатов. В данной работе точное решение достигается в ходе бесконечного итерационного процесса исправления невязок в граничных условиях [5]. При достижении заданной точности процесс прекращается.

Рассмотрим прямоугольную защемленную пластину с размерами в плане $a \times b$ и постоянной толщиной h, нагруженную равномерной поперечной нагрузкой q_0 и постоянными сжимающими усилиями T_x и T_y, приложенными к граням пластины (рис.1). Начало системы координат XOY поместим в центр пластины.

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины имеет вид [1, 2]

$$D\nabla^2\nabla^2 W = q_0 - T_x\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - T_y\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2}, \qquad (1)$$

где W — прогиб срединной поверхности пластины; $D = \dfrac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластины; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\nabla^2\nabla^2 = \dfrac{\partial^4}{\partial X^4} + 2\dfrac{\partial^4}{\partial X^2 \partial Y^2} + \dfrac{\partial^4}{\partial Y^4}$ — бигармонический оператор.

Перейдем к безразмерным координатам $x = X/b,\ \ y = Y/b$. Тогда уравнение (1) можно привести к виду

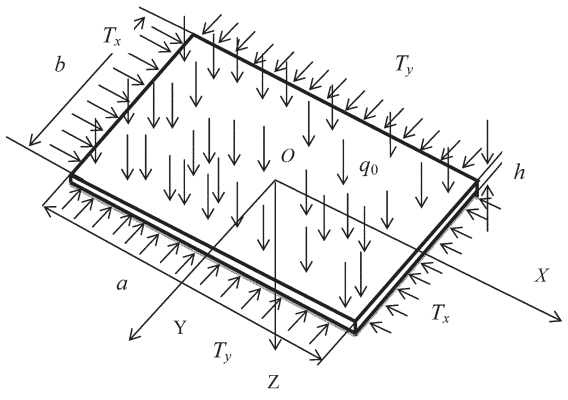


Рис. 1. Защемленная по контуру пластина под действием поперечной нагрузки и сжимающих усилий в срединной плоскости

$$\nabla^2\nabla^2 w + T_1\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + T_2\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 1, \qquad (2)$$

где $w = \dfrac{W D}{q_0 b^4}$ — относительный прогиб; $T_1 = \dfrac{b^2}{D}T_x$, $T_2 = \dfrac{b^2}{D}T_y$ — относительные сжимающие усилия, приложенные к граням.

Относительные размеры пластины будут такими: $-\gamma/2 \le x \le \gamma/2$, $-1/2 \le y \le 1/2$, где $\gamma = a/b$.

Граничные условия на защемленных кромках имеют вид

$$x = \pm\gamma/2 \quad \text{при} \quad w = 0, \quad \partial w/\partial x = 0; \qquad (3)$$

$$y = \pm 1/2 \quad \text{при} \quad w = 0, \quad \partial w/\partial y = 0. \qquad (4)$$

Задача ставится так: найти функцию прогибов $w(x,y)$, удовлетворяющую дифференциальному уравнению (2) и граничным условиям (3), (4).

Разложим правую часть уравнения (2) в двойной ряд Фурье:

$$1 = \sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} q_{ks}\cos(\mu_s x)\cos(\lambda_k y), \qquad (5)$$

где $\mu_s = s\pi/\gamma$, $\lambda_k = k\pi$;

$$q_{ks} = \frac{4}{\gamma}\int_{-\gamma/2}^{\gamma/2}\int_{-1/2}^{1/2}\cos(\mu_s x)\cos(\lambda_k y)\,dx\,dy = \frac{16}{\gamma}\frac{(-1)^{\tilde{k}+1}(-1)^{\tilde{s}+1}}{\lambda_k\mu_s}, \qquad (6)$$

Здесь $\tilde{k} = (k+1)/2$, $\tilde{s} = (s+1)/2$. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\nabla^2\nabla^2 w + T_1\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + T_2\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{16}{\gamma}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}(-1)^{\tilde{s}+1}\frac{\cos(\mu_s x)}{\mu_s}\frac{\cos(\lambda_k y)}{\lambda_k}. \qquad (7)$$

Начальный компонент решения выберем в виде

$$w_0(x,y) = \frac{16}{\gamma}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} g_{ks}\frac{(-1)^{\tilde{k}}(-1)^{\tilde{s}}}{\lambda_k\mu_s}\cos(\mu_s x)\cos(\lambda_k y), \qquad (8)$$

где g_{ks} — неопределенные коэффициенты.

Функция (8) удовлетворяет условиям отсутствия прогибов защемленных граней. Потребуем, чтобы она удовлетворяла и дифференциальному уравнению изгиба (7). Тогда для отыскания коэффициентов g_{ks} получаем уравнение

$$g_{ks}\left[(\lambda_k^4 + \mu_s^2)^2 - T_1\mu_s^2 - T_2\lambda_k^2\right] = 1,$$

из которого следует

$$g_{ks} = \frac{1}{\left(\lambda_k^2 + \mu_s^2\right)^2 - T_1\mu_s^2 - T_2\lambda_k^2}. \qquad (9)$$

Начальный компонент (8) представляет известное решение для свободно опертой пластины.

Заметим, что для устойчивости свободно опертой пластины сжимающие усилия должны быть такими, чтобы знаменатель дроби (9) не обращался в ноль.

Начальное решение (8) не удовлетворяет лишь условиям отсутствия углов поворота заделанных сечений (вторые условия в (3), (4)), т. е. порождает следующие невязки:

$$\theta_{x0}\big|_{x=\frac{\gamma}{2}} = \frac{\partial w_0}{\partial x}\Big|_{x=\frac{\gamma}{2}} = \sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}\alpha_{k0}\cos(\lambda_k y); \qquad (10)$$

$$\theta_{y0}\big|_{y=\frac{1}{2}} = \frac{\partial w_0}{\partial y}\Big|_{y=\frac{1}{2}} = \sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\alpha^*_{s0}\cos(\mu_s x), \qquad (11)$$

где

$$\alpha_{k0} = -\frac{16}{\gamma\lambda_k}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} g_{ks}; \qquad \alpha^*_{s0} = -\frac{16}{\gamma\mu_s}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} g_{ks}. \qquad (12)$$

Заметим, что на противоположных гранях выражения (10) и (11) поменяют знак.

Чтобы компенсировать невязки (10), (11), поступим следующим образом. Добавим к начальному решению w_0 функцию вида

$$w_1(x,y)=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}A(k)\,\mathrm{ch}\left(\beta_k x\right)\cos\left(\lambda_k y\right), \quad (13)$$

где $A(k)$, β_k — неопределенные коэффициенты.

Потребуем, чтобы эта функция удовлетворяла соответствующему однородному дифференциальному уравнению задачи

$$\nabla^2\nabla^2 w+T_1\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+T_2\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0. \quad (14)$$

Тогда для определения коэффициентов β_k получаем биквадратное уравнение

$$\beta_k^4-2\lambda_k^2\mu_s^2+\lambda_k^4+T_1\beta_k^2-T_2\lambda_k^2=0, \quad (15)$$

из которого находим

$$\beta_k^2=\frac{1}{2}\left[2\lambda_k^2-T_1+\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}\right];$$

$$\overline{\beta}_k^2=\frac{1}{2}\left[2\lambda_k^2-T_1-\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}\right].$$

Подкоренные выражения в этих формулах могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от величин T_1 и T_2. В последнем случае выражения для β_k^2 и $\overline{\beta}_k^2$ будут комплексными. В силу четности функции $\mathrm{ch}\left(\beta_k x\right)$ получим

$$\beta_k=\sqrt{\frac{1}{2}\left[2\lambda_k^2-T_1+\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}\right]};$$

$$\overline{\beta}_k=\sqrt{\frac{1}{2}\left[2\lambda_k^2-T_1-\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}\right]}. \quad (16)$$

Поскольку вместо одной последовательности коэффициентов β_k получено две (16), то функция (13) преобразуется так:

$$w_1(x,y)=$$

$$=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}\left(A_k\,\mathrm{ch}\left(\beta_k x\right)+B_k\,\mathrm{ch}\left(\overline{\beta}_k x\right)\right)\cos\left(\lambda_k y\right), \quad (17)$$

где коэффициенты A_k и B_k должны быть такими, чтобы функция (17) удовлетворяла граничным условиям (3), т. е. компенсировала бы невязку (10). (Невязкой (11) мы займемся позже.) Это дает систему двух уравнений

$$\begin{cases}A_k\,\mathrm{ch}\dfrac{\beta_k\gamma}{2}+B_k\,\mathrm{ch}\dfrac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}=0,\\ A_k\beta_k\,\mathrm{sh}\dfrac{\beta_k\gamma}{2}+B_k\overline{\beta}_k\,\mathrm{sh}\dfrac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}=-\alpha_{k0},\end{cases} \quad (18)$$

из которой получим

$$A_k=-\frac{\alpha_{k0}}{\mathrm{ch}\dfrac{\beta_k\gamma}{2}\left(\beta_k\,\mathrm{th}\dfrac{\beta_k\gamma}{2}-\overline{\beta}_k\,\mathrm{th}\dfrac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}\right)},$$

$$B_k=-\frac{\mathrm{ch}(\beta_k\gamma/2)}{\mathrm{ch}(\overline{\beta}_k\gamma/2)}A_k. \quad (19)$$

Функция прогибов (17) на гранях $y=\pm 1/2$ равна нулю, но порождает угловые деформации заделанных сечений, т. е. дает невязки, подобные (11):

$$\theta_{y1}\Big|_{y=\frac{1}{2}}=\frac{\partial w_1}{\partial y}\Big|_{y=\frac{1}{2}}=$$

$$=-\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\lambda_k\left(A_k\,\mathrm{ch}\left(\beta_k x\right)+B_k\,\mathrm{ch}\left(\overline{\beta}_k x\right)\right). \quad (20)$$

Разложим гиперболические косинусы в ряды Фурье:

$$\mathrm{ch}\left(\beta_k x\right)=\frac{4}{\gamma}\mathrm{ch}\frac{\beta_k\gamma}{2}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\frac{\mu_s\cos\left(\mu_s x\right)}{\beta_k^2+\mu_s^2};$$

$$\mathrm{ch}\left(\overline{\beta}_k x\right)=$$

$$=\frac{4}{\gamma}\mathrm{ch}\frac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\frac{\mu_s\cos\left(\mu_s x\right)}{\overline{\beta}_k^2+\mu_s^2}. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20) и переставляя знаки суммирования, после преобразований получим

$$\theta_{y1}\Big|_{y=\frac{1}{2}}=\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\alpha_{s1}^{*}\cos\left(\mu_s x\right), \quad (22)$$

где

$$\alpha_{s1}^{*}=$$

$$=-\frac{4\mu_s}{\gamma}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{g_{ks}\lambda_k\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}}{\beta_k\,\mathrm{th}\dfrac{\beta_k\gamma}{2}-\overline{\beta}_k\,\mathrm{th}\dfrac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}}\alpha_{k0}. \quad (23)$$

Сложим теперь невязки (11) и (22):

$$\theta_{yI}\Big|_{y=\frac{1}{2}}=\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\alpha_{sI}^{*}\cos\left(\mu_s x\right). \quad (24)$$

Здесь $\alpha^{*}_{sI}=\alpha^{*}_{s1}+\alpha^{*}_{s0}$.

Теперь, чтобы их устранить, добавим к решению функцию, аналогичную (13):

$$w_2(x,y)=\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\bar{s}+1}C(s)\,\mathrm{ch}\left(\xi_s y\right)\cos\left(\mu_s x\right), \quad (25)$$

где ξ_s, $C(s)$ подлежат определению. Подчиняя эту функцию однородному дифференциальному уравнению изгиба (14), получим для коэффициентов ξ_s биквадратное уравнение

$$\xi_s^4-2\mu_s^2\xi_s^2+\mu_s^4-T_1\mu_s^2+T_2\xi_s^2=0, \quad (26)$$

которое дает

$$\xi_s=\sqrt{\frac{1}{2}\left[2\mu_s^2-T_2+\sqrt{4\mu_s^2(T_1-T_2)+T_2^2}\right]};$$

$$\bar{\xi}_s=\sqrt{\frac{1}{2}\left[2\mu_s^2-T_2-\sqrt{4\mu_s^2(T_1-T_2)+T_2^2}\right]}. \quad (27)$$

Заметим, что формулы (26), (27) аналогичны (15) и (16). Здесь так же корни могут быть как действительными, так и комплексными.

С учетом (27) функция (25) запишется в виде

$$w_2(x,y)=$$

$$=\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\bar{s}+1}\left(\left(C_s\,\mathrm{ch}\left(\xi_s y\right)+D_s\,\mathrm{ch}\left(\bar{\xi}_s y\right)\right)\cos\left(\mu_s x\right)\right). \quad (28)$$

Потребуем, чтобы она удовлетворяла условиям (4) на грани $y=\pm 1/2$, компенсируя при этом невязку (24). Тогда для определения коэффициентов C_s, D_s получим систему, аналогичную (18):

$$\begin{cases} C_s\,\mathrm{ch}\dfrac{\xi_s}{2}+D_s\,\mathrm{ch}\dfrac{\bar{\xi}_s}{2}=0; \\ C_s\xi_s\,\mathrm{sh}\dfrac{\xi_s}{2}+D_s\bar{\xi}_s\,\mathrm{sh}\dfrac{\bar{\xi}_s}{2}=-\alpha_{sI}^{*}, \end{cases} \quad (29)$$

из которой находим

$$C_s=-\frac{\alpha_{sI}^{*}}{\mathrm{ch}\dfrac{\xi_s}{2}\left(\xi_s\,\mathrm{th}\dfrac{\xi_s}{2}-\bar{\xi}_s\,\mathrm{th}\dfrac{\bar{\xi}_s}{2}\right)};$$

$$D_s=-C_s\frac{\mathrm{ch}(\xi_s/2)}{\mathrm{ch}(\bar{\xi}_s/2)}. \quad (30)$$

Функция (28) удовлетворяет условию отсутствия прогибов граней $x=\pm\gamma/2$, но подобно функции (17) дает угловые деформации этих граней:

$$\theta_{x1}\big|_{x=\gamma/2}=\frac{\partial w_2}{\partial x}\Big|_{x=\gamma/2}=$$

$$=-\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}\mu_s\left(C_s\,\mathrm{ch}\left(\xi_s y\right)+D_s\,\mathrm{ch}\left(\bar{\xi}_s y\right)\right). \quad (31)$$

Разлагая гиперболические косинусы в ряды Фурье по формулам, аналогичным (21),

$$\mathrm{ch}\left(\xi_s y\right)=4\,\mathrm{ch}\frac{\xi_s}{2}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}\frac{\lambda_k\cos\left(\lambda_k y\right)}{\xi_s^2+\lambda_k^2},$$

$$\mathrm{ch}\left(\bar{\xi}_s y\right)=4\,\mathrm{ch}\frac{\bar{\xi}_s}{2}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\bar{k}+1}\frac{\lambda_k\cos\left(\lambda_k y\right)}{\bar{\xi}_s^2+\lambda_k^2}, \quad (32)$$

подставляя (30), (32) в (31) и переставляя знаки суммирования, получим

$$\theta_{x1}\big|_{x=\gamma/2}=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}\alpha_{k1}\cos\left(\lambda_k y\right), \quad (33)$$

где

$$\alpha_{k1}=$$

$$=-4\lambda_k\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{g_{ks}\mu_s\sqrt{4\mu_s^2(T_1-T_2)+T_2^2}}{\xi_s\,\mathrm{th}\dfrac{\xi_s}{2}-\bar{\xi}\,\mathrm{th}\dfrac{\bar{\xi}_s}{2}}\alpha_{sI}^{*}. \quad (34)$$

Таким образом, после наложения каждой из пары функций $w_1(x,y)$, $w_2(x,y)$, которые мы будем называть исправляющими, остаются невыполненными граничные условия по углам поворота смежных заделанных кромок. Поэтому полное устранение невязок достигается бесконечным наложением исправляющих функций типа (17) и (28), т. е. в ходе итерационного процесса, который нетрудно реализовать на компьютере. Невязки выполнения граничных условий должны убывать по абсолютной величине. При достижении заданной точности вычислений итерационный процесс прекращается.

Последующие пары исправляющих функций будут иметь вид

$$w_{1n}(x,y)=\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}(A_{kn}\,\mathrm{ch}\,\beta_k x+$$

$$+B_{kn}\,\mathrm{ch}\,\bar{\beta}_k x)\cos\lambda_k y; \quad (35)$$

$$w_{2n}(x,y)=\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\bar{s}+1}\left(C_{sn}\,\mathrm{ch}\left(\xi_s y\right)+\right.$$

$$\left.+\,D_{sn}\,\mathrm{ch}\left(\bar{\xi}_s y\right)\right)\cos\mu_s x, \quad (36)$$

где n — номер итерации ($n=2, 3, \ldots$), а коэффициенты рядов вычисляются по формулам

$$A_{kn} = -\frac{\alpha_{k(n-1)}}{\operatorname{ch}\frac{\beta_k\gamma}{2}\left(\beta_k \operatorname{th}\frac{\beta_k\gamma}{2} - \overline{\beta}_k \operatorname{th}\frac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}\right)};$$

$$B_{kn} = -\frac{\operatorname{ch}(\beta_k\gamma/2)}{\operatorname{ch}(\overline{\beta}_k\gamma/2)} A_{kn}; \qquad (37)$$

$$C_{sn} = -\frac{\alpha^*_{sn}}{\operatorname{ch}\frac{\xi_s}{2}\left(\xi_s \operatorname{th}\frac{\xi_s}{2} - \overline{\xi}_s \operatorname{th}\frac{\overline{\xi}_s}{2}\right)};$$

$$D_{sn} = -C_{sn}\frac{\operatorname{ch}(\xi_s/2)}{\operatorname{ch}(\overline{\xi}_s/2)}, \qquad (38)$$

где в свою очередь

$$\alpha_{k(n-1)} =$$

$$= -4\lambda_k \sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{g_{ks}\mu_s\sqrt{4\mu_s^2(T_1-T_2)+T_2^2}}{\xi_s \operatorname{th}\frac{\xi_s}{2} - \overline{\xi}\operatorname{th}\frac{\overline{\xi}_s}{2}}\alpha^*_{s(n-1)}; \qquad (39)$$

$$\alpha^*_{sn} =$$

$$= -\frac{4\mu_s}{\gamma}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} \frac{g_{ks}\lambda_k\sqrt{4\lambda_k^2(T_2-T_1)+T_1^2}}{\beta_k \operatorname{th}\frac{\beta_k\gamma}{2} - \overline{\beta}_k \operatorname{th}\frac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}}\alpha_{k(n-1)}. \qquad (40)$$

В силу линейности задачи искомое решение можно записать так:

$$w(x,y) =$$

$$= \frac{16}{\gamma}\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty} g_{ks}\frac{(-1)^{\tilde{k}}(-1)^{\tilde{s}}}{\lambda_k\mu_s}\cos(\mu_s x)\cos(\lambda_k y) +$$

$$+\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{k}+1}\left(A_{k\Sigma}\operatorname{ch}(\beta_k x) + B_{k\Sigma}\operatorname{ch}(\overline{\beta}_k x)\right)\cos(\lambda_k y) +$$

$$+\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}(-1)^{\tilde{s}+1}\left(C_{s\Sigma}\operatorname{ch}(\xi_s y) + D_{s\Sigma}\operatorname{ch}(\overline{\xi}_s y)\right)\cos(\mu_s x), \qquad (41)$$

где $A_{k\Sigma} = A_k + A_{k2} + \ldots + A_{kn}$, …, $D_{s\Sigma} = D_s + D_{s2} + \ldots + D_{sn}$ — суммарные значения коэффициентов рядов по всем итерациям.

Условие сходимости итерационных решений к точному решению задачи можно записать в виде

$$\lim_{n\to\infty}(\alpha_{kn}, \alpha^*_{ks}) = 0 \quad (k, s = 1, 3, \ldots). \qquad (42)$$

В качестве примера рассмотрим случай $T_1 = T_2 = T$, т. е. когда пластина одинаково сжимается с обеих сторон. Формулы (9), (16), (27), (23), (34) примут вид

$$g_{ks} = \frac{1}{(\lambda_k^2+\mu_s^2)(\lambda_k^2+\mu_s^2-T)}; \qquad (43)$$

$$\beta_k = \lambda_k; \quad \overline{\beta}_k = \sqrt{\lambda_k^2 - T}; \qquad (44)$$

$$\xi_s = \mu_s; \quad \overline{\xi}_s = \sqrt{\mu_s^2 - T}; \qquad (45)$$

$$\alpha^*_{s1} = -\frac{4T}{\gamma}\mu_s\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{g_{ks}\lambda_k\alpha_{k0}}{\beta_k \operatorname{th}\frac{\beta_k\gamma}{2} - \overline{\beta}_k \operatorname{th}\frac{\overline{\beta}_k\gamma}{2}}; , \qquad (46)$$

$$\alpha_{k1} = -4\lambda_k T\sum_{s=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{g_{ks}\mu_s\alpha^*_{sI}}{\xi_s \operatorname{th}\frac{\xi_s}{2} - \overline{\xi}_s \operatorname{th}\frac{\overline{\xi}_s}{2}}. \qquad (47)$$

(Если $T < \pi^2$, то для квадратной пластины подкоренные выражения будут всегда положительными.)

Для вычисления прогибов была составлена программа в системе аналитических вычислений

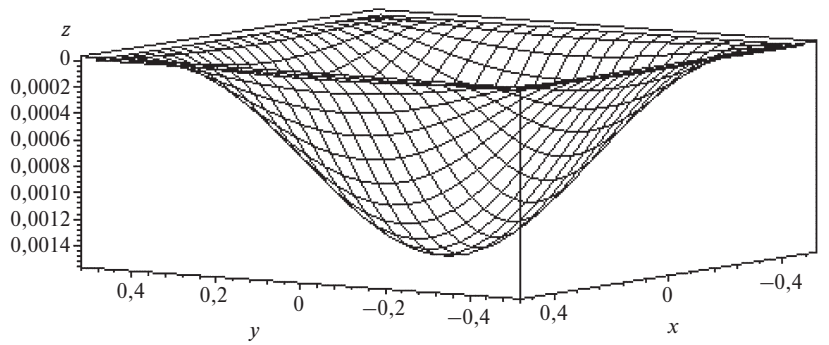


Рис. 2. Изогнутая поверхность квадратной пластины при $T = 9$

Maple 14. В рядах удерживалось 199 членов, число итераций — 12. При дальнейшем увеличении этих параметров первые пять значащих цифр не изменялись. Процесс быстро сходился. Для проверки правильности работы программы сначала сжимающие усилия принимались равными единице. При этом максимальный прогиб в центре квадратной пластины составил 0,0012904. Для сравнения: при отсутствии сжимающих усилий в работе [2] получено значение 0,00126. Таким образом, сжимающие усилия в плоскости пластины увеличивают ее прогиб.

На рис. 2 приведена изогнутая поверхность квадратной пластины при $T = 9$. Максимальный относительный прогиб составил 0, 0015332.

Зная функцию прогибов (41), нетрудно получить выражения изгибающих моментов и произвести их вычисления.

Предложенный метод позволяет получить решение, сколь угодно близкое к точному, увеличением количества членов в рядах и числа итераций. Вычислительный алгоритм весьма прост. Анализ сходимости итерационных решений можно проводить численно в ходе самого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Папкович, П.Ф.** Строительная механика корабля. Часть II [Текст] / П.Ф. Папкович.— Л.: Гос. союзное изд-во судостр. промыш-сти, 1941.— 960 с.

2. **Тимошенко, С.П.** Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер.— М.: Физматгиз, 1963.

3. **Тимошенко, С.П.** Устойчивость упругих систем [Текст] / С.П. Тимошенко.— М.: Гостехиздат, 1955.

4. **Голоскоков, Д.П.** Математическое моделирование упругих тонкостенных систем [Текст] / Д.П. Голоскоков, А.А. Грищенков.— СПб.: Изд-во СПГУВК, 1999.

4. **Сухотерин, М.В.** Об одном методе исследования защемленной по контуру прямоугольной пластины [Текст] / М.В. Сухотерин.— Докл. АН Армянской ССР.— 1987.— Т. LXXXV, 4.— С. 147–151.

УДК 669.1.017:669.018.44:669.018.28:621.74.011

А.И. Рудской, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко,
С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. Сообщение 3: МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Результаты анализа строения жаропрочного жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2, выполненного в [1, 2], показали, что его структура в литом состоянии неоднородна и состоит из фаз разной природы, которые при высокотемпературной выдержке претерпевают различные изменения — растворение существующих, образование и последующее растворение новых фаз сложного состава. Изменчивость фазового состава при высоких (1100–1200 °С) температурах — неотъемлемое свойство сплава 45Х26Н33С2Б2 на Fe-Cr-Ni-основе. Это выделяет его из ряда жаростойких жаропрочных сплавов на железной или никелевой основе, предназначенных для работы при температурах до 1000 °С. Объяснение этого явления дано С.Б. Масленковым [3]: «...процессы дисперсионного выделения, коалесценции и растворения термодинамически неустойчивых частиц второй фазы происходят непрерывно. Эти процессы происходят регенеративно, цикл повторяется за циклом, поэтому, сколько бы ни состаривать сплав предварительно и усложнять режимы термической обработки, он при длительной тепловой выдержке будет изменять свои свойства, охрупчиваться в результате постоянного выделения частиц упрочняющей фазы и изменения структурного состояния».

Исходная литая структура сплава 45Х26Н33С2Б2 находится в крайне неравновесном фазовом состоянии, поскольку переход к состоянию равновесия подавлен высокой скоростью охлаждения при первичной кристаллизации, равной для стандартных условий охлаждения $V_{охл} \approx 1$ К/с. Об этом свидетельствует наличие большого объема эвтектики, состоящей из матричной γ-фазы и карбида Me_7C_3, образовавшегося в связи с сильной ликвацией углерода (коэффициент распределения между жидкой и твердой фазами при кристаллизации $k \approx 0{,}2$) и значительной ликвацией хрома ($k \approx 0{,}8$) [1]. Эвтектика не является стабильной, и в процессе выдержки при 1150 °С длительностью до 100 ч большая ее часть в структуре растворяется [2]. Одновременно в процессе выдержки происходит взаимодействие различных карбидных фаз и матрицы с образованием и последующим растворением продуктов превращения: карбида $Me_{23}C_6$ и различных интерметаллидных фаз, обозначаемых как γ′-фаза и γ″-фаза, различного (переменного) состава, определяемого особенностями взаимодействия карбида $Me_{23}C_6$ и карбида ниобия NbC с матричной γ-фазой [4].

Направленность процесса трансформации структуры можно определить исходя из средней концентрации электронных дырок в легированном твердом растворе [3, 5], которая рассчитывается по формуле

$$\bar{N}_v = \sum_{i=1}^{n} m_{ai}(N_{vi}), \qquad (1)$$

где m_{ai} — атомная концентрация элементов в твердом растворе; N_{vi} — концентрация электронных дырок для каждого элемента, приведенная в [3, 4]. Основные элементы, образующие ГЦК γ-фазы, дают следующий вклад (1/атом)

в среднюю концентрацию электронных дырок: алюминий — 7,66; кремний — 6,66; титан –6,66; ниобий — 5,66; хром — 4,66; вольфрам — 4,66; молибден — 4,66; марганец — 3,66; железо — 2,22; никель — 0,61.

Методика расчета концентрации электронных дырок в атомах разных элементов предполагает ряд допущений, особенно при анализе результатов расчета применительно к установлению граничных условий существования различных фаз в железо-хром-никелевых жаропрочных сплавах. В этом случае принципиально допущение о близости состояния сплава к равновесному. Оно позволяет исключить из рассмотрения влияние фактора времени, которое фактически не может быть учтено при анализе термодинамических предпосылок возникновения центров новой фазы. Фактор времени — определяющий для диффузионного транспорта атомов, обеспечивающего рост центров новой фазы и ее растворение при термической обработке или эксплуатации жаропрочных сплавов в интервале температур 1000–1200 °С ($T/T_{сол}$ = = 0,77–0,86). При этих температурах диффузионные потоки элементов замещения (потоки взаимной диффузии) имеют значительную интенсивность ($D = 10^{-11}$–10^{-12} см^2/с), но остаются лимитирующим процессом стабильности или изменчивости структуры сплава.

Составы γ, γ′ и γ″-фаз в этих сплавах могут существенно изменяться в процессе термической обработки и при эксплуатации. Интерметаллидные фазы в сплаве 45Х26Н33С2Б2 образуются как после первичной кристаллизации, так и после длительных выдержек при температуре 1150 °С [1, 2]. Состав фаз, определенный микрорентгеноспектральным анализом с использованием анализатора Tescan VEGA 5136 LM в исходном состоянии и после выдержки различной длительности при 1150 °С, приведен в табл. 1 (в массовых и атомных процентах).

Инструментальное определение состава фаз позволяет установить направление процесса трансформации структуры. Предполагается [3, 5], что увеличение числа электронных дырок относительно $N_v = 2{,}50$ свидетельствует о возможности образования и роста фаз с высоким содержанием хрома при снижении содержания железа и никеля, например γ′-фазы. Однако из полученных экспериментальных данных (см. табл. 1) видно, что для жаростойких сплавов, например сплава 45Х26Н33С2Б2, эта закономерность справедлива только для исходного литого состояния. При длительной выдержке в исследованном сплаве происходит растворение как карбидных фаз, так и γ′-фазы, которая, очевидно, неравновесна; при этом показатель N_v в начале высокотемпературной выдержки (до 50 ч) повышается от 2,50 до 3,60, а затем (при 100 ч) снижается до 3,30.

Анализ места расположения фаз и кинетики их образования, роста и растворения позволил сформулировать несколько положений:

1) базовый матричный состав в основном твердом растворе и в эвтектике остается практически неизменным в процессе длительной высокотемпературной выдержки и характеризуется концентрацией электронных дырок N_v = = 2,50 1/атом;

2) образование γ′- и γ″-фаз различного состава сопровождается повышением концентрации электронных дырок до $N_v = 3{,}80$–$3{,}30$;

3) образование γ′-фазы происходит по механизму взаимной диффузии за счет замещения в узлах кристаллической решетки покидающих его элементов с низкой концентрацией электронных дырок — железа ($N_{vi} = 2{,}22$) и никеля ($N_{vi} = 0{,}61$) — прибывающими по механизму диффузионного «дрейфа» элементами с высокой концентрацией электронных дырок — кремнием ($N_{vi} = 6{,}66$) и ниобием ($N_{vi} = 5{,}66$). Соответственно: покидает объем новой фазы (масс. %) до 32 % железа и до 20 % никеля; прибывает для образования новой фазы до 10 % кремния, 11 % ниобия, 13 % азота, 15 % хрома и до 3 % вольфрама;

4) образование γ″- и γ′-фаз при растворении карбида ниобия на поздней стадии высокотемпературной выдержки зависит от места образования центра новой фазы: на границе матрицы и карбида ниобия образуется высокохромистая γ″-фаза с содержанием хрома до 66 масс. %, который обеспечивает повышение концентрации электронных дырок до $N_v = 3{,}80$ практически без участия кремния и ниобия; изолированная в карбиде ниобия γ-фаза превращается в γ′-фазу с $N_v = 2{,}70$ за счет повышения содержания кремния.

В данном случае элементы, концентрация которых в новой фазе выше, чем в матрице, под-

Таблица 1

Химический состав фаз, образующихся в сплаве 45Х26Н33С2Б2при первичной кристаллизации и длительной высокотемпературной выдержке, и значения концентрации электронных дырок для матрицы и интерметаллидов

№	Состояние сплава	Расположение фазы в структуре	Обозначение и условная формула	Содержание основных химических элементов: *а* — масс. %; *б* — ат. %	Концентрация электронных дырок
1	Исходное литое	Матричный твердый раствор	–	*а* — 1,9Si; 0,9Mn; 23,4Cr; 34,8Ni; 37,7Fe; 0,9Nb; 0,2Mo; 0,7W *б* — 3,8Si; 0,9Mn; 25,0Cr; 33,0Ni; 36,5Fe; 0,5Nb; 0,09Mo; 0,018W	$N_v = 2,51$
2	Исходное литое	Карбид хрома в эвтектике	Me_7C_3	9,0C; 78,0Cr; 8,5Fe; 1,5Ni; 0,5Mo; 1,5W	
3	Исходное литое	Карбид ниобия	NbC	11,7C; 84,8Nb; 0,8Ti; 1,2Cr; 0,7Fe; 0,7Ni	
4	Выдержка при 1150 °С, 100 ч	Матричный твердый раствор	–	*а* — 2,3Si; 1,0Mn; 23,0Cr; 34,5Ni; 37,4Fe; 0,9Nb; 0,2Mo; 0,7W *б* — 4,3Si; 0,9Mn; 24,0Cr; 33,5Ni; 36,7Fe; 0,5Nb; 0,09Mo; 0,018W	$N_v = 2,50$
5	Выдержка при 1150 °С, 50 ч	γ′–фаза на границе карбида хрома и матрицы	$Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	*а* — 8,0Si; 37,1Cr; 31,0Ni; 5,0Fe; 11,0Nb; 3,0W; 4,0N *б* — 14,2Si; 35,3Cr; 26,6Ni; 4,5Fe; 6,0Nb; 13,4N	$N_v = 3,58$; без N
6	Выдержка при 1150 °С, 100 ч	Центр γ′-фазы, расположенной в матрице	$Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$	*а* — 8,2Si; 36,1Cr; 31,6Ni; 5,1Fe; 11,5Nb; 2,8W; 4,5N *б* — 14,5Si; 33,8Cr; 27,0Ni; 4,6Fe; 6,3Nb; 13,8N	$N_v = 3,77$; без N
		Край γ′-фазы, расположенной в матрице	$Cr_7Ni_5Si_3N_3Fe_3Nb$	*а* — 6,8Si; 32,5Cr; 32,5Ni; 13,0Fe; 8,8Nb; 2,3W; 3,8N *б* — 11,8Si; 31,7Cr; 27,6Ni; 11,7Fe; 4,6Nb; 12,6N	$N_v = 3,33$; без N
7	Выдержка при 1150 °С, 50 ч	γ″-фаза на границе с карбидом ниобия	Cr_5NiFe	*а* — 66Cr; 15Fe; 13Ni; 1,0Si; 3,0W; *б* — 71,0Cr; 14,3Fe; 14,3Ni	$N_v = 3,80$
8	Выдержка при 1150 °С, 2 ч	γ′-фаза внутри карбида ниобия	$Fe_7Cr_4Ni_8Si$	*а* — 35,0Fe; 21,0Cr; 41,3Ni; 2,7Si *б* — 35,0Fe; 20,0Cr; 40,0Ni; 5,0Si	$N_v = 2,70$

водятся к границе раздела новой фазы и матрицы по механизму диффузионного «дрейфа». В условиях, когда для роста новой фазы необходим подвод нескольких элементов в значительных количествах, механизм роста усложняется взаимной диффузией элементов (до 50 ат. %.), прибывающих и покидающих объем растущей частицы. Для анализа такого процесса необходимо вводить ряд трудно обосновываемых допущений, усложняющих описание механизма роста и растворения новой фазы в сплаве. Для оценки кинетики роста частиц в сложном по составу сплаве 45Х26Н33С2Б2 будем считать, что процесс лимитируется диффузией элемента замещения с наибольшим соотношением его концентрации в новой фазе и в матрице ($C_ф/C_0$), поскольку микрорентгеноспектральный анализ показывает незначительные изменения содержания химических элементов в матрице (γ-фаза) в процессе высокотемпературной выдержки и, наоборот, существенную непрерывную изменчивость химического состава образующихся и растворяющихся фаз (γ′-и γ″-фазы) (см. табл. 1). Результаты количественной оценки соотношения $C_ф/C_0$ в сплаве 45Х26Н33С2Б2 приведены в табл. 2. Из полученных данных видно, что при образовании и росте γ′-фазы наибольшее значение отношения $C_ф/C_0$ наблюдается в следующих случаях:

для роста частиц $Fe_7Cr_4Ni_8Si$ — 1,32 для кремния (N_{vi} = 6,66) и 1,21 для никеля — возможно анализом зарегистрирована начальная стадия роста частицы (1150 °С, 2 ч);

для роста частиц фазы $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$ — 12,0 для ниобия (N_{vi} = 5,66) и 3,74 для кремния — установлена основная стадия роста (1150 °С, 50 ч), после которой начинается стадия растворения.

Таким образом, лимитируют процесс роста γ′-фазы диффузия кремния и совместная диффузия кремния и ниобия.

Рост γ″-фазы Cr_5NiFe характеризуется наибольшим значением отношения $C_ф/C_0$ (2,84) для хрома (N_{vi} = 4,66), диффузия которого в данном случае и лимитирует процесс роста частиц.

Полученные экспериментальные данные и сформулированные теоретические положения позволяют описать кинетику роста частиц новых фаз в сплаве 45Х26Н33С2Б2 как лимитируемую диффузией элементов с высокой концентрацией электронных дырок. Такая схема роста частиц новой фазы по [6] (рис. 1, *а*) предполагает ряд допущений:

наличие в матричной фазе на границе с карбидами центров новой фазы, способных к росту;

способность роста новой фазы через разрыв концентрации, следовательно, через разрыв термодинамических функций и структуры кристаллических решеток матрицы и образующейся новой фазы.

Схема роста частиц новой фазы по [7] (рис. 1, *б*) требует определения функции распределения

Таблица 2

Химический состав фаз в структуре и соотношение концентрации элементов в новых фазах и в матрице ($C_ф/C_0$) в сплаве 45Х26Н33С2Б2

№	Фаза (состояние сплава)	Содержание основных химических элементов, ат. %	Соотношение $C_ф/C_0$ (для фазы и матрицы)				
			Si	Cr	Ni	Fe	Nb
1	Матрица — γ-фаза (исходное литое)	3,8 Si; 0,9 Mn; 25,0 Cr; 33,0 Ni; 36,5 Fe; 0,5 Nb; 0,09 Mo; 0,018 W	–	–	–	–	–
2	γ′-фаза $Fe_7Cr_4Ni_8Si$ (1150 °С, 2 ч)	5,0 Si; 35,0 Fe; 20,0 Cr; 40,0 Ni	**1,32**	0,80	**1,21**	0,96	–
3	γ′-фаза $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$ (1150 °С, 50 ч)	14,2 Si; 35,3 Cr; 26,6 Ni; 4,5 Fe; 6,0 Nb; 13,4 N	**3,74**	1,41	0,81	0,12	**12,00**
4	γ″-фаза Cr_5NiFe (1150 °С, 50 ч)	71,0 Cr; 14,3 Fe; 14,3 Ni	–	**2,84**	0,43	0,39	–

избыточной энергии на границе раздела матричной и новой фаз, но позволяет объяснить непрерывность и поэтапный характер процесса роста, включая инкубационный период, в течение которого происходит повышение концентрации элемента от C_0 до $C_ф$ без образования центра новой фазы, способной к росту.

В принципе, если определен инкубационный период образования новой фазы по времени появления при изотермической выдержке первых частиц фазы методом их инструментальной идентификации, то дальнейшие оценки можно проводить, решая чисто внешнюю задачу диффузионного подвода элемента с высокой концентрацией электронных дырок из матрицы к растущему зародышу новой фазы. При этом азот, являясь элементом внедрения, не может лимитировать рост частиц новой фазы из-за высоких значений коэффициента диффузии по сравнению с элементами замещения.

Рост частиц γ′-фазы ориентировочного состава $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$ в сплаве 45Х26Н33С2Б2 обусловлен следующим соотношением концентраций элементов в γ и γ′-фазах (в ат. %):

для диффузионного процесса подвода ниобия к поверхности роста концентрация в исходной матричной γ-фазе $C_0 = 0{,}5$ %; $C_ф = 7{,}0$ %;

для процесса подвода кремния $C_0 = 4{,}4$ %; $C_ф = 16{,}4$ %;

на поверхности раздела фаз в соответствии с результатами вычислительного анализа без ущерба для точности концентрация на границе раздела матрицы и растущей фазы может быть принята $C_{гр} = 0{,}1C_0$.

Размер центра новой фазы, способного расти на подложке из карбида, экспериментально определить с достаточной точностью трудно в связи с особенностью кинетики роста, которая допускает одновременный рост одних центров и растворение других. Трансмиссионная электронная микроскопия характеризуется чувствительностью распознавания частиц 20 нм; при сканирующей электронной микроскопии возможно получение изображения частиц размером начиная от 100 нм.

Оценка среднего размера центра новой фазы, способного к росту, по аналогии с процессом кристаллизации может быть выполнена по соотношению [8]

$$d_0 = 6\sigma/L, \qquad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение на границе раздела γ-фазы и γ′-фазы, L — тепловой эффект образования γ′-фазы. Для значений σ = 0,3 Дж/м^2 и $L = 3{,}0$ кДж/кг = $2\cdot10^7$ Дж/м^3 средний размер такого центра составляет $d_0 = 9\cdot10^{-8}$ м = 90 нм.

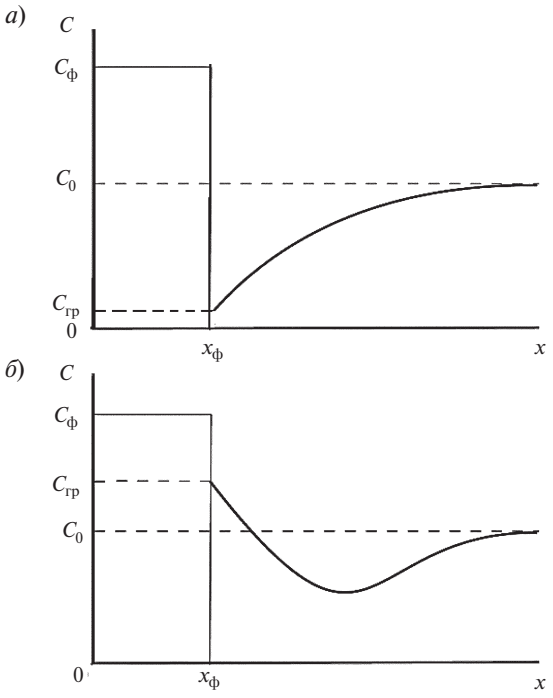


Рис. 1. Схема распределения концентрации химического элемента, диффузия которого лимитирует рост новой фазы в сплаве:

а — по Слезову и Сагаловичу [6], *б* — с учетом «дрейфа» [7] (C_0, $C_ф$, $C_{гр}$ — концентрации элемента соответственно средняя в матрице, в новой фазе и в матрице на границе раздела с новой фазой)

По-видимому, целесообразно считать, что лимитирует рост новой фазы диффузия элемента, относительное содержание которого $C_0/C_ф$ в матрице наименьшее, в данном случае — диффузия ниобия. Однако, возможно, что в данном случае поток (в ат. %) диффузии 17 % хрома, 12 % кремния и 6,0 % ниобия из матрицы в γ′-фазу должен быть скомпенсирован потоком диффузии из образующейся γ′-фазы в матрицу 31 % железа и 4 % никеля (см. табл. 1). Следует отметить, что такие величины потоков взаимной диффузии элементов обычно не наблюдаются при рассмотрении фазовых превращений в сплавах, где основой служит один элемент, например железо (или никель).

Процессы диффузии могут быть оценены количественно с точностью до порядка величины, с учетом корректировки на основе структурных исследований, использующих оборудование

с высокой разрешающей способностью. Коэффициент взаимной диффузии основных элементов в сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах 1100–1200 °С — хрома и никеля в γ-железе, железа в никеле — может быть принят равным $D = 10^{-12}$ см^2/с. Для случая образования и роста частиц новой фазы в сплаве 45Х26Н33С2Б2 концентрация рассматриваемого элемента в ней выше, чем его концентрация в матрице (γ-фаза содержит, в масс. %: 37 — железа, 35 — никеля, 23 — хрома, 4 — кремния и менее 1 — ниобия, молибдена и вольфрама [1, 2]). Следовательно, диффузионный поток элементов из матрицы к центру новой фазы при плоском росте одномерной пластинчатой фазы должен происходить через границу «новая фаза — матрица» в условиях «дрейфа», вызываемого действием движущей силы $\overline{F}$, которая смещает атомы в направлении этой силы со скоростью $\overline{v}$:

$$\overline{v} = \frac{D}{kT}\overline{F}, \text{ при этом } F = \frac{dE(x)}{dx}, \qquad (3)$$

где k — постоянная Больцмана; $E(x)$ — функция изменения с расстоянием общего потенциала (энергии) взаимодействия.

Уравнение для потока вещества имеет вид

$$q = -D\frac{dC}{dx} + C\frac{D}{RT}\frac{dE}{dx}. \qquad (4)$$

Уравнение (4) описывает процесс диффузионного обогащения границ зерен или межфазных границ в условиях «дрейфа». Для роста частиц новой фазы необходимо составить баланс вещества на границе «новая фаза — матрица» (рис. 1), что позволит оценить скорость роста и размер частиц новой фазы:

$$v(\tau)\left(C_ф - C_{гр}\right) = D\left[\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial x} - \frac{C}{RT}\frac{\partial E(0_{+0})}{\partial x}\right], \qquad (5)$$

где $v(\tau)$ — скорость роста частицы; C_0, $C_ф$, $C_{гр}$ — концентрации элемента соответственно средняя в матрице, в новой фазе и в матрице на границе раздела с новой фазой.

Условия на границе раздела не определены ввиду трудностей, связанных с оценкой физических характеристик, влияющих на взаимодействие новой фазы и матрицы через границу их раздела. Для анализа кинетики процесса роста или растворения частиц задачу можно упростить, рассматривая только подвод вещества из матрицы к границе раздела с новой фазой и учитывая только баланс вещества на границе раздела (рис. 1, *а*). Тогда для диффузии элементов в матрице справедливо уравнение Фика для полуограниченного пространства

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad x_ф < x < \mu, \qquad (6)$$

с граничными условиями

$$C(x_ф) = C_{гр}; \quad C(\mu) = C_0; \quad \frac{\partial C(\infty)}{\partial x} = 0; \qquad (7)$$

$$v(\tau)(C_ф - C_{гр}) = D\frac{\partial C(x_ф, \tau)}{\partial x}. \qquad (8)$$

Решение для полуограниченного пространства имеет вид

$$\frac{C(x,\tau) - C_{гр}}{C_0 - C_{гр}} = \operatorname{erf}\left(\frac{x - x_ф}{2\sqrt{D\tau}}\right); \qquad (9)$$

размер диффузионной зоны в матрице, граничащей с растущей частицей, составляет

$$\delta = 2\sqrt{D\tau}, \qquad (10)$$

а поток вещества из матрицы на межфазной границе равен

$$q = \sqrt{D}\frac{C_0 - C_{гр}}{\sqrt{\pi\tau}}. \qquad (11)$$

Размер (толщина) плоской частицы новой фазы, растущей в две стороны, составляет

$$L = \frac{C_0 - C_{гр}}{C_ф - C_{гр}}\frac{4\sqrt{D\tau}}{\sqrt{\pi}}. \qquad (12)$$

Пользуясь полученными выше формулами, можно рассчитать условия стабильного роста интерметаллидных фаз в литом сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Так, например, для роста γ′-фазы в исследованном сплаве получаем:

1) в инкубационный период повышения концентрации ниобия от C_0 = 0,5 % (γ-фаза) до $C_ф$ = 7,0 % (γ′-фаза)

$$\tau_{инк} = 125\frac{d_0^2}{D}; \qquad (13)$$

тогда для d_0 = 90 нм и $D = 10^{-12}$ см^2/с время до начала роста частицы γ′-фазы составляет около 10000 с ≈ 3,0 час;

2) росту частицы, который лимитирован диффузией ниобия из γ-фазы, соответствует

$$L_{\text{Nb}} = \frac{C_0 - C_{\text{гр}}}{C_{\text{ф}} - C_{\text{гр}}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D\tau} = 0{,}08\sqrt{D\tau}; \qquad (14)$$

3) в инкубационный период повышения концентрации кремния от C_0 = 4,4 % (γ-фаза) до $C_{\text{ф}}$ = 16,4 % (γ′-фаза)

$$\tau_{\text{инк}} = 7{,}0\frac{d_0^2}{D}, \qquad (15)$$

тогда для d_0 = 90 нм и $D = 10^{-12}$ см^2/с время до начала роста частицы γ′-фазы составляет около 600 с;

4) росту частицы, лимитированному диффузией кремния из γ-фазы, соответствует

$$L_{\text{Si}} = \frac{C_0 - C_{\text{гр}}}{C_{\text{ф}} - C_{\text{гр}}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D\tau} = 0{,}30\sqrt{D\tau}\,. \qquad (16)$$

Кинетика роста частиц γ′-фазы, лимитируемого диффузией ниобия и кремния, рассчитанная по формулам (13)–(16), в сплаве 45Х26Н33С2Б2 при выдержке в области температур 1100–1200 °С представлена на рис. 2.

Таким образом, результаты выполненных в [1, 2] экспериментальных исследований, а также проведенного расчетно-теоретического анализа полученных данных позволяют заключить, что в структуре литого жаропрочного жаростойкого сплава 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации 1100–1200 °С рост частиц γ′-фазы $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$, образующейся на границе карбида хрома и матрицы, лимитируется одновременно диффузией ниобия и кремния. Рост частиц γ′-фазы $Fe_7Cr_4Ni_8Si$, не содержащей ниобия, на границе карбида ниобия и матрицы лимитируется диффузией кремния. Образование γ″-фазы Cr_5NiFe при растворении карбида ниобия лимитируется диффузией хрома из матрицы.

Исследование особенностей структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации позволило выявить механизм и кинетику происходящих в нем фазовых превращений. Процесс выделения и роста частиц новых фаз в исследованном сплаве на железо-хром-никелевой основе сопровождается значительным повышением концентрации электронных дырок от N_v = 2,50 для исходной матрицы (γ-фаза) до N_v = 3,80–3,30 для образующихся γ′- и γ″-фаз. Основным источником повышения

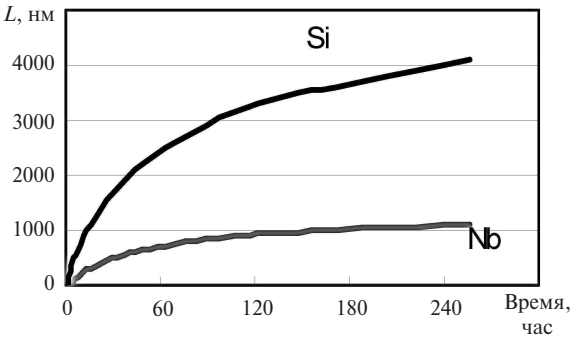


Рис. 2. Диффузионный рост на плоской подложке частиц новой γ′-фазы с концентрацией $C_{\text{ф}}$ = =14C_0 (Nb) и $C_{\text{ф}}$ = 4c_0 (Si), лимитируемый диффузией Nb и Si, для литого сплава 45Х26Н33С2Б2 при 1150 °С (C_0 — содержание элемента в матрице)

концентрации электронных дырок являются химические элементы с высоким значением N_{vi} — кремний (N_{vi} = 6,66), ниобий (N_{vi} = 5,66), хром (N_{vi} = 4,66). Образование и рост частиц новых фаз происходят в условиях диффузионного «дрейфа» этих элементов замещения из матрицы с меньшей их концентрацией (C_0) к новой фазе с большей концентрацией ($C_{\text{ф}}$).

Выделение и рост γ′-фазы характеризуются наибольшим значением отношения $C_{\text{ф}}/C_0$, которое по результатам микрорентгеноспектрального анализа составляет: при росте частиц $Fe_7Cr_4Ni_8Si$ (1150 °С, 2 ч) — 1,32 для кремния; при росте частиц фазы $Cr_7Ni_5Si_3N_3FeNb$ (1150 °С, 50 ч) — 12,0 для ниобия и 3,74 для кремния. Соответственно, в первом случае лимитирует процесс роста диффузия кремния, а во втором — совместная диффузия кремния и ниобия. Рост γ″-фазы Cr_5NiFe (1150 °С, 50 ч) характеризуется наибольшим значением отношения $C_{\text{ф}}/C_0$ (2,84) для хрома, диффузия которого и лимитирует этот процесс.

Таким образом, структура литого сплава 45Х26Н33С2Б2 действительно нестабильна, постоянно претерпевает фазовые превращения в процессе эксплуатации при температурах 1100–1200 °С. Однако за счет диффузионного перераспределения химических элементов в сплаве устанавливается некоторое условное динамическое «равновесие». Такое состояние может быть достаточно устойчивым к разупрочнению и обеспечивать высокую работоспособность сплава. Для ее количественной оценки необходимо определить значения длительной прочности сплава 45Х26Н33С2Б2 при температурах выше 1100 °С. Это является задачей следующего этапа работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1. Литое состояние [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 1 (142).— С. 155–163.

2. **Орыщенко, А.С.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2. Влияние высокотемпературной выдержки [Текст] / А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012.— № 2(147). Т. 1.— С. 217–228.

3. **Масленков, С.Б.** Стали и сплавы для высоких температур [Текст]: Справочник в двух книгах. Кн. 2 / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова.— М.: Металлургия, 1991.— 403 с.

4. **Рудской, А.И.** Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 [Текст] / А.И. Рудской, А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // Металловедение и термическая обработка металлов.— 2012.— (в печати).

5. Жаропрочные сплавы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Кн. 1. [Текст] / Пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина.— М.: Металлургия, 1995.— 384 с.

6. **Слезов, В.В.** Рост частиц новой фазы при распаде пересыщенных твердых растворов [Текст] / В.В. Слезов, В.В. Сагалович // Известия АН СССР. Неорганические материалы.— 1976. № 12.— С. 719–722.

7. **Анастасиади, Г.П.** О росте частиц новой фазы, лимитируемом диффузией одного компонента [Текст] / Г.П. Анастасиади // Физика металлов и металловедение.— 1979. Т. 47, Вып. 3.— С. 654–656.

8. **Анастасиади, Г.П.** Неоднородность и работоспособность стали [Текст] / Г.П. Анастасиади, М.В. Сильников.— СПб.: Полигон, 2002.— 624 с.

УДК 669.33

Ю.А. Митрофанов, И.О. Попов

ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ФЛЮСА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТ-НАТРИЕВОГО СИЛИКАТА В ПРОЦЕССАХ ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ

В современной металлургии одним из основных процессов, влияющим на основные технико-экономические показатели производства меди, является процесс огневого рафинирования. Существующий процесс огневого рафинирования черновых сплавов на основе меди состоит из следующих основных этапов: продувки расплава кислородсодержащим газом; окисления примесей металлов за счет их бо́льшего сродства к кислороду, чем у меди; ошлаковывания оксидов примесей с использованием кварцевого флюса (КФ); скачивания рафинировочного шлака; продувки расплава восстановительным газом (дразнение на ковкость и плотность) и розлива рафинированной меди. Однако для данного способа характерен ряд таких существенных недостатков, как: ограниченная степень рафинирования меди от трудноудаляемых примесей (например, Ni, Pb и др.); низкая производительность процесса; ограниченная растворимость в наводимых шлаках ряда тугоплавких оксидов примесных металлов, например железа (магнетит), цинка и др.; высокая температура плавления КФ и, как следствие, относительно низкая скорость образования первичных шлаков, растворения в них окисленных металлов медного сырья и получения конечных шлаков; высокая доля меди, содержащейся в шлаках в виде полидисперсных включений металлической медной фазы (механические потери); затраты на добычу и подготовку к плавке КФ, ухудшение экологии в местах карьерных разработок и добычи КФ [1, 3].

Для усовершенствования существующей технологии огневого рафинирования меди в послед-

ние года на кафедре теоретических основ металлургии цветных металлов СПбГПУ исследовалась возможность применения легкоплавкого комплексного флюса, содержащего активный «твердый» окислитель (оксиды трехвалентного железа) и химически связанные с окислителем оксиды щелочных металлов (натрий, калий) и кремния. При этом изучалась эффективность совмещения процессов окисления примесных металлов и растворения образующихся оксидов в первичном шлаке, образованном сравнительно легкоплавким исходным флюсом. В качестве основного компонента комплексного флюса в данной работе использован хибинский эгириновый концентрат (ЭК) — техногенный отход ОАО «Апатит», выделяемый из «хвостов» при комплексной переработке апатито-нефелиновых руд [2, 6]. Примерный химический и минералогический составы ЭК по данным ОАО «Апатит» следующий:

Оксиды	Содержание, % масс.
SiO_2	44,0–46,0
Fe_2O_3	15,5–17,5
FeO	8,0–10,5
Na_2O	6,2–7,8
K_2O	0,7–1,2
CaO	7,2–9,0
TiO_2	4,5–9,0
P_2O_5	0,5–1,3
Al_2O_3	1,5–3,6
V_2O_5	0,0–0,2
MnO	0,8–1,8
MgO	2,0–3,0
Прочие F^{-1}, Cl^{-1}	0,1–0,2
Влажность H_2O	0,2–0,4

Минералы	Содержание, % масс.
Эгирин $NaFe[Si_2O_6]$	75,0–85,0
Нефелин $KNa_3[AlSiO_4]_4$	4,0–9,0
Ильменит $FeTiO_3$	3,0–8,0
Сфен $CaTi[SiO_4](O,OH,F)$	3,5–6,0
Апатит $Ca_{10}[PO_4]_6(F,OH)_2$	12,0–3,7
Титаномагнетит ($FeFe_2O_4 \cdot Fe_2TiO_4$)+($FeFe_2O_4 \cdot FeTiO_3$)	0,8–4,5
Микроклин $K[AlSi_3O_8]$	0,3–1,0
Гидрослюды $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$	0,5–1,0
Лепидомелан $KFe_3[(Al,Fe)Si_3O_{10}](OH)_2$	0,3–0,5
Полевые шпаты	0,3–1,0
Прочие	0,5–1,5

Особенности вещественного состава ЭК как комплексного флюса для огневого рафинирования меди

Основными компонентами ЭК служат природные минералы, содержащие оксиды щелочных металлов (натрия и калия) и кремния: эгирин — $NaFe[Si_2O_6]$, кристаллическисвязанный с ним в определенных соотношениях нефелин — $KNa_3[AlSiO_4]_4$, гидрослюды, микроклин и лепидомелан (табл. 1). Кроме того, ЭК содержит оксиды двух- и трехвалентного железа (эгирин, ильменит, титаномагнетит), оксиды кальция (сфен) и в примесных количествах другие минералы [1]. Таким образом, состав ЭК включает широко известные и применяемые в разных процессах рафинирования меди оксиды SiO_2, CaO, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O в виде, соответственно, кварцита, известняка, железной руды, соды, поташа и других обособленных веществ. По вещественному составу ЭК можно отнести к легкоплавкому комплексному флюсу, содержащему «твердый» окислитель. *Плотность ЭК* по данным ОАО «Апатит» равна 3,25–3,6 г/см^3, что существенно ниже, чем плотность твердой (при 20 °С) и расплавленной (при 1085 °С) меди — соответственно 8,94 и 7,96 г/см^3. *Температура ликвидуса ЭК* по данным термографического анализа, выполненного на термическом анализаторе Setsys Evolution 1750 (Setaram), составляет около 1196 °С, а отдельных его более легкоплавких силикатных эвтектик натрия и калия соответственно ~ 800 и ~765 °С [5].

Особенность состава ЭК как флюса для окислительного рафинирования меди от примесей — это содержание в нем в относительно легкоплавкой минеральной форме оксидов трехвалентного железа (см. табл. 1). Последнее, как известно, способно эффективно окислять большинство примесей цветных металлов медных расплавов в силу большего сродства примесных металлов к кислороду по сравнению с медью и, соответственно, рафинировать медные расплавы от таких примесей, как Zn, Fe, Co, Ni, Pb, Sn, Sb, As и др. Окисление примесей медных сплавов с помощью «твердого» окислителя Fe_2O_3, содержащегося в ЭК, схематично описывается системой реакций на границе раздела [металл] — (шлак):

$$\begin{gathered} Fe_2O_3 + 2[Cu] = [Cu_2O] + 2(FeO); \\ [Cu_2O] + [\,Me\,] = 2[Cu\,] + (MeO) \\ \hline Fe_2O_3 + [Me\,] = 2(FeO) + (MeO) \end{gathered} \qquad (1)$$

Параллельно возможно окисление меди и примесных металлов кислородом воздуха по традиционной схеме в объеме медного расплава:

$$4[Cu] + O_2 = 2[Cu_2O];$$
$$\frac{[Cu_2O] + [Me] = 2[Cu] + [MeO]}{[Me] + O_2 = [MeO]} \qquad (2)$$

Важным элементом схемы реакций (2), в отличие от (1), является массоперенос окисленной примеси к поверхности расплава для ошлакования.

Другая особенность применения ЭК в рафинировочных процессах — использование в них оксидов натрия и калия, содержащихся в ЭК, которые, как известно, снижают температуру плавления, плотность и вязкость образующихся при рафинировании меди рафинировочных шлаков и увеличивают растворимость в шлаках оксидов ряда трудноудаляемых металлов, таких, как Pb, Sn, Sb, As и др. [4].

Следующей особенностью рафинирования медных расплавов с помощью ЭК служит совмещение процессов окисления примесей медной ванны и их растворения в расплаве ЭК в соответствии со схемой реакций (1). Эффективный отвод продуктов реакции окисления из зоны реакции в соответствии с термодинамическими основами способствует большей глубине и массовой скорости окислительного рафинирования медных сплавов [4].

Экспериментальные исследования рафинирования медных сплавов с использованием ЭК в качестве окислителя и флюса

Исследования рафинирования медных сплавов с помощью ЭК проведены в лабораторных условиях в два этапа:

на первом этапе определялась степень рафинирования модельных сплавов на основе меди Cu-Fe, Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Pb, Cu-Sb, Cu-Ni от соответствующих примесных металлов — Fe, Zn, Sn, Pb, Sb и Ni;

на втором этапе исследовалось рафинирование промышленного медного сплава марки М4.

В созданных условиях изучалось влияние массы загружаемого в плавку ЭК на степень очищения медных сплавов от каждого примесного металла.

Исследования рафинирования двойных медных сплавов

Для исследования использовались лигатуры двойных медных сплавов Cu-Fe, Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Pb, Cu-Sb, Cu-Ni с близким содержанием в них примесных металлов (Fe, Zn, Sn, Pb, Sb, Ni) — на уровне 0,5–0,6 % масс. Расплавление лигатур проводилось в алундовых тиглях, установленных в шахту электрической печи с карбидокремниевыми нагревателями. Температура в печи и в тигле измерялась с помощью стационарной и погружаемой термопары. На зеркало расплава при заданной температуре в интервале 1170–1230 °С загружался флюс на основе ЭК (в принятом для данной серии опытов количестве до 7 % от массы модельного сплава). Далее тигель выдерживался при той же температуре в течение ~15–20 минут до полного расплавления флюса и образования рафинировочного шлака. Затем токовая нагрузка печи отключалась и полученные расплавы охлаждались в печи. Определялся полный состав медного сплава до и после рафинировочной плавки, а также количество и состав рафинировочных шлаков.

В плавках использовался флюс следующего состава (% масс.): SiO_2 – 44,0; Fe_2O_3–15,5; FeO — 8,0; Na_2O — 14,9; K_2O — 0,9; CaO — 7,2; TiO_2–4,5; P_2O_5–0,5; Al_2O_3–1,5; V_2O_5–0,1; MnO — 0,8; MgO — 2,0.

Степень рафинирования сплава меди от примесного элемента рассчитывалась по формуле

$$СР = \frac{(C_1 - C_2)}{C_1 \cdot 100}, \qquad (1)$$

где СР — степень рафинирования сплава от примеси, % отн.; C_1 и C_2 — содержание компонента (примеси цветного металла) в исходном сплаве соответственно до и после рафинирования, % масс.

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 2, флюс на основе ЭК позволяет эффективно удалять примеси цветных металлов из меди, содержащей 0,5–0,6 % масс. Fe, Zn, Sn, Pb, Sb, Ni. Продолжительность процесса составила 15–20 минут.

Исследования рафинирования промышленного медного сплава

Проведены рафинирование сплава меди марки М4 (с содержанием меди ~99,7 %) и флюса

Таблица 1

Степени рафинирования двойных медных сплавов при использовании ЭК

Модельные сплавы	Компонент примеси сплава	Содержание примеси в исходных модельных сплавах, % масс.	Содержание примеси в модельном сплаве после рафинирования, % масс.	Степень рафинирования, %
Cu-Zn	Zn	0,5	0,004–0,003	99,2–99,4
Cu-Sn	Sn	0,5	0,008–0,006	98,4–98,8
Cu-Fe	Fe	0,6	0,006–0,003	99,0–99,5
Cu-Sb	Sb	0,5	0,006–0,004	98,8–99,2
Cu-Pb	Pb	0,5	0,012–0,015	97,6–97,0
Cu-Ni	Ni	0,5	0,045–0,055	89,0–91,0

Таблица 2

Составы рафинированных медных сплавов марки М4

Компонент сплава	Состав сплава, %					
	Исходный	После рафинирования при загрузке флюса с разной процентной массовой долей меди				
		2 %	3 %	4 %	5 %	7 %
		Составы сплавов после рафинирования				
Bi	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Se	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Te	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	–
Ni	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006
Zn	0,070	0,008	0,002	0,001	<0,001	<0,001
Si	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sn	0,024	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001
Fe	0,170	0,021	0,007	0,006	0,006	0,006
P	0,008	0,003	0,002	0,002	0,002	–
Cr	0,002	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mn	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
As	0,001	0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001
Cd	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Sb	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	<0,001
Pb	0,020	0,005	0,003	0,002	0,001	<0,001
Ag	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cu	99,687	99,954	99,975	99,981	99,981	99,987

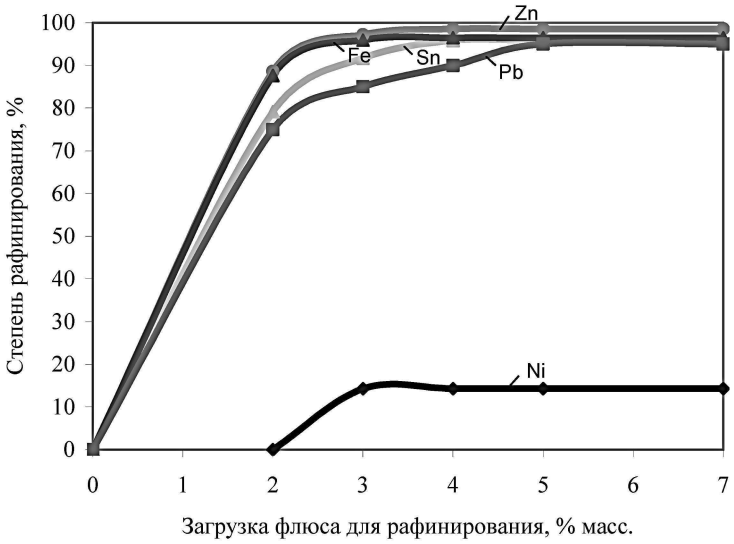


Рис. 1. Изменение степени очищения (рафинирования) медного сплава марки М4 от примесей Fe, Sn, Zn, Pb и Ni при увеличении загрузки флюса (степень рафинирования рассчитывалась по формуле (1))

на основе ЭК в количествах 2, 3, 4, 5 и 7 % от массы исследуемого сплава. Состав используемого в плавках флюса и методика экспериментального исследования аналогичны описанным выше.

Результаты химического анализа полученных образцов рафинированного медного сплава приведены в табл. 2.

На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости, отражающие изменение степени рафинирования медного сплава при увеличении загрузки флюса на основе ЭК (см. рисунок).

В результате рафинирования меди металлической марки М4 установлено:

возможность удаления примесей Fe, Sn, Zn, Pb и Ni до уровня, отвечающего содержанию примесей в меди металлической марки М1;

загрузка флюса в количестве до 5 % от массы рафинируемого сплава приводит к увеличению степени очищения медного сплава от примесей Fe, Sn, Zn и Pb до 95–98 %. Дальнейшее увеличение содержания флюса практически не влияет на степень рафинирования;

при наличии примесей других металлов степень очищения медного сплава от примеси Ni ниже, чем в опытах со сплавами двухкомпонентной системы Cu–Ni;

продолжительность процесса рафинирования составила 15–20 минут.

Выполнено лабораторное исследование по определению рафинирующей способности ЭК — техногенного отхода ОАО «Апатит» — при его использовании в качестве комплексного флюса и «твердого» окислителя в процессе огневого рафинирования вторичной меди.

Установлена возможность эффективного рафинирования сплавов систем Cu-Fe, Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Pb, Cu-Sb, Cu-Ni, содержащих трудноудаляемые примеси Ni, Zn, Sn, Fe, Sb и Pb. Степень очищения от Ni, Zn, Sn, Fe, Sb и Pb соответственно составила: 91,0; 99,4; 98,8; 99,5; 99,2 и 97,6 % отн.

Установлена возможность эффективного рафинирования меди металлической марки М4 с получением меди марки М1.

Скорость процесса рафинирования по новой технологии более чем в два раза превосходит массовую скорость существующего процесса огневого рафинирования, в результате продолжительность нового процесса составляет 15–20 минут.

На способ огневого рафинирования меди с использованием ЭК получен патент РФ [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов, В.И.** Металлургия меди, никеля и кобальта [Текст] / В.И. Смирнов, А.А. Цейдлер, И.Ф. Худяков, А.И. Тихонов.— М.: Металлургия, 1964.

2. **Федоров, С.Г.** Химическая переработка минеральных концентратов Кольского полуострова [Текст] / С.Г. Федоров, А.И. Николаев, Ю.Е. Брыляков [и др.].— Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003.— С. 22–26.

3. **Купряков, Ю.П.** Производство тяжелых цветных металлов из лома и отходов [Текст] / Ю.П. Куряков.— Харьков: Основа, 1992.

4. **Ванюков, А.В.** Теория пирометаллургических процессов [Текст] / А.В. Ванюков, В.Я. Зайцев.— М.: Металлургия, 1973.

5. **Патент № 2391420. Российская Федерация, МПК[7].** Способ огневого рафинирования меди [Текст] / Попов И.О., Устинов С.М., Бутырский Б.Н., Макаров А.М.— № 2009124157. Заявлено 24.06. 2009.

6. **Попов, И.О.** Научные и практические основы применения эгиринового концентрата-техногенного отхода ОАО «Апатит» в качестве комплексного флюса в пирометаллургии меди [Текст] / И.О. Попов, Ю.А. Митрофанов // Научно-технические ведомости СПбГПУ— 2012. № 1.— С. 163–172.

УДК 621.92

Н.В. Никитков, Н.Ю. Ковеленов, Д.Н. Шабалин

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время не существует методик обоснованного расчета и назначения режимов резания при алмазном шлифовании твердых хрупких материалов типа керамики, твердых сплавов, композитов и т. п. Общеизвестна кинематическая модель режущей способности круга формы 1А1, описываемая формулой

$$Q = tV_{об}V_з, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где t, мм, — глубина резания; $V_{об} = V_{пр}/n_з$, мм/об, — продольная подача стола за 1 оборот заготовки; $V_р = \pi d_з n_з$, мм/мин, — окружная скорость заготовки.

Формула для Q справедлива, если зерна круга при назначенных параметрах режима t, $V_{1об}$, $V_з$ успевают снять объемный припуск с заготовки. В противном случае в процессе резания возникают прижоги или сколы на поверхности заготовки, вибрации, засаливание круга.

Назначение наилучших режимов шлифования — неочевидная и сложная задача, зависящая от свойств материала заготовки, характеристик круга, оборудования и квалификации рабочего.

Управление процессом алмазного шлифования возможно при изучении взаимодействия зерен круга с поверхностью заготовки. Ниже приведены сведения о разрушении зернами кругов материала заготовки и параметрах режущей поверхности (см. таблицу) алмазных кругов при шлифовании заготовок из хрупких твердых материалов.

В качестве примера рассмотрен алмазный круг формы 1А1 с размерами: диаметр × высота — 300×10 мм. Площадь $S_{кр}$ режущей поверхности круга равна

$$S_{кр} = \pi duh = \varpi 300 \cdot 10/100 = 94{,}25 \text{ см}^2. \quad (2)$$

Ниже приведены зависимости для расчета параметров и режущей способности алмазного круга, которые являются математической моделью расчета режимов шлифования материала заготовок алмазными кругами.

В строках 4–7 таблицы жирным шрифтом выделены глубины внедрения алмазных зерен кругов разной зернистости в хрупкий материал заготовок с микротвердостью $HV = 15$ ГПа, обеспечивающие хрупкое разрушение поверхности заготовок (соответствует черновому и получистовому шлифованию). При внедрении зерен кругов на глубину 0,5–1 мкм обеспечивается пластичное и квазихрупкое разрушение материала заготовок, что желательно производить при чистовом шлифовании.

Характеристика режущей поверхности кругов разной зернистости

Обозначение плотности в слое	Плотность зерен, шт/см², в разныъ слоях (0–*t*, мкм) кругов для шести вариантов (от 165/125 до 50/40) зернистости											
	160/125		125/100		100/80		80/63		63/50		50/40	
N(0–t)	Слой	Плотность	Слой	Плотность	Слой	Плотность	Слой	Плотность	Слой	Плотность	Слой	Плотность
N(0–1)	0–1	2,615	0–1	3,094	0–0,5	1,851	0–0,5	2,123	0–0,4	1,991	0–0,3	1,782
N(0–2)	0–2	5,108	0–2	6,006	0–1	3,634	0–1	4,148	0–0,8	3,888	0–0,6	3,486
N(0–3)	0–3	7,482	0–3	8,747	0–1,5	5,35	0–1,5	6,077	0–1,2	5,695	0–0,9	5,114
N(0–4)	**0–4**	**9,2**	**0–3,5**	**10,03**	0–2	7,003	0–2	7,915	0–1,6	7,416	0–1,2	6,669
N(0–5)	0–5	11,9	0–5	13,75	0–2,5	8,593	**0–2,5**	**10**	0–2	9,055	0–1,5	8,154
N(0–6)	0–6	13,94	0–6	16,02	**0–3**	**10,12**	0–3	11,33	**0–2,4**	**10,61**	0–1,8	9,572
N(0–7)	0–7	15,89	0–7	18,16	0–3,5	11,6	0–3,5	12,92	0–2,8	12,1	**0–2,1**	**10,93**
N(0–8)	0–8	17,74	0–8	20,16	0–4	13,01	0–4	14,43	0–3,2	13,51	0–2,4	12,22
N(0–9)	0–9	19,5	–	–	0–4,5	14,37	0–4,5	15,86	0–3,6	14,85	0–2,7	13,45
N(0–10)	0–10	21,17	–	–	0–5	15,68	0–5	17,22	0–4	16,12	0–3	14,62–
N(0–11)	–	–	–	–	0–5,5	16,94	–	–	0–4,4	16,9	0–4	15,90
N(0–12)	–	–	–	–	0–6	18,15	–	–	0–5	18,0	0–5	18,8

В в строках 1–12 таблицы приведены данные о плотности, шт/см^2, вершин алмазных зерен кругов разной зернистости в слоях по глубине от 0 до 10 мкм. Можно вычислить приращение плотности зерен в глубину профиля с дискретой 1 мкм.

Ширина b борозды при хрупком разрушении материала заготовки зернами кругов зернистостью 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40 вычислена по эмпирической формуле

$$b = K_в 2\left(t\left(2r_з - t\right)\right)^{0,5} \qquad (3)$$

и соответственно равна 0,159; 0,120; 0,085; 0,06; 0,045; 0,034 мм, а эмпирический коэффициент расширения борозд $K_в$ — 7,6; 6,9; 6,0; 5,4; 4,64; 4,07. Вычисление произведено в пакете MatCad по алгоритму, изложенному в работе [3], при заданной глубине t внедрения в материал заготовки зерен кругов (4; 3,5; 3,0; 2,5; 2,4; 2,1), вершины которых расположены в слое (0–0,1) мкм режущей поверхности кругов. Эмпирические значения средних радиусов вершин зерен были заданы равными соответственно 15,6; 12,5; 9,8; 7,5; 6,1; 5,2 для указанных выше зернистостей.

Задаваемая величина t наибольшей глубины внедрения зерен в материал поверхности заготовки отличается от фактической глубины (фактическая глубина рисок равна $t_m = k_t t$). Коэффициент k_t углубления борозд — величина, получаемая экспериментально для разных зернистостей круга, и изменяется от 1,6 до 1,1.

Общее число зерен у круга в самом верхнем слое (0–1 мкм) равно

$$N_{кр}(0-1) = N(0-1)S_{кр},\ \text{шт/круг.} \qquad (4)$$

Установлено: для алмазных зерен кругов зернистостью 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40 (шесть зернистостей) математическое ожидание числа режущих вершин зерен в верхнем слое (0–1 мкм) на всей поверхности круга $N_{кр}(0–1)$ соответственно равно 2,615; 3,094; 3,634; 4,148; 5,092; 5,632; $S_{кр}$ — 246,6; 291,4; 342,5; 390,9; 479,9; 530,8 шт.

В таблице приведена плотность $N(0–t)$, шт/см^2, зерен у круга в слое $(0–t)$, вычисляемая по формулам, приведенным в [3], а полное число $N_{кр}$, шт, зерен на всей поверхности круга в слое $(0–t)$ равно

$$N_{кр} = N(0-t)S_{кр},\ \text{шт.}, \qquad (5)$$

где $S_{кр}$ — площадь режущей поверхности алмазного круга; $N(0–t)$ — берется из таблицы. Полное число $N_{кр}$, шт., зерен на всей поверхности круга зависит от площади режущей поверхности круга, концентрации алмазов в кругах, величины износа вершин зерен. Увеличение числа вершин зерен на поверхности круга за счет износа вершин зерен приводит к росту силы резания по причине притупленных зерен.

С целью выявления запаса режущей способности алмазных кругов предложен метод воображаемого деления высоты круга на элементарные диски (ЭД). Число ЭД в высоте круга равно

$$N_{ЭД} = h/в\ \text{, шт.}, \qquad (6)$$

где h — высота алмазного круга (в нашем примере $h = 10$ мм), $в$ — ширина борозды (формула (3)). Каждый ЭД, толщина которого равна ширине борозды от среднеарифметического зерна, должен образовывать одну борозду. ЭД потенциально может образовать больше одной борозды, если на нем находятся несколько зерен в слое (0–1), что является запасом его режущей способности. Если ЭД образует менее одной борозды, то требуется более одного диска для прорезки одной борозды.

Число зерен на одном ЭД у круга в слое (0–1) (см. табл.) равно

$$n_{1ЭД}(0-1) = N_{кр}(0-1)S_{кр}/N_{ЭД}, \qquad (7)$$

а в слое $(0–t)$

$$n_{1ЭД}(0-t) = N(0-t)S_{кр}/N_{ЭД}\ \text{, шт.} \qquad (8)$$

В таблице для шести зернистостей кругов — 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40 — вычислены значения $n_{1\ эд}(0–1)$: соответственно 3,91; 3,50; 1,49; 1,13; 0,85; 0,57 шт., т. е. фактически каждая борозда формируется не одним зерном, а их числом 3,91; 3,5; 1,49; 1,13. Следовательно, ЭД формирует расширенную борозду или несколько сдвинутых из-за вращения заготовки друг относительно друга борозд. У мелкозернистых кругов (63/50, 50/40) число зерен на одном ЭД меньше единицы — 0,85; 0,57 шт. Следовательно, борозда формируется двумя ЭД. Общее число зерен у круга в слое (0–1) равно для шести зернистостей соответственно 246,5; 291,6; 342,5; 390,9; 451,5; 535,3 шт. В слое $(0–t)$ — соответственно 867,1; 945,3; 953,81; 965; 999,9; 1030.

По мере износа вершин самых высоких зерен над связкой (слой (0–1)) число формирующих борозды зерен увеличивается, а число зачищающих зерен на эту же величину уменьшается.

Вершины зерен, лежащие в режущем профиле алмазного круга в глубине от наружной поверхности от 1 до t мкм, выполняют роль зачищающих зерен. Они удаляют оставшиеся микровыступы между бороздами от действия самых высоких зерен в режущем профиле круга.

Число зачищающих зерен у кругов различной зернистости в режущем слое глубиной от 1 до t мкм на поверхности каждого элементарного диска круга равно

$$n_{1\text{ЭД}}(1-t) = N_{\text{кр}}(1-t)S_{\text{кр}}/N_{\text{ЭД}}. \qquad (9)$$

Суммарная ширина самых глубоких борозд от вершин зерен круга в слое (0–1) за 1 оборот заготовки и $n_{\text{и}}/n_{\text{з}}$ оборотов алмазного круга равна

$$V_{\text{об}} = \text{в}N_{\text{кр}}(0-1)(n_{\text{и}}/n_{\text{з}})/N_{\text{б}}, \text{ мм/об.заг.}$$
$$\text{при } n_{\text{з}} = 1, \qquad (10)$$

где $N = 360/a$ — число борозд на одной окружности цилиндрической заготовки;

$$a = 2\arccos(1-t/r_{\text{д}})$$

— центральный угол одной борозды, $L_{\text{б}} = \varpi da/360$ — длина дуги одной борозды от зерен круга на поверхности заготовки.

Геометрически $V_{\text{об}}$ — это длина цилиндра на заготовке, вся поверхность которого покрыта бороздами от вершин зерен круга в слое (0–1) за один ее оборот. При этом алмазный круг совершает $n_{\text{и}}/n_{\text{з}}$ оборотов. Произведение $tV_{\text{об}}$, мм^2, есть теоретическая площадь среза материала с заготовки за один ее оборот зернами, лежащими в слое (0–1) круга. Произведение $n_{\text{з}}V_{\text{об}} = V_{\text{пр}}$ есть продольная подача стола станка, мм/мин.

Суммарная ширина $V_{\text{пр max}}$ борозд от вершин зерен круга в слое (0–1) при глубине резания t за число $n_{\text{и}}$, об/мин, круга, например $n_{\text{и}} = 3000$ при невращающейся заготовке ($n_{\text{з}} = 0$ об/мин). Величина $V_{\text{пр max}}$, мм/мин, равна воображаемой максимально возможной подаче стола станка при глубине резания t, мкм, и $n_{\text{з}} = 0$. Геометрически это длина линейки шириной, равной ширине одной борозды. При этих условиях борозды от зерен касаются друг друга и расположены в одну линию на образующей цилиндра, длина которой вычисляется по формуле

$$V_{\text{пр max}} = \text{в}N_{\text{кр}}(0-1)n_{\text{и}}, \text{ м/мин}$$
$$(n_{\text{и}} = 3000 \text{ об/мин}, n_{\text{з}} = 0). \qquad (11)$$

Ниже для шести зернистостей кругов приведены расчетные данные величины $V_{\text{пр max}}$, м/мин: 117,2; 105,0; 44,73; 33,9; 25,38; 17,07. Ниже для тех же шести зернистостей приведены расчетные значения величины $N_{\text{б}}$: 246,5; 291,6; 342,5; 390,9; 451,5; 535,3, шт.

Формула (12) — это суммарная ширина борозд от вершин зерен круга в слое (0–1) при глубине резания t за $n_{\text{и}} = 3000$ и $n_{\text{з}} = 100$ об/мин, равная максимально возможной подаче $V_{\text{пр max}}$, м/мин, стола:

$$V_{\text{пр max}} = \text{в}N_{\text{кр}}(0-1)n_{\text{и}}/N_{\text{б}}, \text{ м/мин}. \qquad (12)$$

Геометрически — это воображаемая наибольшая длина, м/мин, цилиндра на заготовке, заполненная касающимися друг друга бороздами от зерен. По формуле (12) вычислена величина $V_{\text{пр max}}$ наибольшей продольной подачи стола станка при условии, что борозды от зерен будут касаться друг друга, но не накладываться: 0,475; 2,777; 0,13; 0,0887; 0,056; 0,032, м/мин. Практически же борозды могут не только касаться друг друга, но и накладываться или пересекаться.

Формула для вычисления фактической суммарной ширины $V_{\text{пр ф}}$ борозд от вершин зерен круга в слое (0–1) при заданных значениях $n_{\text{и}}$ и $n_{\text{з}}$, об/мин, и глубине $t_{\text{ф}}$, мкм, резания:

$$V_{\text{пр ф}} = V_{\text{пр max}}t/t_{\text{ф}}, \text{ м/мин}. \qquad (13)$$

Чем больше фактическая глубина резания зерен, вершины которых находятся в слое (0–1), тем меньше должна быть величина $V_{\text{пр ф}}$.

Формула режущей способности кругов — $Q_{\max} = tV_{\text{об}}V_{\text{з}}$, преобразованная после подстановки величин, такова:

$$Q_{\max} = tbN_{\text{кр}}(0-1)n_{\text{и}}\pi d_{\text{з}}/N_{\text{б}}, \text{ см}^3\text{/мин}. \qquad (14)$$

Формула (14) справедлива для кругов зернистости 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40. Для первых трех зернистостей кругов вычислены значения $Q_{\max}$: 0,595; 0,3958;0,24 см^3/мин.

Алгоритм компьютерного вычисления всех технологических параметров процесса алмазного шлифования легко строится по формулам (1)–(14). Для всех шести зернистостей используемых алмазных кругов при черновом шлифовании технологические параметры вычислены в *Ecxel* и приведены в тексте статьи. Аналогично для получистовых и чистовых процессов шли-

фования любыми алмазными кругами могут быть получены значения технологических параметров при задании соответствующих переменных в формулах (1)–(3).

На основе анализа [1–4] процесса шлифования и вычислений плотности $N(0–t)$, шт/см^2, зерен в алмазных кругах, среднего радиуса $r_з$ при вершине у зерен кругов различной зернистости, полученных результатов исследований по разрушению поверхности заготовок зернами (параметры $в$ и $K_в$) стало возможным прогнозировать параметры процесса алмазного шлифования хрупких твердых материалов заготовок (формулы (4)–(14)).

Использован прием воображаемого деления высоты алмазного круга на элементарные диски ($N_{ЭД} = h/в$, шт). Ширина у каждого диска равна ширине $в$, мм, борозды, сформированной зернами круга, вершины которых лежат в самом верхнем слое (0–1 мкм) и оставляют самые глубокие риски на шлифуемой поверхности заготовки.

Получена формула для вычисления числа $n_{1\,ЭД}(0–1)$ зерен в слое (0–1) мкм на одном элементарном диске, позволяющая определять суммарную ширину борозд круга от вершин зерен в слое (0–1) за 1 оборот или любое число оборотов круга. Поскольку на каждом элементарном диске круга для первых трех зернистостей число зерен в слое (0 –1) равно от 3,91 до 1,49, то практически весь припуск снимается вершинами этих зерен.

Стало возможным вычислять максимальную продольную подачу стола станка при глубине резания t, мкм, по формуле

$$V_{пр\,max} = вN_{кр}(0-1)n_и / N_б \text{ , м/мин.}$$

Установлена зависимость для вычисления режущей способности круга:

$$Q_{max} = tV_{об}V_з = tbN_{кр}(0-1)n_и \pi d_з / N_б \text{ , см}^3\text{/мин.}$$

Формулы (1)–(14) позволяют управлять процессом шлифования алмазными кругами при черновых и чистовых процессах. В строках таблицы приведены параметры режущей поверхности кругов — плотность зерен $N(0–t)$ в уровнях $(0–t)$ режущей поверхности кругов.

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. **Никитков, Н.В.** Математическое моделирование процессов алмазной абразивной обработки хрупких керамических материалов [Текст] / Н.В. Никитков // В сб.: Математическое моделирование в машиностроении. Труды СПбГПУ.— № 466.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1997.— 40 с.

УДК 669.1

О.Ю. Ганзуленко, Н.Б. Кириллов, А.П. Петкова, М.В. Яковицкая

ПОВЫШЕНИЕ ВОДОРОДОСТОЙКОСТИ АУСТЕНИТНЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В работе [1] выполнен анализ концентрационных и температурных зависимостей проницаемости аустенитных сталей и сплавов в температурном интервале 300–700 °С при атмосферном давлении водорода. Выявлены основные закономерности легирования аустенитных сталей

и сплавов, обеспечивающие снижение в них диффузионной подвижности водорода и их водородопроницаемости при повышенных температурах: обеспечение содержания хрома в количестве 18–20 %; увеличение количества никеля; введение в твердый раствор упрочняющих добавок молибдена, титана, ниобия и других элементов; увеличение количества алюминия до 0,5 %; ограничение суммарного содержания примесей серы и фосфора; микролегирование иттрием, кальцием и азотом. С учетом установленных закономерностей разработана аустенитная коррозионностойкая сталь с низкой водородопроницаемостью, рекомендованная для оболочек чехлования гидридных изделий и тепловыделяющих элементов ряда перспективных стационарных и транспортных атомных энергетических установок (АЭУ) на стадии эскизного и технического проектирования*.

Перспективным способом дальнейшего повышения водородостойкости элементов внутриреакторных устройств из разработанной аустенитной стали служит создание на ее поверхности защитных оксидных покрытий. Поэтому целью настоящей работы было создание и исследование состава, структуры и водородопроницаемости защитных оксидных покрытий на поверхности разработанной аустенитной стали и аналогов в процессе высокотемпературного окисления в различных газовых средах.

Химический состав предлагаемой стали и материалов, выбранных для сравнительного исследования, приведен в табл. 1. В качестве образцов для исследования использовались плоские мембраны диаметром 30×0,08 мм. Для определения наиболее рациональных режимов окисления выбранных материалов обработка образцов производилась на лабораторном оборудовании в интервале температур 650–900 °С в различных газовых средах: в атмосфере паров воды, углекислого газа и воздуха.

В соответствии с полученными зависимостями, приведенными на рис. 1 и 2, привес оксидной пленки на исследованных материалах возрастает с повышением температуры по экспоненциальному закону. Наименее устойчивы против окисления составы с наименьшим количеством хрома и алюминия или не содержащие алюминия. Образующаяся в этом случае оксидная пленка имеет неоднородное пористое строение. С увеличением содержания в сплаве хрома и алюминия толщина оксидной пленки уменьшается. Наличие в стали иттрия оказывает наибольшее влияние на повышение сопротивления окислению, способствуя образованию плотных оксидных пленок с мелкозернистой структурой, обладающих лучшими защитными свойствами.

Оценка энергии активации процесса окисления, отражающей наименьшую энергию, которой должен обладать материал для образования защитной окисной пленки, показала: с увеличением содержания хрома и введением добавок алюминия, иттрия, титана и других элементов эта характеристика существенно уменьшается, что свидетельствует о значительном повышении жаростойкости стали [2].

Анализ выбранных режимов окисления исследованных материалов в различных газовых средах (в атмосфере паров воды, углекислого газа и воздуха) выявил наиболее интенсивное их окисление в атмосфере паров воды в температурном интервале 650–750 °С длительностью 20 часов (рис. 1 и 2). Наибольшим сопротивлением окислению в указанном температурном интервале обладает разработанная сталь, содержащая 19 % хрома, 0,3 % алюминия, 14 % никеля и 0,1 % иттрия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что иттрий и алюминий более эффективно повышают жаростойкость аустенитных хромоникелевых сталей по сравнению с хромом. С увеличением длительности и температуры обработки увеличивается привес образцов и толщина оксидной пленки, что обеспечивает снижение водородопроницаемости во времени. Увеличение с 50 часов до 100 часов длительности предварительного окисления поверхности сталей типа 18–8 в водяном паре в интервале температур 600–700 °С снижает проницаемость обработанных сталей примерно на порядок (рис. 3).

Формирование оксидных пленок с высокими защитными свойствами способствует снижению равновесной концентрации водорода в кристаллической решетке металла, существенно уменьшает энтропийный член P_0 в экспоненциальной зависимости водородопроницаемости

* Исследования проводятся по результатам поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 — 2013 годы.

Таблица 1

Химический состав предлагаемой стали и материалов, используемых для сравнительного анализа

Марка стали	Содержание элементов, масс. %																	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Nb	Mo	Al	Y	Ca	N	S	P	Al+Si	C+N	S+P	Fe
02Х19Н14ТЧ–ВИ	0,015	0,5	0,5	19,0	14,0	0,3	–	–	0,3	0,1	0,005	0,01	0,015	0,005	0,8	0,025	0,02	ост.
10Х18Н10Т	0,010	0,8	1,5	17,5	9,7	0,8	–	–	0,02	–	–	0,02	0,020	0,030	–	–	–	ост.
06Х18Н10Т	0,062	0,7	1,6	18,0	9,8	0,6	–	–	0,05	–	–	0,02	0,020	0,030	–	–	–	ост.
03Х20Н35М4Б	0,020	0,3	0,5	21,9	34,6	–	0,8	3,6	0,20	0,05	–	–	0,008	0,007	–	–	–	ост.
03Х20Н45М4Б	0,020	0,4	0,6	20,0	44,0	–	1,03	3,8	0,20	0,08	–	0,02	0,011	0,010	–	–	–	ост.

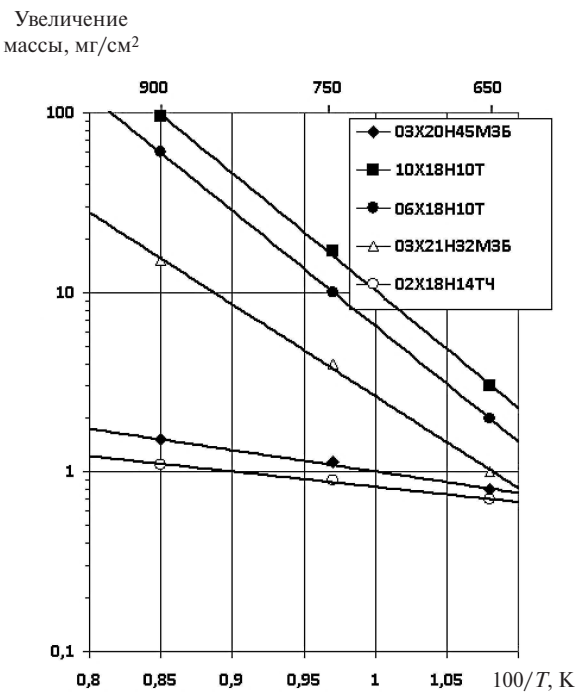


Рис.1. Температурные зависимости привеса образцов при окислении исследуемых сталей в углекислом газе за 20 час

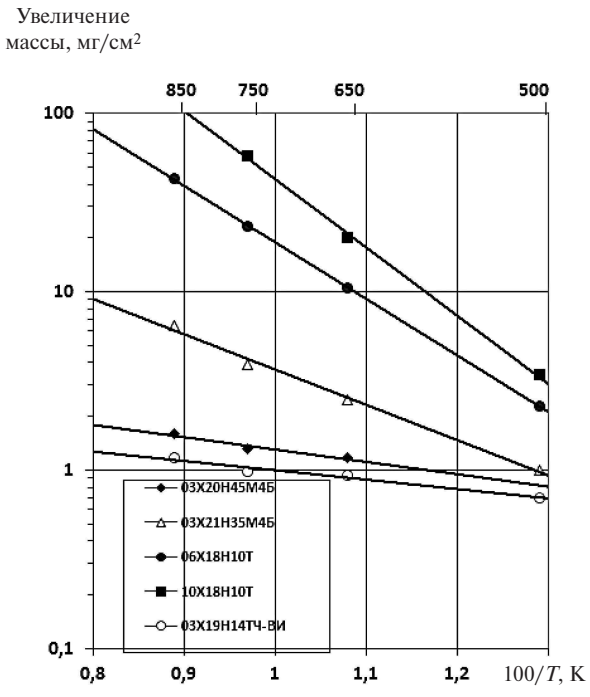


Рис. 2. Температурные зависимости привеса образцов при окислении исследуемых сталей в водяном паре за 20 час

$P = P_0\exp(-E/RT)$ и не изменяет энергию активации процесса E в исследованных сталях (в соответствии с табл. 2). Это свидетельствует об экранирующем механизме влияния окисной пленки на диффузионную проницаемость стали. Формируемые тонкие и плотные многофазные оксидные пленки состоят из ромбоэдрических фаз типа Me_2O_3 и шпинелей многокомпонентного состава. Снижение проницаемости водорода сквозь оксидную пленку связано с уменьшением числа активных центров диффузии, наличие которых зависит от количества и плотности структурных дефектов кристаллического строения оксидов. Концентрация структурных дефектов оксидов значительно снижается, если вводимые легирующие элементы имеют иную валентность, чем основной металл.

В связи с перспективностью применения аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей и сплавов в водо-водяных реакторных установках исследовались кинетические зависимости проницаемости водорода из газовой фазы при одновременном воздействии водяного пара как окислительной среды на поверхность выхода водорода применяемой стали типа Х18Н10Т и разработанной стали. Установлено, что при длительной эксплуатации в условиях одностороннего контакта оболочки с перегретым паром поток диффундирующего водорода сквозь металл с течением времени существенно снижается и уже примерно после 50-часовой выдержки при 600 °С уменьшается на 1,0–1,5 порядка. Что свидетельствует о высокой стабильности защитных свойств образующейся оксидной пленки. Дальнейшее увеличение продолжительности выдержки не приводит к заметному снижению водородопроницаемости. После 50-часовой выдержки при 700 °С в условиях воздействия на металл перегретого пара и контакта металла с потоком водорода вододородопроницаемость стали 06Х18Н10Т без иттрия снижается примерно на 2 порядка, а предлагаемой стали 02Х19Н14ТЧ-ВИ, содержащей 0,1 % иттрия, — на 3 порядка.

На основании проведенных исследований предложен способ химико-термической обработки аустенитных хромоникелевых сталей, включающий в себя многократное окисление образца в водяном перегретом паре при температурах 600–700 °С с чередующимся восстановлением в среде водорода под давлением 0,1–

0,15 МПа продолжительностью не менее 50 часов. В результате такой обработки на поверхности металла образуется многослойная высокозащитная термодинамически стабильная оксидная пленка, состоящая из ромбоэдрических фаз типа Me_2O_3 и шпинелей многокомпонентного состава $FeCr_2O_4$ и $FeAl_2O_4$ с более плотной упаковкой атомов в кристаллической решетке, препятствующая процессу адсорбции атомов водорода.

Формируемые оксидные пленки имеют сложное многослойное строение; соотношение толщин слоев, а также общая их толщина может значительно изменяться (от 5 до нескольких десятков мкм) в зависимости от содержания легирующих элементов и параметров химико-термической обработки в окислительной среде (рис.4). С повышением в стали содержания хрома, а также ряда примесных элементов (алюминий, кремний и др.) в сочетании с микродобавками РЗМ увеличивается шпинельная составляющая в оксидном слое, а толщина пленки существенно уменьшается. Микротвердость оксидного слоя по толщине колеблется в пределах 500–1000 единиц по Виккерсу, при этом плотность шпинельных фаз $FeCr_2O_4$ и $FeAl_2O_4$ составляет соответственно 5,08 и 4,39 г/см^3.

Микрорентгеноспектральный анализ оксидной пленки на поверхности разработанной стали выявил обеднение подоксидного слоя основного металла (на глубину до 20–30 мкм и более) именно теми легирующими элементами (хром, алюминий и РЗМ), которые при образовании многофазных шпинельных структур подвергаются наиболее избирательному окислению и обеспечивают наибольшую термодинамическую стабильность пленки.

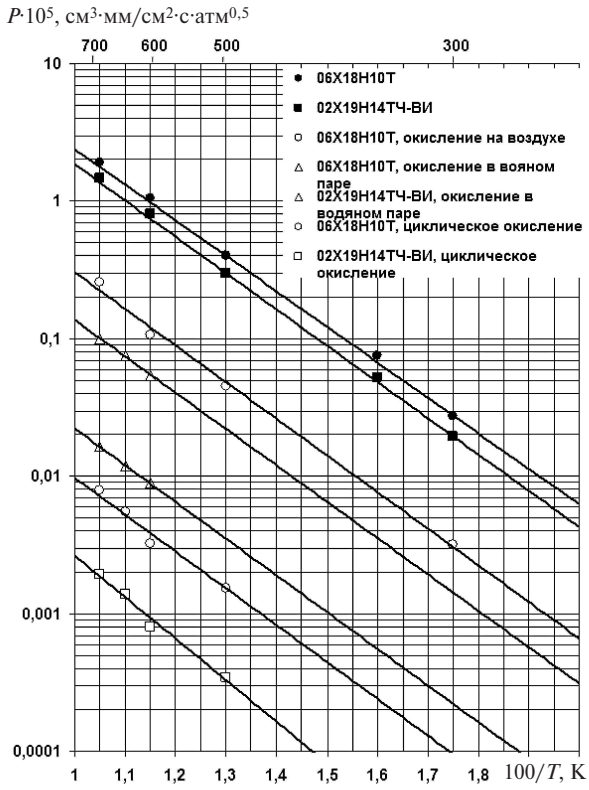


Рис. 3. Температурная зависимость водородопроницаемости сталей 06Х18Н10Т и 02Х19Н14ТЧ-ВИ в водороде технической чистоты после окисления на воздухе, в водяном паре и циклического окисления

Анализ химического и фазового составов изолированных фаз показывает, что концентрация отдельных легирующих элементов в оксидной

Таблица 2

Константы проницаемости водорода технической чистоты сквозь хромоникелевые аустенитные стали в температурном интервале 300–700°С

Марка стали	P_0, см^3·мм/см^2·с·атм^{0,5}	E, ккал/г·атом	$P_{600\,°C}$, см^3·мм/см^2·с·атм^{0,5}
02Х19Н14ТЧ–ВИ	$2{,}5\cdot10^{-5}$	15,1	$7{,}5\cdot10^{-6}$
06Х18Н10Т	$3{,}2\cdot10^{-5}$	14,5	$1\cdot10^{-5}$
06Х18Н10Т, окисление на воздухе	$3{,}6\cdot10^{-6}$	14,5	$1{,}1\cdot10^{-6}$
06Х18Н10Т, окисление в водяном паре	$1{,}9\cdot10^{-6}$	14,5	$5{,}5\cdot10^{-7}$

Окончан табл. 2

Марка стали	P_0, $см^3 \cdot мм/см^2 \cdot с \cdot атм^{0,5}$	E, ккал/г·атом	$P_{600\,°C}$, $см^3 \cdot мм/см^2 \cdot с \cdot атм^{0,5}$
02Х19Н14ТЧ–ВИ, окисление в водяном паре	$3 \cdot 10^{-6}$	15,1	$9 \cdot 10^{-8}$
06Х18Н10Т, циклическое окисление	$1 \cdot 10^{-7}$	14,5	$3 \cdot 10^{-8}$
02Х19Н14ТЧ–ВИ, циклическое окисление	$3 \cdot 10^{-8}$	15,1	$8 \cdot 10^{-9}$

пленке может в несколько раз превышать содержание их в твердом растворе. При содержании ~0,5 % алюминия в стали содержание этого элемента в оксидной пленке может возрастать до 20–30 % в пересчете на Al_2O_3, что вполне согласуется с существующими представлениями и расчетами теории жаростойкого легирования. При пересыщении шпинели оксидом Al_2O_3 выделяется свободная фаза α — Al_2O_3 с меньшим параметром решетки ($a = 7{,}9$), чем у шпинели $FeCr_2O_4$ ($a = 8{,}35$). Состав шпинели может быть выражен формулой $FeO(Fe, Cr, Al)_2O_3$. Появление в оксидной пленке зон с повышенной концентрацией алюминия и хрома значительно снижает ее диффузионную проницаемость, тем самым увеличивая стойкость металла к окислению.

Модифицирование стали иттрием оказывает наиболее эффективное влияние на сопротивление окислению исследованных материалов в широком интервале температур (рис. 1, 2). Установлено, что в оксидных пленках на исследуемых материалах с иттрием содержание хрома увеличивается, а железа — заметно снижается. Считается [2], что добавка в коррозионностойкую сталь до 1 % иттрия эквивалентна по эффекту повышения жаростойкости введению 1–3 % алюминия. В отличие от алюминия, резкой концентрации иттрия в окисной кленке не наблюдается. Содержание иттрия, образующего самостоятельный оксид Y_2O_3, в оксидной пленке не превышает 2 %. Такое соотношение легирующих элементов заметно улучшает структуру формируемой пленки, повышает ее пластичность и адгезионную прочность сцепления с металлической основой, что положительно влияет на повышение защитных свойств и работоспособности покрытия.

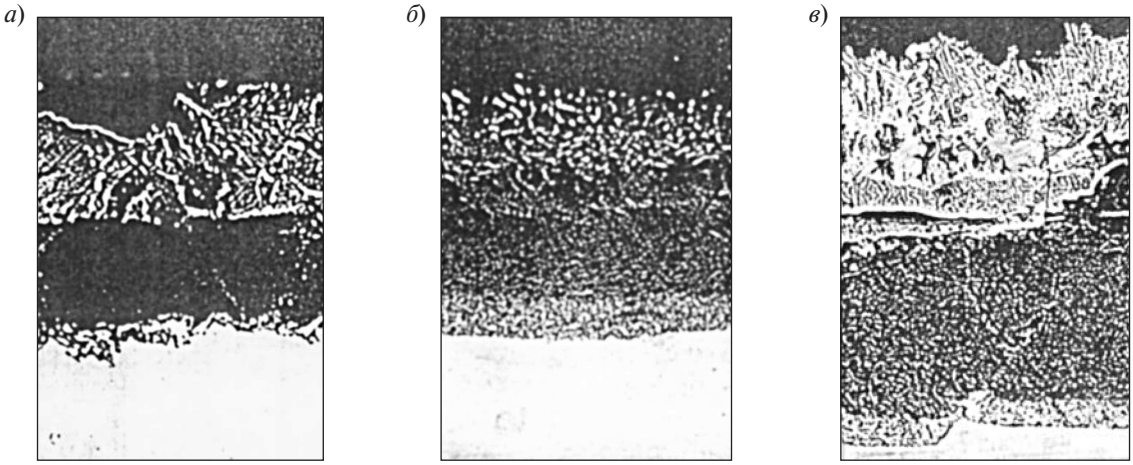


Рис. 4. Микроструктура оксидных пленок, полученных при обработке исследуемых сталей в различных газовых средах (продолжительность окисления — 20 час), ×1000:
а, *б* — сталь марки 10Х18Н10Т (750 °С; соответственно углекислый газ и водяной пар);
в — сталь марки 02Х19Н14ТЧ-ВИ (900 °С, воздух)

С увеличением содержания углерода в стали может наблюдаться обеднение подоксидного слоя хромом вследствие связывания хрома в карбиды, снижения его количества в твердом растворе и замедления его диффузии, необходимой для формирования защитного оксидного слоя. При значительном содержании углерода в стали типа Х18Н10Т (около 0,1 %) возможно взаимодействие его с кислородом. Образующиеся при этом газообразные продукты окисления — CO и CO_2 — способствуют своеобразному разрыхлению оксидной пленки. Формирующаяся в таких условиях поверхность покрытия имеет значительное количество пор, которые служат диффузионными каналами для проникновения водорода к металлу, что способствует общему повышению водородопроницаемости стали.

Введение небольших добавок сильных карбидообразующих элементов (титан и ниобий), обладающих более высокой термодинамической активностью к углероду, чем хром, способствует связыванию углерода в термически стабильные карбиды, освобождая тем самым хром и увеличивая его концентрацию в твердом растворе. Указанные элементы могут быть рекомендованы для введения в небольшом количестве (десятые доли процента) в хромоникелевые стали для повышения их жаростойкости в широком интервале температур и снижения водородопроницаемости металла.

Образующиеся под воздействием водяного пара оксидные пленки обладают мелкокристаллическим и однородным строением (рис. 5), что эффективно снижает газопроницаемость металла в процессе высокотемпературной эксплуатации и обеспечивает высокую работоспособность тонкостенных оболочек в условиях длительного термоциклирования.

Предложенный способ химико-термической обработки обеспечивает эффективное снижение коэффициента диффузии и водородопроницаемости обрабатываемой стали в соответствии с рис. 3 и данными табл. 2. В разработанной стали и стали типа 18–8 после обработки по указанному режиму энтропийный член P_0 в экспоненциальной зависимости водородопроницаемости $P = P_0\exp(-E/RT)$ снижается соответственно на 2 и 3 порядка при неизменной энергии активации процесса E (см. данные табл. 2 и рис. 3).

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность снижения на три порядка по сравнению с исходным состоянием водородопроницаемости разработанной аустенитной стали после химико-термической обработки по предложенному режиму. Эффективность снижения водородопроницаемости после химико-термической обработки существенно зависит от химического и фазового состава основного металла и для сталей типа 18–8, не содержащих добавок алюминия и иттрия, может быть на порядок ниже.

Научная значимость настоящего исследования состоит в выявлении закономерностей и структурно-физических механизмов повышения водородостойкости аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей путем рационального выбора их химического состава и химико-термической обработки поверхности с целью увеличения стойкости к длительному

а) *б*)

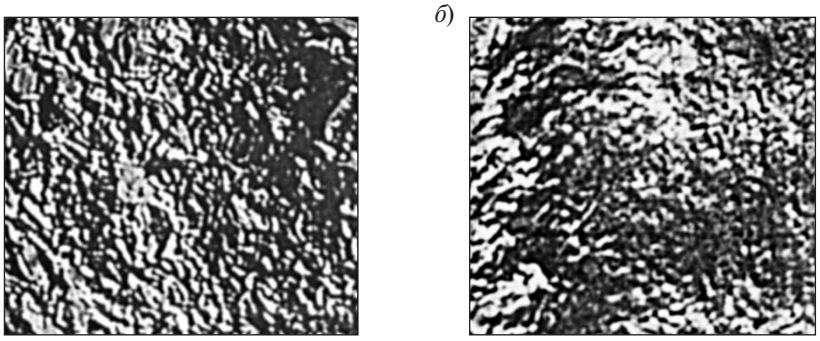


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки поверхности оксидных пленок: *а* — сталь марки 10Х18Н10Т (750 °С, водяной пар; ×15000); *б* — стали марки 02Х19Н14ТЧ-ВИ (обработка по методу циклического окисления; ×15000)

воздействию повышенных температур и водородосодержащих сред.

Практическая ценность результатов работы состоит в разработке режима химико-термической обработки деталей внутриреакторных устройств, который позволяет снизить водородопроницаемость разработанной аустенитной стали на три порядка по сравнению с неокисленным состоянием. Он может быть рекомендован для создания многослойных систем очехловки отдельных элементов и блоков гидридных изделий. Полученные в работе новые научные результаты нашли отражение при создании коррозионностойких конструкционных материалов с заданным уровнем водородопроницаемости и были использованы при обосновании работоспособности оболочек чехлов для гидридных изделий и тепловыделяющих элементов ряда перспективных стационарных и транспортных АЭУ на стадии эскизного и технического проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Яковицкая, М.В.** Исследование водородопроницаемости и оценка работоспособности аустенитных сталей и сплавов в водородосодержащих средах [Текст] / М.В. Яковицкая, О.Ю. Ганзуленко, Н.Б. Кириллов, А.П. Петкова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2011.— № 3 (130).— С. 218–224.

2. **Звездин, Ю.И.** Влияние предварительной обработки нержавеющей стали в водяном паре на ее водородопроницаемость [Текст] / Ю.И. Звездин, В.П. Максимов, И.А. Повышев [и др.].— Сб.: Вопросы судостроения. Сер.: Металловедение.— Л., 1979, № 28.

3. **Володин, С.И.** Способ термической обработки высокохромистых сталей и сплавов с целью снижения их водородопроницаемости [Текст] / С.И. Володин, И.А. Повышев, М.В. Яковицкая [и др.] // Матер. 9-й международной научной конференции «Экология и развитие общества».— СПб., 2005.

УДК 669.14.018

Т.И. Титова, В.Н. Цеменко, Д.В.Ратушев, С.Э. Шкляев, Т.А.Чижик

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

Отечественные производители паровых турбин с давлением пара $P = 24$ МПа и температурой $T = 540$ °С используют для изготовления высокотемпературных роторов среднего и высокого давления низколегированные хромомолибденованадиевые стали, такие, как 25Х1М1ФА (Р2МА) и 20Х3МВФ (ЭИ-415). Для современных энергоустановок требуются новые жаропрочные материалы, служебные характеристики которых должны обеспечивать работу паровых турбин на суперсверхкритических параметрах пара (ССКП), т. е. при температуре 600–620°С и давлении не менее 30 МПа [1].

К данному классу материалов относятся модифицированные комплекснолегированные высокохромистые стали мартенситного и мартенситно-ферритного класса с содержанием хрома 9–12 %. Их эксплуатационные свойства, главным образом — жаропрочность, превосходят характеристики сталей перлитного класса Р2М (Р2МА) и ЭИ-415.

Отечественные стали с 9–12 % хрома, такие, как ЭП428, ЭИ756, ЭИ802, ЭП291, хорошо себя зарекомендовали при изготовлении целого ряда деталей, в том числе в турбостроении. Однако современным требованиям, предъявляемым к заготовкам роторов ССКП, они не удовлетворяют по ряду причин, прежде всего — из-за их низкой технологичности, особенно в больших сечениях.

На сегодняшний день в России отсутствуют освоенные в промышленных условиях 9–12 %-е хромистые стали для высоконагруженных элементов паровых турбин ССКП — роторов высокого и среднего давления. Поэтому оптимизация технологии промышленного производства стали типа Х11МНАФБ, особенно технологии термической обработки, — весьма актуальная задача.

Основная термическая обработка заготовок роторов из высокохромистых сталей, как правило, состоит из закалки от температуры 1050–1100 °С с охлаждением в масле и двойного отпуска: промежуточного при температуре 570 °С и основного при температуре 680–720 °С [2].

Иногда для модифицированных хромистых сталей применяется двойная закалка, причем первый нагрев производится при более высокой температуре, чем второй. Применение двойной закалки с последующим отпуском для хромистых сталей мартенситного класса, обладающих невысокой ударной вязкостью, целесообразно, поскольку такая термическая обработка в ряде случаев повышает ударную вязкость. По данным [3] на остальные механические свойства двойная закалка не оказывает значительного влияния.

Цель настоящей работы — исследование влияния режимов термической обработки на кратковременные свойства и длительную прочность высокохромистой стали типа Х11МНАФБ и выбор оптимальных параметров ее основной термической обработки.

Материал и методика проведения исследований

Для проведения исследования из высокохромистой стали Х11МНАФБ выплавлен опытный слиток массой 100 кг. Выплавка проводилась в открытой индукционной сталеплавильной печи ИСТ-016 с основной футеровкой. Полученный химический состав металла опытного слитка, а также требования ТУ 05764417–066–98 («Заготовка ротора высокого давления из высокохромистой стали марки Х11МНАФБ») к химическому составу данной марки приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, химический состав опытной плавки соответствует требованиям технических условий, за исключением никеля.

Таблица 1

Химический состав исследуемой плавки стали Х11МНАФБ

Химический элемент	Содержание химического элемента в стали, %	
	Согласно ТУ 5764417–066–98	В выплавленном опытном образце
C	0,10–0,14	0,11
Si	Не более 0,10	0,10
Mn	0,40–0,70	0,50
Cr	10,0–11,5	10,09
Ni	0,60–0,80	0,53
Mo	1,30–1,60	1,41
V	0,18–0,26	0,18
Nb	0,03–0,06	0,06
N	0,03–0,06	0,041
P	Не более 0,010	0,010
S	Не более 0,010	0,008
Al	Не более 0,013	0,010

Для реализации термодеформационных параметров ковки опытного слитка, наиболее приближенных к промышленным режимам получения роторных поковок, выбраны температура нагрева под ковку 1190 °С и температура окончания ковки не ниже 900 °С. В результате на молоте реализован суммарный уков 4–4,5.

Из слитка получено 4 поковки размером 80×80×420 мм, которые после ковки подвергались отжигу на перлит, поскольку, как известно, это наилучший способ измельчения зерна в сталях со структурной наследственностью [4]. Режим предварительной термической обработки отображен на рис. 1.

Для анализа микроструктуры, полученной после предварительной термической обработки, проводилось электролитическое травление шлифов в 10 %-м растворе щавелевой кислоты. Установлено, что микроструктура представляет собой достаточно мелкозернистую феррито-перлитную смесь (рис. 2). Величина действительного зерна соответствует G_6 по ГОСТ 5639–82.

На пробах размером 20×20×80 мм от опытных поковок в лабораторных условиях проверено несколько вариантов основной термической обработки, включая закалку от разных температур (рис. 3):

закалка от температуры 1050 °С;

закалка от температуры 1070 °С;

двойная закалка: первая — от температуры 1070 °С, вторая — от температуры 950 °С.

Для устранения (уменьшения количества) остаточного аустенита после закалки проводился двойной отпуск: промежуточный при температуре 570 °С и основной отпуск при температуре 680–700 °С. После всех этапов термической обработки проб охлаждение проводили на воздухе и выполняли замер твердости.

При этом расчеты скоростей охлаждения реального ротора в масле с использованием системы компьютерного моделирования «Полигон», основанной на методе конечных элементов, позволили установить, что нормализация на пробах имитирует охлаждение поверхности бочки штатного ротора при его закалке в масле.

Проведены испытания кратковременных механических свойств при температуре 20 °С на ударных образцах с острым надрезом (тип 11, ГОСТ 9454–78), на разрывных пятикратных образцах (тип III №4, ГОСТ 1497–84), изготовленных в продольном направлении, и испытания длительной прочности также на пятикратных образцах с длиной рабочей части 35 мм, диаметром рабочей части 6 мм, общей длиной 80 мм (ГОСТ 10145–81).

Кроме того, при сериальных испытаниях на ударный изгиб в диапазоне температур от –40 до +60 °С определена температура вязко-хрупкого перехода по критерию 50 %-го волокна в изломе, т. е. переходная (критическая) температура хрупкости T_{50}.

Испытания по определению длительной прочности проводились экспресс-методом в диапазоне температур 565–649°С и напряжениях 343–167 МПа. Параметры испытаний (температура — напряжение) соответствуют типовым условиям, предложенным в спецификации «General Electric» на изготовление заготовок роторов из высокохромистой стали.

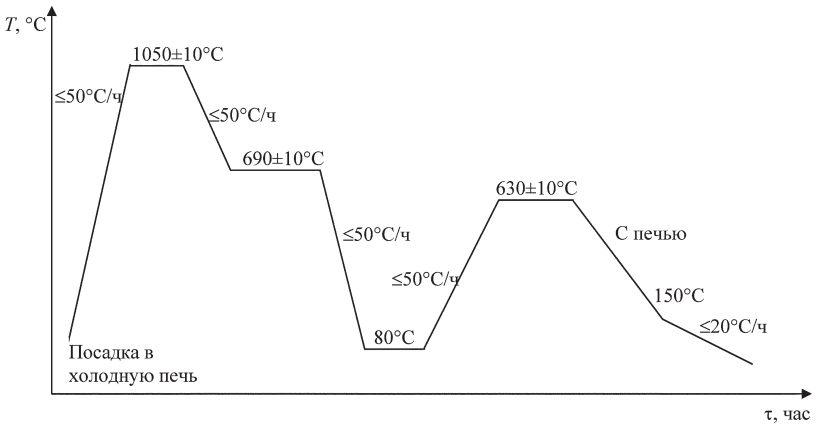


Рис. 1. Режим предварительной термической обработки опытных поковок из стали Х11МНАФБ

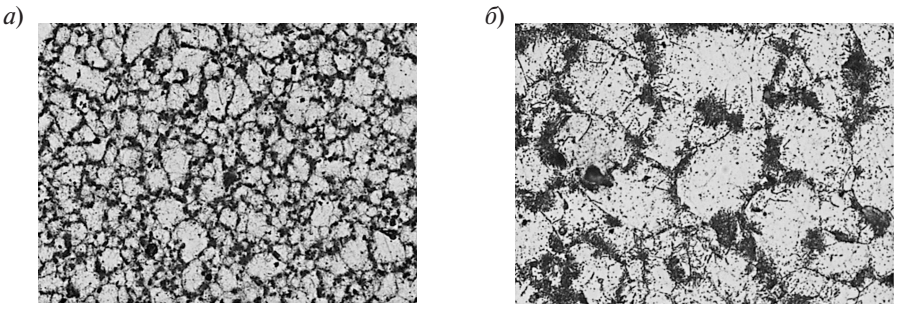


Рис. 2. Микроструктура опытной поковки из стали Х11МНАФБ после предварительной термической обработки (*а* — ×100; *б* — ×400)

Результаты исследования влияния режимов термической обработки на кратковременные свойства стали Х11МНАФБ

Результаты определения твердости, кратковременных механических свойств при температуре +20 °С и переходной температуры хрупкости после выполненных режимов термической обработки (температура нагрева под закалку, температура и время выдержки основных отпусков) приведены в табл. 2 вместе с требованиями ТУ 05764417–066–98.

Установлено, что твердость после закалки от температуры 1050°С составляет 418 *НВ*, после закалки от температуры 1070 °С — 388 *НВ*, т. е. разница в твердости незначительная. Промежуточный отпуск при температуре 570 °С не оказывает влияния на твердость, полученную после закалки; после основного отпуска при температуре 680–700 °С твердость закономерно снижается до уровня 255–286 *НВ*.

Повышение температуры закалки до 1070 °С и применение основного отпуска при темпера-

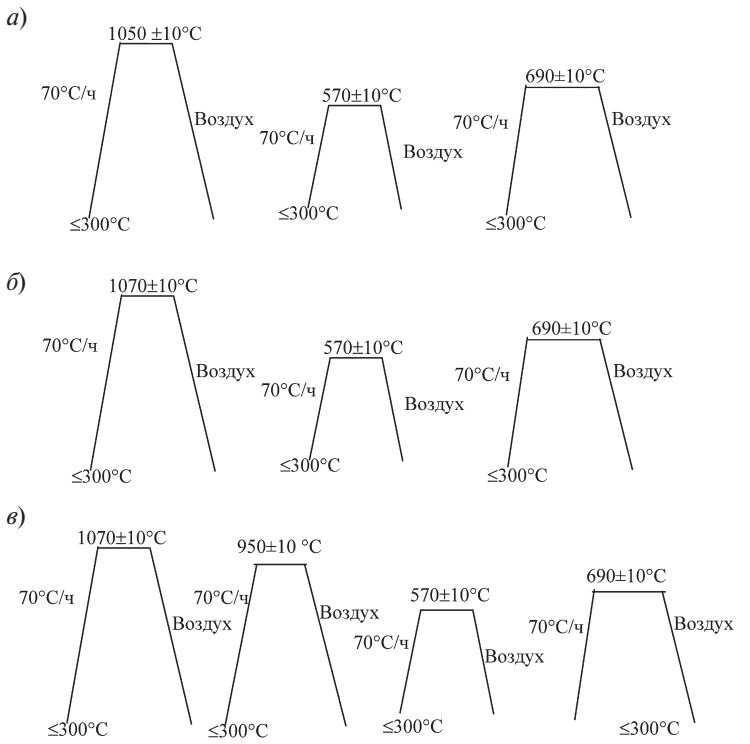


Рис. 3. Схемы основной термической обработки опытных поковок из стали Х11МНАФБ:
а и *б* — одинарная закалка, *в* — двойная закалка

Таблица 2

Механические свойства стали Х11МНАФБ при +20 °С, переходная температура хрупкости и значения твердости после различных вариантов основной термической обработки

Закалка		Отпуск				$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	*KV*, Дж	T_{50}, °С	Категория прочности
Фактические параметры закалки	Твердость стали, *НВ*	Фактические параметры промежуточного отпуска	Твердость стали, *НВ*	Фактические параметры основного отпуска	Твердость стали, *НВ*							
1050 °С — 2 часа	418	570°С — 2 часа	418	680°С — 9 часов	286	930 930	740 760	16,5 18,5	61,0 62,0	24,63 36,0	+26	КП 75
				700°С — 6 часов	277	810 830	680 710	18,5 20,5	62,0 63,0	57,6 67,8	-1	КП 70
1070 °С — 2 часа	388		388	690°С — 7 часов	269	860 880	730 760	18,0 19,5	60,0 60,0	45,0 49,0	+16	КП 75
1070 °С 2часа + 950 °С 2часа				690°С — 5 часов	255	860 870	720 750	19,0 19,0	64,0 67,0	111,0	-22	КП 75
Согласно ТУ 05764417-066-98						≥ 740	590 740	≥ 14	≥ 40	≥ 40	≤+ 50	

туре 690 °С позволило получить высокий уровень всех механических свойств. При довольно высоких прочностных свойствах ($\sigma_{0,2}$ = 730–760 МПа) получены низкая переходная температура хрупкости (T_{50} = +16 °С) и ударная вязкость на уровне требований технических условий.

Существенного преимущества температуры закалки от 1070 °С по сравнению с температурой закалки от 1050 °С по уровню кратковременных механических свойств не выявлено.

Для определения возможности существенного повышения прочностных свойств была проведена термическая обработка, состоящая из одинарной закалки, а температура основного отпуска была несколько понижена (до 680 °С) при выдержке 9 часов. Данный режим основной термической обработки позволил увеличить предел текучести до 740–760 МПа (верхний требуемый уровень ТУ $\sigma_{0,2}$ = 750 МПа), но при этом величина работы удара на образцах с V-образным надрезом была несколько пониженной (24–36 Дж).

Характеристики пластичности исследуемого металла после всех опробованных режимов термической обработки достаточно высокие.

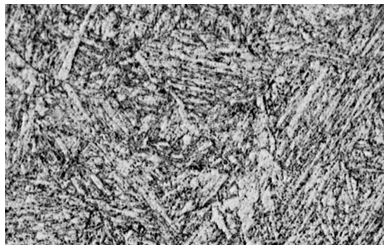
Данные табл. 2 свидетельствуют, что применение двойной аустенизации (1070+950 °С) позволило получить весьма низкое значение T_{50} и значения ударной вязкости, которые превышают значения, полученные после одинарных закалок как от температуры 1050 °С, так и от 1070 °С. При этом прочность находится на достаточно высоком уровне.

Полученные данные также показывают возможность управления и повышения категории (уровня) прочности до КП 70–75 без ущерба для других характеристик механических свойств за счет варьирования продолжительности основного отпуска при температуре 680–700 °С.

Микроструктура металла исследовалась на продольных и поперечных шлифах после химического травления реактивом Марбле. Микроструктура после всех вариантов основной термической обработки представляет собой отпущенный мартенсит без выделений δ-феррита (рис. 4).

Установлено, что изменение температуры одинарной закалки на 20 °С (от 1050 до 1070 °С) не повлияло на величину первичного зерна аустенита. По ГОСТ 5639–82 величина зерна соответствует номеру G_6. Применение двойной

а)



б)

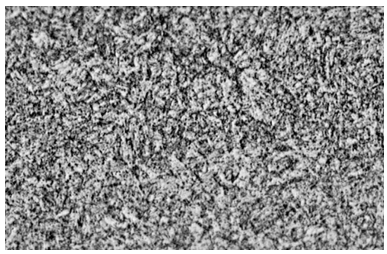


Рис. 4. Микроструктура стали Х11МНАФБ после основной термической обработки (×400): *а* — по схеме одинарной закалки от 1070 °С; *б* — по схеме двойной закалки (1070+950 °С)

закалки от 1070 °С и от 950 °С привело к некоторому измельчению зерна, размер которого преимущественно соответствует номеру G_7.

Результаты исследования влияния режимов термической обработки на длительные свойства стали Х11МНАФБ

Результаты испытаний по определению длительной прочности стали Х11МНАФБ с применением экспресс-метода представлены в табл. 3.

При обработке результатов испытаний для учета совместного влияния температуры и времени до разрушения образца на предел длительной прочности использовалась следующая параметрическая зависимость (параметр Ларсена — Миллера):

$$H_p = T(K)(25 + \lg\tau)\cdot 10^{-3},$$

где $T(K)$ — температура испытаний в градусах Кельвина; τ — продолжительность испытаний до разрушения образца, час.

Обработка результатов испытаний по методу наименьших квадратов позволила определить ресурс металла (прогнозируемое время до разрушения) при напряжении 100 МПа и температуре 600 °С. Графическая обработка результатов испытаний представлена на рис. 5.

Таблица 3

Результаты испытаний длительной прочности опытной поковки из стали Х11МНАФБ

$T_{исп}$, °С	$\sigma_{исп}$, МПа	Время до разрушения τ, час	Параметр Ларсена — Миллера, H_p	Прогнозируемый ресурс при напряжении 100 МПа и температуре 600 °С, час
Одинарная закалка от 1050 °С, основной отпуск от 680 °С — 9 часов				
565	343	275	22,99	251 000
		875,1	23,41	
600	284	442,6	24,13	
		301,2	23,99	
625	226	465,3	24,85	
		401,6	24,79	
649	167	417,9	25,47	
		737,75	25,50	
Одинарная закалка от 1070 °С, основной отпуск от 690 °С — 7 часов				
565	343	605,3	23,28	169 000
600	284	626,6	24,27	
625	226	643,3	24,91	
649	167	333,0	25,38	
Одинарная закалка от 1050 °С, основной отпуск от 700 °С — 6 часов				
565	343	16,8	21,98	74 000
		17,3	21,99	
600	284	50,4	23,31	
		25,8	23,06	
625	226	47,8	23,96	
		60,7	24,05	
649	167	79,5	24,80	
		125,9	24,99	

Известно, что материалы заготовок роторов высокого и среднего давления для современных энергоблоков, работающих на ССКП, должны обеспечивать предел длительной прочности при 600 °С на базе 100 000 часов ($H_p = 26{,}19$) не менее 100 МПа [2, 5].

В результате испытаний установлено, что прогнозируемый ресурс стали Х11МНАФБ в состоянии после закалки от температуры 1050 °С и основного отпуска при температуре 700 °С составляет 74 000 часов, что меньше требуемого уровня.

Снижение температуры отпуска и повышение кратковременных механических свойств до КП 75 привело к значительному повышению прогнозируемого ресурса — до 251 000 часов, что соответствует современным требованиям.

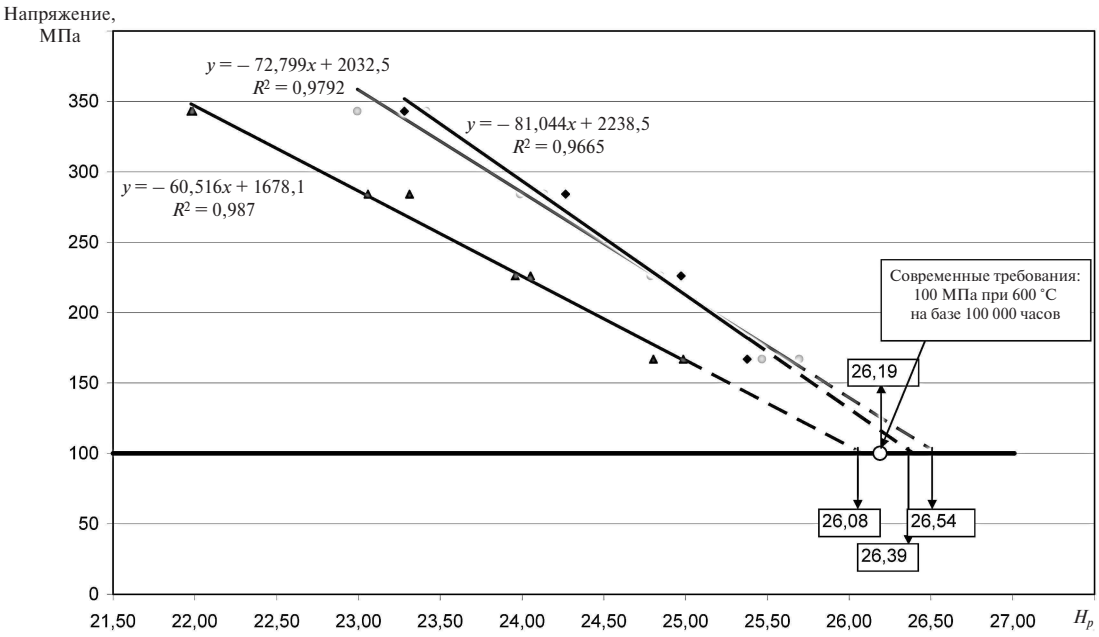


Рис. 5. Результаты испытаний на длительную прочность опытной поковки из стали Х11МНАФБ (▲ — одинарная закалка от 1050 °С КП 70; ● — одинарная закалка от 1050 °С КП 75; ◆ — одинарная закалка от 1070 °С КП 75)

Сопоставление данных таблиц 2 и 3 показывает, что существует прямая зависимость величины кратковременных прочностных свойств и уровня длительной прочности исследуемого металла. Для обеспечения требуемого уровня длительной прочности необходимо обеспечить кратковременные механические свойства на уровне КП 75.

Таким образом, в результате выполненных исследований длительной прочности установлено, что оптимальным режимом основной термической обработки высокохромистой стали типа Х11МНАФБ можно считать режим, состоящий из одинарной закалки от температуры 1050°С с охлаждением в масле и двойного отпуска: промежуточного при температуре 570 °С и основного при температуре 680 °С.

Выявлено влияние режимов основной термической обработки на кратковременные и длительные свойства высокохромистой стали Х11МНАФБ.

Микроструктура стали Х11МНАФБ после основной термообработки с использованием как одинарной, так и двойной закалки с последующими двумя отпусками представляет собой отпущенный мартенсит без выделений δ-феррита.

Величина зерна после одинарной закалки от 1050 °С и 1070 °С одинакова и соответствует G_6 по ГОСТ 5639–82; после двойной закалки (1070 °С + 950 °С) происходит незначительное измельчение зерна до G_7 по ГОСТ 5639–82. Достигнутая мелкозернистость позволила обеспечить высокий комплекс механических свойств, т. е. сочетание прочности, пластичности и вязкости.

Выбран оптимальный режим основной термической обработки высокохромистой стали Х11МНАФБ, состоящий из закалки от 1050 °С с охлаждением в масле и двойного отпуска: промежуточного при температуре 570 °С и основного отпуска в диапазоне 680–700 °С, в зависимости от требуемой категории прочности. Этот режим термической обработки позволяет обеспечить высокий уровень кратковременных механических свойств, включая энергию удара, и длительной прочности металла в сочетании с удовлетворительным уровнем переходной температуры хрупкости, что необходимо для надежной работы в условиях ССКП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карзов, Г.П.** Перспективы создания высокохромистых сталей повышенной жаропрочности [Текст] / Г.П. Карзов, И.В. Теплухина, Г.Н. Филимонов [и др.] // Вопросы материаловедения.— 2009. № 2(58).—С. 5–23.

2. **Kern, T.-U.** The European material development within Cost 522 for 650 °C USC power plants [Текст] / T.-U. Kern, M. Staubli, G. Zeiler [et all.] // 15 th IFM.— Oct. 26–29. (2003).— Kobe, Japan.

3. **Бордзыка, А.М.** Термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов [Текст] / А.М. Бордзыка, В.З. Цейтлин.— М.: Машиностроение, 1964.— 247 с.

4. **Ланская, К.А.** Высокохромистые жаропрочные стали [Текст] / К.А. Ланская.— М.: Металлургия, 1976.— 216 с.

5. **Mayer, K.H.** Long term investigations of specimens of 8 production rotors manufactured of the advanced martensitic 10 %Cr steels X12CrMo(W)VNbN 10 1 (1) [Текст] / K.H. Mayer, T.U. Kern // 14th IFM.— Sept. 03–08. 2000.— Wiesbaden, Germany.

УДК 620.178

О.С. Кузнецова, С.В. Сычёв,
Ю.А. Фадин, С.Г. Чулкин

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Существуют многочисленные данные, которые показывают, что износ занимает ведущую позицию в списке опасных повреждений машин и механизмов, имеющих подвижные детали. Все более увеличивающиеся нагрузки, более жесткие условия эксплуатации, использование новых материалов, свойства которых не всегда обстоятельно изучены, делают узлы трения все более опасными объектами, требующими непрерывного контроля. Естественно, что в этом случае возникает вопрос о способах диагностики узлов трения и прогнозировании износа. Поэтому вопрос о количественной оценке износа во время работы машины без ее остановки и разборки узлов трения приобретает особую актуальность.

Проблема контроля узлов трения возникает не только в связи с оценкой износа материалов, но и в связи с обеспечением работоспособности и надежности всего изделия. В современных узлах трения, особенно в высокоточных приборах, используются такие хрупкие материалы, как монокристаллы и керамики. Эти материалы обладают рядом полезных свойств, главные из которых — способность работать при высокой температуре и стойкость в агрессивных средах, низкая изнашиваемость. Крупным недостатком хрупких материалов является их низкая пластичность, что приводит к невысоким значениям усталостной, а также ударной прочности и трещиностойкости. Чтобы избежать неожиданного разрушения приходится принимать ряд защитных мер: снижать эксплуатационные нагрузки, увеличивать запас прочности. Но в ряде особо ответственных случаев использования хрупких материалов такие пассивные средства защиты от неожиданного разрушения явно не достаточны, и для этого просто необходимо использовать активные средства контроля и непрерывной диагностики, основанные на принципах обратной связи, которые могут отслеживать критические состояния материалов. Обычно керамические материалы работают непрерывно в течение длительного времени в устройствах, которые, как правило, не снабжены никакими системами контроля.

Цель нашей работы состояла в разработке подхода для непрерывного измерения изнашивания без остановки процесса трения.

Сущность рассматриваемого подхода

Изнашивание можно представить как процесс разрушения контактирующих поверхностей. В последние годы для исследования и диагностики процессов разрушения широко

используется метод акустической эмиссии (АЭ). Этот метод можно использовать и для исследования разрушения в процессе трения. Отделение частиц износа связано с образованием микротрещин в поверхностных слоях пар трения. Этот процесс сопровождается сильным акустическим излучением. Важно, что сигналы АЭ можно регистрировать непрерывно в процессе эксплуатации машин и механизмов.

Изнашивание поверхности в первую очередь связано с образованием в поверхностном слое различно ориентированных трещин. Можно выделить два основных класса трещин: вертикальные, расположенные перпендикулярно к поверхности трения, и горизонтальные, которые расположены параллельно поверхности трения или под углом к ней.

Частицы износа появляются в результате развития в поверхностных слоях процесса трещинообразования, который вызывается силами трения. При этом в поверхностном слое могут возникать как трещины нормального отрыва, так и трещины сдвига [1]. Если рассматривается только дискретная акустическая эмиссия, что обеспечивается низкой скоростью скольжения трущихся тел, то в этом случае сигналы АЭ не накладываются друг на друга, и каждый сигнал АЭ может быть зарегистрирован и обработан. Такой подход позволил установить, что трещины отрыва (вертикальные трещины) сопровождаются относительно короткими сигналами АЭ с большой амплитудой, а трещины сдвига (горизонтальные трещины) — длинными сигналами с небольшой амплитудой. Предполагается, что вертикальные трещины отрыва ответственны за размеры и форму будущих частиц износа, а горизонтальные трещины за реальный процесс сдвига и отделения частиц.

Энергия сигналов АЭ, возникающих при образовании трещин, пропорциональна площади трещин или в случае трения размеру частицы износа. Отсюда следует, что массовый износ должен быть пропорционален количеству частиц и их размерам, а соответственно энергии АЭ, которая выделяется в процессе образования трещин. Кроме того, акустический сигнал может быть обусловлен не только процессом разрушения, но и другими причинами (пластическая деформация поверхностных слоев материала, образование вторичных структур, фазовые превращения и т. п.). Сигналы АЭ различной природы могут появляться практически одновременно и обладать близкими физическими параметрами. Поэтому для экспериментального решения проблемы оценки износа необходимо уметь отделять полезные для данных целей АЭ сигналы от бесполезных, т. е. нужны критерии отбора сигналов.

В качестве критериев отбора полезных сигналов АЭ используются два соотношения: $A<A_0$ и $S/A> a$. Эти соотношения подбираются для каждого конкретного материала опытным путем. Величина A_0 ограничивает амплитуду АЭ сигналов, принимаемых в расчет, т. е. является критерием выбора сигналов, соответствующих горизонтальным трещинам. Величина S/A имеет смысл относительной длительности сигнала, где a постоянная для данного вещества величина, а A — максимальное значение амплитуды сигнала акустической эмиссии на выходе усилителя, мВ, S — безразмерная величина, пропорциональная длительности сигнала (для сигнала осциллирующего вида S представляет собой количество пересечений сигналом заданного порога регистрации). На таких принципах был основан предложенный ранее способ определения износа подшипника скольжения без разбора узла трения [2].

В окончательном виде массовый износ m подсчитывается по формуле

$$m = m_{\text{o}} + k_{\text{ME}}\, W_{\text{АЭ}}, \quad (1)$$

где параметры m_{o} и k_{ME} устанавливаются в предварительных лабораторных испытаниях на трение для тех же материалов при скорости, соответствующей скорости скольжения контактирующих поверхностей, а $W_{A\text{Э}}$ — суммарная энергия сигналов акустической эмиссии, которая принимается в расчет с учетом правила отбора.

Спектральный метод оценки износа

Если скорость скольжения в паре трения велика и сигналы АЭ перекрываются, то обработка информации значительно усложняется. Акустическая эмиссия из дискретной становится квазинепрерывной. Разработанный выше подход к количественной оценке износа, основанный на анализе индивидуальных сигналов, вообще перестает работать. Чтобы выйти из этого положения нужно сделать новый шаг. Мы

Оценка массы износа керамики из карбида кремния (в мкг) по данным АЭ

Способ подсчета	Масса износа, мкГ, для девяти трехсекундных экспозиций								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
По формуле (1)	2,4	0	0	0	0,2	0,6	0,6	1	0,2
По формуле (2)	2,3	0,6	0,8	0,9	1,2	0	0,8	1	0,3

полагаем, что это можно сделать на основе использования спектрального анализа сигналов АЭ [3]. Спектральный анализ, согласно [4], является наиболее подходящим способом корректной оценки энергии сигнала АЭ. Предполагается, что сигналы от вертикальных и горизонтальных трещин обладают разными частотными спектрами. В силу особенностей применяемой нами аппаратуры происходит регистрация огибающей сигналов АЭ. Следующее предположение состоит в том, что огибающие сигналов от вертикальных и горизонтальных трещин также обладают разными спектрами. Эти спектры могут быть получены с помощью соответствующей математической обработки сигналов. В полученных спектрах можно выделить частотные области, в которых преобладают вклады от соответствующих трещин. Диапазоны частотных областей можно установить опытным путем по результатам экспериментов на изнашивание. Износ материала Δm можно определить по формуле

$$\Delta m = k_f \sum_i \frac{1}{f_i^2}, \qquad (2)$$

где k_f — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментальным путем, f_i — спектральная плотность, i — номер спектральной компоненты.

Для материалов из карбида кремния было экспериментально установлено, что частотный диапазон процессов, ответственных за износ, лежит в области 1000–3000 Гц.

Предполагается, что спектральный метод должен действовать и в случае дискретной акустической эмиссии.

Мы провели сравнение этих двух методов оценки износа.

Материалы и методика исследования

Работа выполнялась на образцах карбидокремниевой керамики. Эти материалы представляют интерес для практики [5] и, кроме того, являются удобными модельными материалами

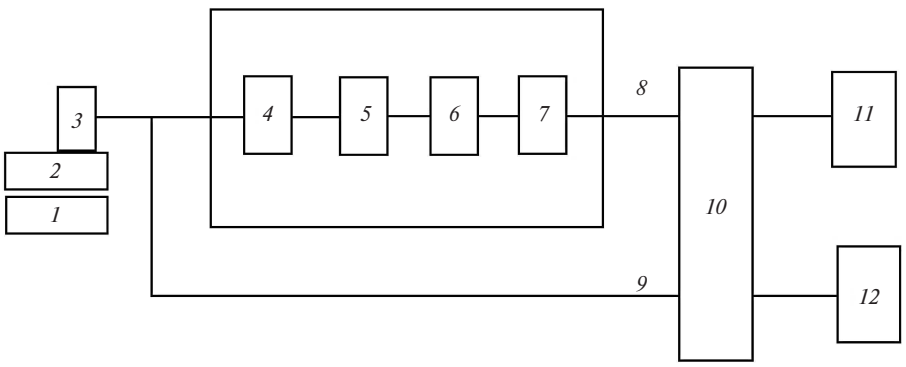


Схема установки для регистрации акустической эмиссии:

1 — подвижный образец; *2* — неподвижный образец; *3* — пьезопреобразователь; *4* — предварительный усилитель; *5* — основной усилитель; *6* — фильтры; *7* — блок обработки; *8* — первый канал осциллографа; *9* — второй канал осциллографа; *10* — осциллограф 3107 «АКТАКОМ»; *11* — ЭВМ 1; *12* — ЭВМ 2

для экспериментов, т.к. их можно считать в первом приближении практически упругими и не упрочняющимися, что значительно упрощает обработку экспериментальных данных. Образцы керамик были получены способом твердофазного спекания.

Исследования на трение и износ проводились по схеме «палец — диск». Основные параметры трения — нагрузка и линейная скорость скольжения — варьировались соответственно в пределах от 15 до 75 Н и от 0,5 до 9 м/с.

Акустическая эмиссия при трении изучалась следующим образом. Для регистрации акустической эмиссии использовался аппаратурный комплекс, включающий в себя контактные пьезопреобразователи типа П113 из пьезокерамики ЦТС-19, рассчитанные на работу в диапазоне 0,2–1 МГц, усилительный тракт от прибора АФ-15, многофункциональную плату 6023E, производства компании National Instruments (USA), обеспечивающую преобразование аналоговых измерительных сигналов в цифровые, и персональный компьютер. Далее этот аппаратурный комплекс будем называть — система АЭ. Аппаратурный комплекс позволяет регистрировать время появления АЭ события, его максимальную амплитуду *A* и длительность (количество осцилляций *S*). Общий коэффициент усиления системы АЭ составлял 60 дБ.

Результаты

Регистрация сигналов проводилась по двум каналам на цифровом осциллографе «АКТАКОМ 3107» (см. рис.). По одному из каналов проводилась запись сигналов АЭ, поступающих непосредственно с датчиков акустической эмиссии на вход системы АЭ. Другой канал осциллографа был подключен к выходу системы АЭ. Полученные в одном масштабе времени по разным каналам сигналы АЭ обрабатывались соответственно по формулам (1) и (2).

Результаты приведены в таблице.

Коэффициент корреляции между значениями массового износа, которые получены двумя способами, достигает 0, 73. Полученные значения могут быть в дальнейшем увеличены путем подбора более узких частотных областей.

В результате нами разработан подход, основанный на анализе спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии, для определения износа материалов узлов трения без остановки самого процесса трения. Подход показывает высокую корреляцию с разработанным ранее методом непосредственного определения износа, который хорошо работает при дискретной акустической эмиссии и невысоких скоростях скольжения. Предполагается, что при высоких скоростях скольжения при квазинепрерывной АЭ разработанный метод оказывается единственно возможным методом оценки износа материалов в процессе трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10–08–00966-а) и Научной программы РАН под руководством академика И.Г. Горячевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фадин, Ю.А.** Применение акустической эмиссии для оценки массового износа [Текст]/ Ю.А. Фадин // Трение и износ. –2008.— Т. 29, № 1.— С. 29–32.

2. **Пат. 2212648 РФ: кл.G 01 N 3/56, 29/14** Способ определения износа вкладыша подшипника скольжения: [Текст]/ Ю.А.Фадин, В.П. Булатов, О.Ф. Киреенко, В.И. Тулаев.— Опубл. Бюл. изобр.— 2003. № 26.

3. **Кузнецова, О.С.** Особенности регистрации акустической эмиссии при экстремальных условиях трения хрупких тел [Текст] / О.С. Кузнецова, Ю.А Фадин // XXXX Неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. IV.— СПб: Изд-во Политехнического университета, 2011.— С. 89–90.

4. **Stephens, R.-W. B**. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission [Текст] / R.-W. B. Stephens, A.A. Pollock // J. Acoust. Soc. Amer., 1971.— Vol. 50., № 3.— P. 904–910.

5. **Гаршин, А.П.** Карбид кремния. Монокристаллы, порошки и изделия на их основе [Текст] / А.П. Гаршин.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.— 124 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.438:226.71

Н.Н. Кортиков, В.В. Кривоносова

ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ СО СТОЛБИКАМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ И ВИХРЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Для обеспечения требуемой глубины охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин используются различные методы интенсификации теплообмена в каналах охлаждения. В частности, для интенсификации теплообмена в зоне выходной кромки лопаток турбины часто применяются столбики-турбулизаторы и вихревые матрицы [1].

В [1–3] предложено несколько эмпирических зависимостей для расчета гидравлического сопротивления и теплообмена в каналах со столбиками-турбулизаторами и вихревыми матрицами. Однако результаты расчетов по этим зависимостям, в частности при определении гидравлического сопротивления каналов со столбиками-турбулизаторами, не согласуются между собой (расхождение доходит до 200 %).

Применение интенсификаторов теплообмена приводит к росту гидравлического сопротивления в тракте охлаждения. Для сопоставления различных способов интенсификации теплообмена вводится понятие теплогидравлического качества, или эффективности интенсификации теплообмена [4], которое описывается выражением $E = \frac{\mathrm{Nu}/\mathrm{Nu}_{\text{гл}}}{\xi/\xi_{\text{гл}}} = \frac{\psi}{\varphi}$, где $\varphi = \xi/\xi_{\text{гл}}$ — коэффициент роста гидравлических потерь в канале, $\psi = \mathrm{Nu}/\mathrm{Nu}_{\text{гл}}$ — коэффициент интенсификации теплообмена (нижний индекс «гл» относится к числу Нуссельта и коэффициенту гидравлического сопротивлению ξ для канала с гладкими стенками).

Целью нашей работы было получение новых зависимостей для расчета гидравлического сопротивления каналов со столбиками-турбулизаторами и вихревой матрицей, которые бы позволили уточнить значения эффективности интенсификации теплообмена в каналах, характерных для сопловой лопатки первой ступени энергетической газотурбинной установки среднего класса мощности [5].

Гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах со столбиками-турбулизаторами

Определение наиболее адекватной зависимости для расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho W^2}\frac{D}{L}$ в каналах эквивалентного диаметра D и длиной L со столбиками-турбулизаторами основано на сопоставлении эмпирических выражений [1–3] с экспериментальными данными [2]. Сравнение проводится только для каналов с шахматным расположением столбиков-турбулизаторов. Геометрические параметры матрицы штырей показаны на рис. 1.

Эмпирические зависимости для расчета коэффициента гидравлического сопротивления [1–3] обычно представляются в виде произведения двух множителей, один из которых — гидравлическое сопротивление для гладкого канала в виде формулы Блазиуса $\lambda_{\text{гл}} = 0{,}316\,\mathrm{Re}^{-0{,}25}$ [1], другой — поправка, учитывающая влияние столбиков-турбулизаторов. Исходя из этого зависимость НЗЛ [1] записывается в виде

$$\zeta = \lambda_{\text{гл}}\varepsilon_{\text{НЗЛ}}, \qquad (1)$$

где

$$\varepsilon_{\text{НЗЛ}} = 1 + 153{,}26\,\mathrm{Re}^{-0{,}02}\left(\frac{S_2}{d}\right)^{-1{,}52}\left(\frac{d}{H}\right)^{-0{,}25} \times$$

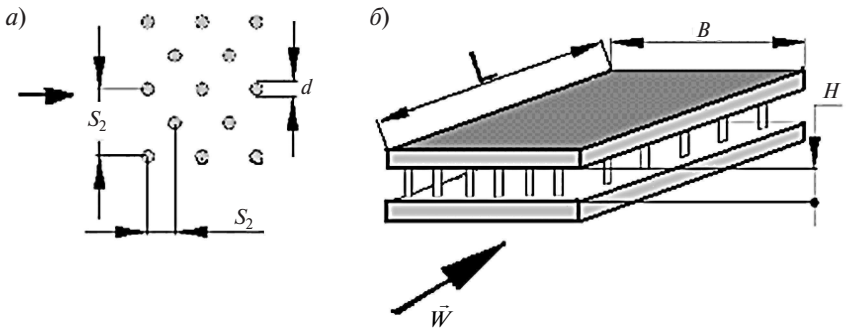


Рис. 1. Матрица штырей (*а*) и геометрия канала со столбиками-турбулизаторами (*б*)

$$\times n^{0,93}\exp\left(-\frac{0,0513\,S_1}{d}\right)\frac{2H}{S_1 n}$$

при $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{max}$;

$$\varepsilon_{\text{НЗЛ}} = 1 + 4,8\cdot 3,16\cdot \mathrm{Re}^{0,25}\left(\frac{S_2}{d}\right)^{-1,6}\left(\frac{d}{H}\right)^{-0,25}\times$$

$$\times n^{0,93}\exp\left(-\frac{0,0513 S_1}{d}\right)\frac{2H}{S_1 n}$$

при $\mathrm{Re} > \mathrm{Re}_{max}$.

Здесь $\mathrm{Re}_{max} = 32000\left(\frac{S_2}{d}\right)^{0,275}\left(\frac{d}{H}\right)^{-0,12}$; n — количество рядов.

В зависимости ЦИАМ [1] подобная поправка $\varepsilon_{\text{ЦИАМ}}$ представлена в виде

$$\varepsilon_{\text{ЦИАМ}} = k_1 k_2 k_3, \qquad (2)$$

где

$$k_1 = 3,69\,\mathrm{Re}^{0,291}\left(\frac{S_1}{d}\right)^{-0,643}$$

$$k_2 = 22,54 - 25,17\left(\frac{S_2}{d}\right) +$$

$$+ 9,67\left(\frac{S_2}{d}\right)^2 - 1,243\left(\frac{S_2}{d}\right)^3;$$

$$k_3 = 1 - 0,0833\left(\frac{d}{H} - \left(\frac{d}{H}\right)^2\right).$$

Зависимость для расчета гидравлического сопротивления [3] имеет следующий вид:

$$\zeta = 0,317\,\mathrm{Re}_d^{-0,132} f_\lambda \quad \text{для } 10^3 < \mathrm{Re}_d < 10^4,$$

$$\zeta = 1,76\,\mathrm{Re}_d^{-0,318} f_\lambda \quad \text{для } 10^4 < \mathrm{Re}_d < 10^5. \qquad (3)$$

Здесь $f_\lambda = 4 f_{\mathrm{Re}} f_{\Delta P}$; $f_{\mathrm{Re}} = \left(2\frac{h}{d}\left(1 - \frac{d}{S_2}\right)\right)^n$;

$$f_{\Delta P} = 2\frac{H}{S_1}\left(1 - \frac{d}{S_2}\right)^{-2}$$

Сопоставление результатов расчета по формулам (1)–(3) с опытными данными [2] показало (рис. 2), что, хотя наилучшее соответствие имеет эмпирическая зависимость (3), однако и она дает значительное расхождение с опытом, достигающее 40 %.

В настоящей работе предложена уточненная зависимость для расчета гидравлических потерь в виде

$$\zeta = 0,07\,\mathrm{Re}^{-0,07 k_{\mathrm{Re}}} k_{S2} k_h k_{S1}; \qquad (4)$$

$$k_h = \left(\ln\left(e\frac{h}{d}\right)\right)^{1,4}; \quad k_{S_1} = \left[\left(\frac{4d}{S_1}\right)^{\left(\frac{4d}{S_1}\right)^{0,65}}\right];$$

$$k_{S_2} = \left[1 - e^{-\left(0,092\frac{S_2}{12,7d}\right)}\right]^{-1}\left(\frac{S_2}{d}\right)^{0,55}; \quad k_{\mathrm{Re}} = \left(\frac{4d}{S_1}\right).$$

Она имеет лучшее соответствие с опытными данными [3].

Это подтверждается результатами расчета коэффициента несовпадения Тейла [6], который определяется в виде

$$S = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left[y_{i\text{э}} - y_{i\text{м}}\right]^2\right]^{0,5}}{\left[\sum_{i=1}^{n}\left[y_{i\text{э}}\right]^2\right]^{0,5} + \left[\sum_{i=1}^{n}\left[y_{i\text{м}}\right]^2\right]^{0,5}}, \qquad (5)$$

где $y_{i\text{э}}$ —экспериментальное значение; $y_{i\text{м}}$ — значение, рассчитанное по функциональной модели; n — число экспериментальных значений.

Значения коэффициента несовпадения Тейла находятся в диапазоне от 0 до 1, причем при $S = 0$ — полное совпадение; при $S = 1$ — отсутствие совпадения. В табл. 1 приведены результаты расчета этого коэффициента для эмпирических зависимостей (1)–(4).

Как видно из этой таблицы, наименьшие коэффициенты несовпадения имеет зависимость (4). Эта зависимость уступает формуле (3) только для каналов с поперечным шагом, равным четырем,

Рис. 2 показывает, что зависимости (1) и (2) имеют узкий диапазон применимости и занижают значения коэффициента сопротивления при плотном поперечном расположении столбиков-турбулизаторов, а формула (2) не применима при значениях $S_2/d > 3{,}3$.

Расчет теплообмена в канале со столбиками-турбулизаторами основан на использовании зависимостей [1–3] вида

$$\mathrm{Nu} = C\,\mathrm{Re}^{n}\,\varepsilon_{\tau}, \qquad (6)$$

(параметры C, n и ε_{τ} представлены в табл. 2).

Для зависимостей Мецгера и Савостина, где характерным размером служит диаметр столбика-турбулизатора, используются поправочный коэффициент $f_{\mathrm{Nu}} = \dfrac{2H}{d}$ и поправка f_{Re} на критерий Рейнольдса, приведенная в формуле (3). Для зависимостей ЦИАМ и НЗЛ введена поправка на гидравлический диаметр

$$f_{\text{ЦИАМ}} = \left(\frac{S_2 - d}{H + S_2 - d}\right)^{0{,}43}.$$

В табл. 3 приведена оценка эмпирических зависимостей по коэффициенту несовпадения Тейла.

Анализ результатов расчета коэффициентов Тейла (см. табл. 3) показал, что, во-первых, наиболее адекватной для расчета теплообмена в канале со столбиками-турбулизаторами можно считать эмпирическую зависимость Мецгера; во-вторых, диапазон ее применимости может быть расширен.

Гидравлическое сопротивление и теплообмен в каналах с вихревой матрицей

Вихревые матрицы делятся на матрицы открытого и закрытого типа [7, 8]. Каналы вихревых матриц закрытого типа имеют участки поворота у торцевой поверхности. В вихревой матрице открытого типа в большинстве каналов нет участка поворота. Схема течения охладителя в вихревой матрице закрытого типа показана на рис. 3.

Характерные параметры вихревой матрицы: L — длина оребренного участка; B — ширина оребренного участка; t — шаг ребер; b — толщина ребра; H — высота щелевого канала; β — угол между направлением ребра и боковой поверхностью канала.

Результаты теплогидравлических испытаний МАТИ обобщены для коэффициента гидравлического трения $\xi = 2\left(P^{*}_{\text{вх}} - P^{*}_{\text{вых}}\right) D / \left(\rho W^{2}\right) L$ и числа Нуссельта Nu в виде [9]

$$\zeta = 1369\,\mathrm{Re}^{-0{,}23}\,\beta_0^{2{,}75}(\beta_0^2 - 0{,}78\beta_0 + 0{,}19), \qquad (7)$$

Таблица 1

Коэффициенты несовпадения Тейла по расчету коэффициента гидравлического трения

Номер канала	Параметры матрицы штырей		Коэффициенты несовпадения S, рассчитанные по формулам			
	S_1/d	S_2/d	(1)	(2)	(3)	(4)
15	4	4	0,164	1,000	0,082	0,140
12а	4	2,17	0,199	0,213	0,120	0,051
6	2	2,145	0,213	0,187	0,063	0,020
17а	4	1,5	0,120	0,166	0,094	0,089
20	4	1,25	0,051	0,442	0,062	0,040

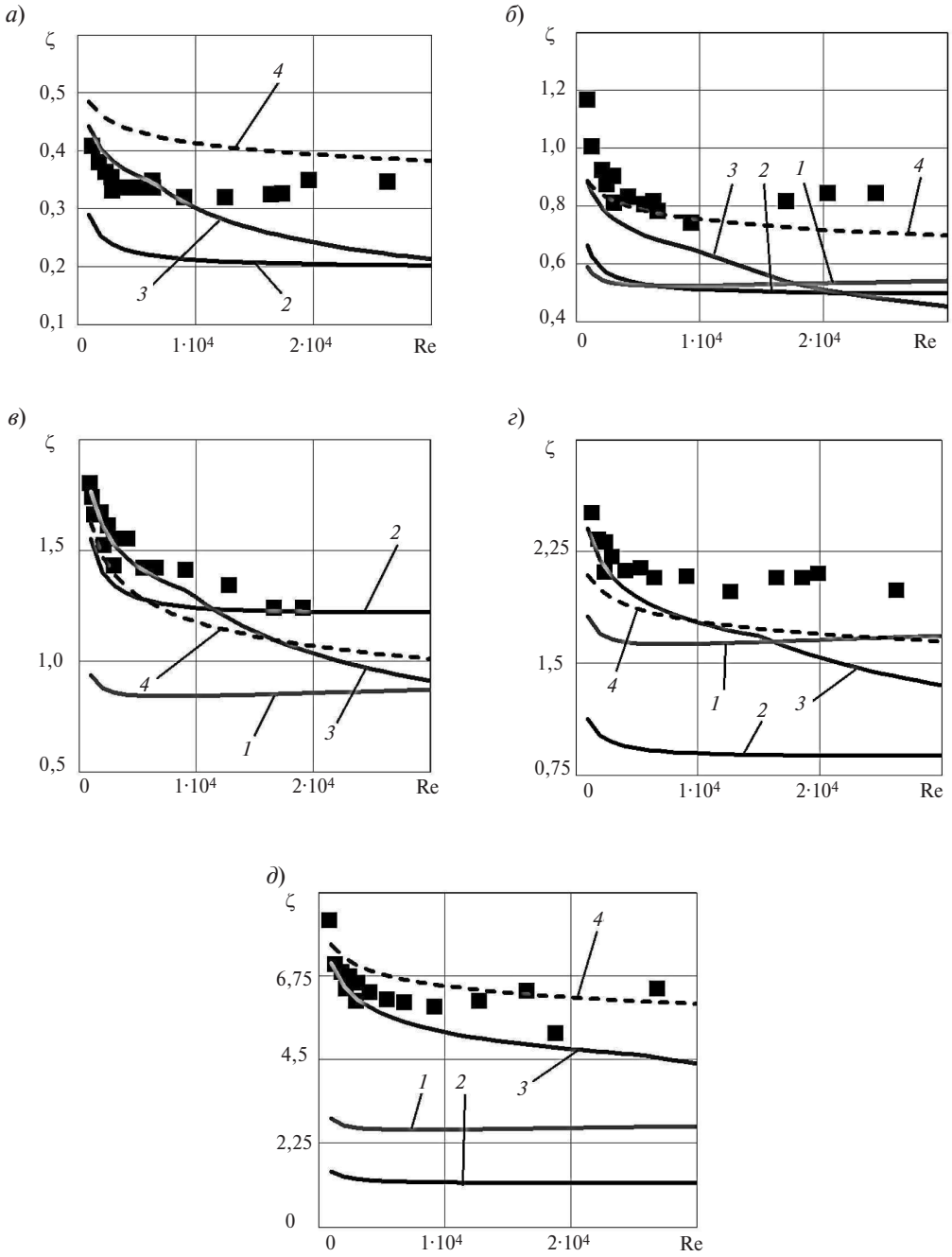


Рис. 2. Сопоставление эмпирических зависимостей (*1* — ЦИАМ [1]; *2* — НЗЛ [1]; *3* — [3]; *4* — данная работа) с экспериментальными данными (черные квадраты) [3] для каналов 15 (*а*), 12а (*б*), 6 (*в*), 17а (*г*) и 20 (*д*)

Таблица 2

Параметры формулы (6), соответствующие эмпирическим зависимостям из разных источников

Автор зависимости/организация [источник]	C	n	$\varepsilon_т$
Мецгер [3]	0,135	0,69	$\left(\frac{S_1}{D}\right)^{-0,34} f_{\text{Nu}}$
Савостин [2]	0,152	0,64	f_{Nu}
НЗЛ [1]	0,036	0,8	$\left(\frac{d}{H}\right)^{0,18}\left(\frac{S_2}{d}\right)^{-0,35} m^{0,22} f_{\text{ЦИАМ}}$
ЦИАМ [1]	0,179	0,8	$k_1 k_2 f_{\text{ЦИАМ}} \text{Pr}^{0,43}$; $k_1 = 12,2 - 8,68\frac{S_2}{d} + 1,65\left(\frac{S_2}{d}\right)^2$; $k_2 = 1,382 - 0,4438\frac{d}{H} + 0,062\left(\frac{d}{H}\right)^2$

Таблица 3

Коэффициенты несовпадения Тейла по расчету теплообмена в канале со столбиками-турбулизаторами

Номер канала	Коэффициенты несовпадения S, полученные по эмпирическим зависимостям			
	ЦИАМ	Савостин	НЗЛ	Мецгер
15	0,452	0,049	0,098	0,021
12а	0,084	0,013	0,143	0,066
6	0,229	0,111	0,187	0,045
17а	0,258	0,014	0,149	0,051
20	0,411	0,101	0,128	0,068

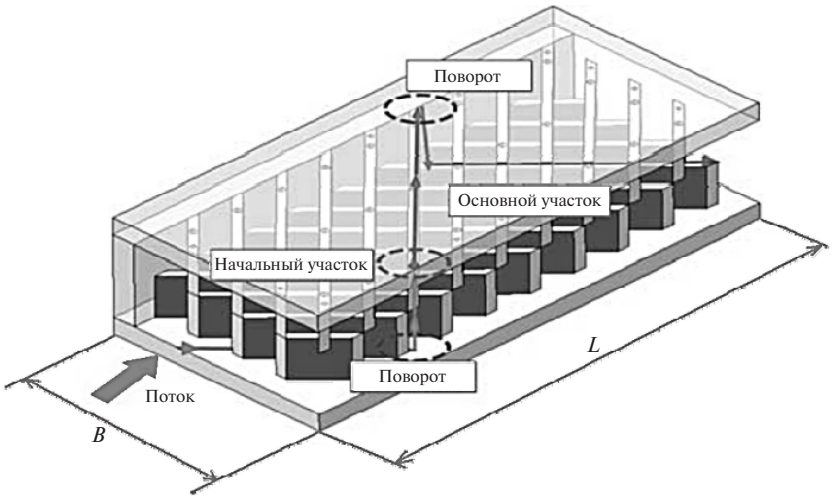


Рис. 3. Схема течения в вихревой матрице

$$\mathrm{Nu} = 0{,}95\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\beta_0^{\,0{,}46}\left(\frac{H}{t}\right)^{-0{,}03}\left(\frac{d_г}{L}\right)^{0{,}91}\varphi^{0{,}65}. \quad (8)$$

Здесь $P^*_{вх}$, $P^*_{вых}$ — давления торможения на входе и выходе из канала; $\beta_0 = \frac{2\beta}{\pi}$ — относительный угол скрещивания каналов, где 2β — угол в радианах.

В [10] для вихревой матрицы без взаимного пересечения ребер были получены зависимости ЛПИ для коэффициента гидравлического сопротивления и числа Нуссельта:

$$\xi = \frac{A}{\mathrm{Re}^{0{,}15}}; \qquad \mathrm{Nu} = B\,\mathrm{Re}^{n}, \quad (9)$$

где $n = 0{,}45 + 0{,}63\beta_0$, $B = 0{,}22 - 0{,}30\beta_0$.

В [8] изложен алгоритм расчета вихревых матриц как цепочки гидравлических сопротивлений. Суммарные гидравлические потери рассчитываются по формуле $\varsigma_{уч} = \varsigma_{вх} + \varsigma_{тр} + \varsigma_{пов} + \varsigma_{т} + \varsigma_{вых}$, где составляющие учитывают потери на входе в участок матрицы, на трение, на поворот у боковой границы матрицы, на обусловленные подогревом воздуха и потери на выходе из матрицы. В [8] приведены зависимости для расчета критерия Нуссельта для теплообмена в единичном канале вихревой матрицы. В среде MathCAD составлена программа, в которой гидравлическое сопротивление приведено к параметрам фронтального сечения прямоугольного канала, а критерий Нуссельта — к неоребренной поверхности. На рис. 4 показаны результаты расчетов по формулам (7) — (9) и вышеуказанному алгоритму.

Сопоставление эффективности интенсификации теплообмена для каналов со столбиками-турбулизаторами и вихревой матрицей

Результаты сопоставления эффективности охлаждения вихревой матрицы и столбиков-турбулизаторов представлены на рис. 5. В качестве сопоставляемых теплообменных поверхностей выбраны канал со столбиками-турбулизаторами с безразмерными параметрами H/d = 3, S_1/d = 2,5, S_2/d = 2,5 и вихревая матрица с H/d = 3 и t/b = 3.

На рис. 5, *а* показано, что при числах Рейнольдса Re < 50 000 интенсификация $\psi_{вихр}$ теплообмена в вихревой матрице для гладкого прямоугольного канала выше на 10–20 %, чем интенсификация $\psi_{штыри}$ теплообмена в канале со столбиками-турбулизаторами. При Re > 50 000 вихревая матрица уступает по интенсификации теплообмена матрице штырей. В диапазоне чисел Рейнольдса $2\cdot10^4$–$2\cdot10^5$ эффективность охлаждения вихревой матрицы и столбиков-турбулизаторов близка между собой. Отличие составляет не более 5 % (рис. 5, *б*).

Данные положения могут быть применены при проектировании охлаждаемой лопатки первой ступени турбины средней мощности, для которой число Рейнольдса охлаждающего воздуха в полости лопатки зоны выходной кромки составляет Re = 70000 [5].

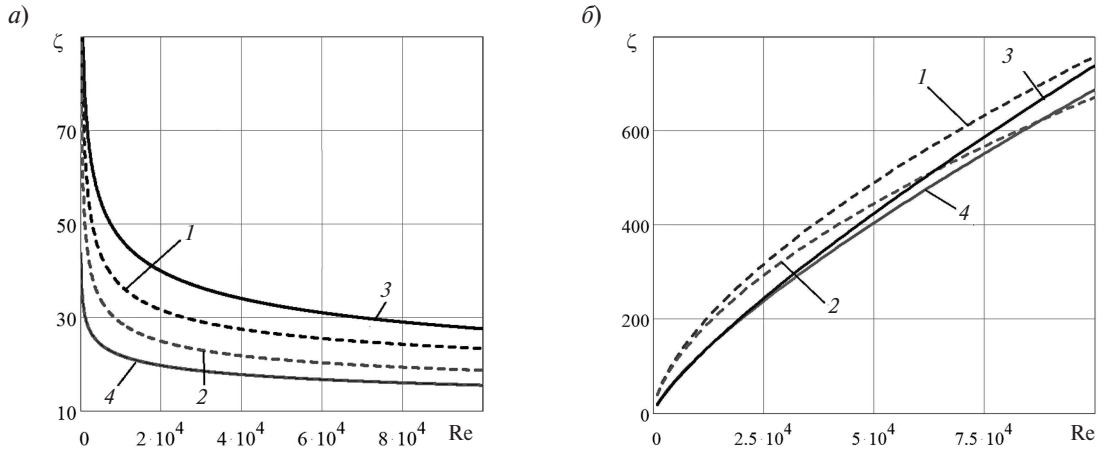


Рис. 4. Сопоставление расчетных (*1* — по алгоритму МАТИ; *2* — по алгоритму ЛПИ) и экспериментальных (*3* — МАТИ; *4* —ЛПИ) значений коэффициентов трения (*а*) и теплообмена (*б*) в вихревой матрице

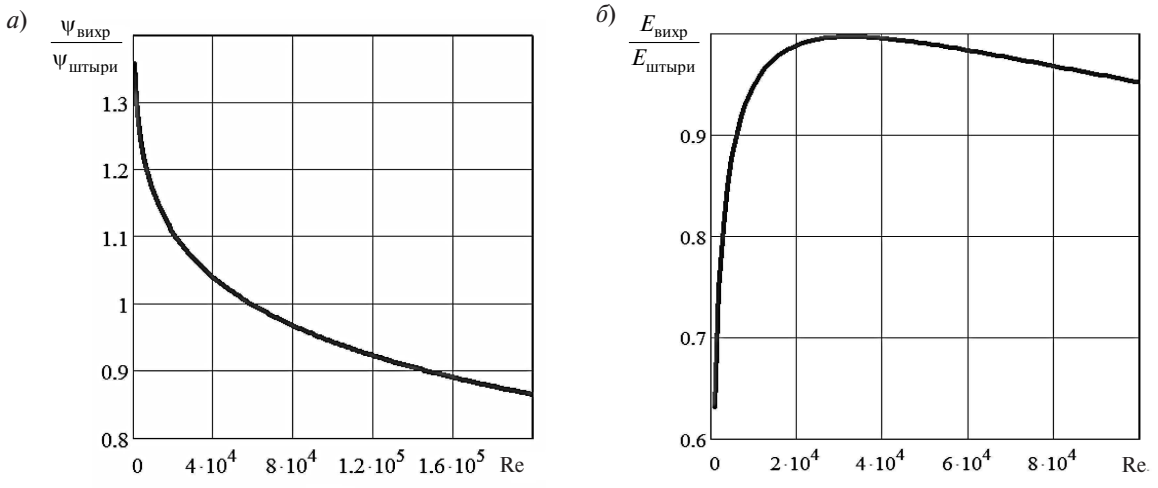


Рис. 5. Сопоставление вихревых матриц и столбиков-турбулизаторов по интенсификации теплообмена (*а*) и эффективности (*б*)

Подведем итоги работы.

Формула (4) наиболее адекватна для расчета гидравлических потерь и применима в диапазоне $H/d = 1–6$; $S_1/d = 1{,}043–4$; $S_2/d = 1{,}25–4$.

Для расчета теплообмена в матрице штырей целесообразно использовать зависимость Мецгера, причем диапазон ее применимости может быть расширен до $S_1/\mathrm{d} = 1{,}04–5$ и $S_2/d = 1{,}25–4$.

При умеренных числах Рейнольдса (Re< <50 000) в гладком незагроможденном канале интенсификации теплообмена в вихревой матрице выше, чем интенсификация теплообмена в канале со столбиками-турбулизаторами на 10–20 %; при Re>50 000 вихревая матрица уступает по интенсификации теплообмена матрице штырей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копелев, С.З.** Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД [Текст] / С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко.— Харьков: Основа, 1994.— 237 с.

2. **Савостин, А.Ф.** Интенсификация теплоотдачи в щелевых каналах охлаждения [Текст] / А.Ф. Савостин, А.М. Тихонов, Н.И. Беляев // Труды ЦИАМ.—

Вып. 611.— 1974.— С. 74–96.

3. **Rao, Y.** An Experimental Study of Transitional Flow Friction and Heat Transfer Performance of a cannel With Staggered Arrays of Mini-Scale Short Pin Fins [Текст] / Y. Rao, C. Wan, S. Zang // ASME Paper GT— 2009–59341.— 2009.

4. **Калинин, Э.К.** Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо.— М.: Машиностроение, 1990.— 208 с.

5. **Лебедев, А.С.** Разработка отечественной энергетической газотурбинной установки среднего класса мощности с применением комплекса современных расчетно-экспериментальных методов [Текст]: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук / А.С. Лебедев.— СПб., 2007.

6. **Розенберг, Г.С.** Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) [Текст] / Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков, П.М. Брусиловский.— Тольятти, 1994.— 182 с.

7. **Ануров, Ю.М.** Эффективные методы интенсификации теплообмена в системах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин [Текст]: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук / Ю.М. Ануров.— СПб., 2005.

8. **Нагога, Г.П.** Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин [Текст]: Учебное пособие / Г.П. Нагога.— М.: МАИ, 1996.

9. **Галкин, М.Н.** Исследование и расчет гидравлических и тепловых характеристик охлаждаемых конструкций с компланарными каналами [Текст] / М.Н. Галкин, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Известия вузов. Машиностроение.— 1985. № 3.— С. 56–60.

10. **Андреев, К.Д.** Исследование теплообмена и гидравлических сопротивлений в канале прямоугольного сечения со взаимно пересекающимися и скрещивающимся оребрением [Текст] / К.Д. Андреев, Л.В. Арсеньев, В.Г. Полищук, Н.П. Соколов // Промышленная теплотехника.— 1998. Т. 20, № 3.— С. 70–75.

УДК 620.178

С.В. Сычёв, О.С. Кузнецова,
Ю.А. Фадин, С.Г. Чулкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ КЕРАМИК

В каждой паре трения в начальный период процесса контактного взаимодействия происходит изменение геометрических параметров поверхностей трения. Этот процесс называется приработкой [1]. Повсеместная практика показывает, что эксплуатация пары трения начинается только после завершения приработки. Поэтому информация о завершении приработки — важнейшая характеристика этого процесса. Как правило, данные об окончании процесса приработки могут быть получены после проведения испытаний на трение, разборки узла трения и последующего лабораторного анализа состояния поверхностных слоев контактирующих материалов. Информация об окончании процесса приработки в процессе самого трения может быть получена только при проведении лабораторных испытаний, например по данным о стабилизации коэффициента трения или стабилизации температуры в области контакта.

Все реальные объекты, сделанные из новых деталей, проходят приработку, ее время можно указать только приблизительно. Стандартные методы определения приработки еще не разработаны. Существует насущная потребность в разработке методов непосредственного определения времени приработки на работающем объекте. Одним из них может быть метод акустической эмиссии. Связь между акустической эмиссией и шероховатостью поверхности была уставлена уже в ранних работах [2]. Следует сказать, что механизм приработки изучен недостаточно, всегда в первую очередь обращают внимание на ее прикладное значение. Однако очевидно, что, только зная причины явления, можно подобрать способы его контроля во времени. Использование в современных узлах трения керамических материалов еще более усиливает актуальность изучения приработки. Дело в том, что керамики, обладая такими весьма

полезными свойствами, как прочность, твердость, высокая износостойкость, способность работать при высокой температуре и в агрессивной среде, имеют существенно отрицательное свойство — хрупкость. Склонность керамик к неожиданному разрушению требует организации непрерывного контроля их свойств во время эксплуатации. Поэтому и приработка таких материалов должна проходить под непрерывным контролем.

Целью нашей работы было исследование механизма приработки при трении хрупких керамических материалов и определение информативных параметров, характеризующих степень ее завершенности непосредственно в процессе самого трения.

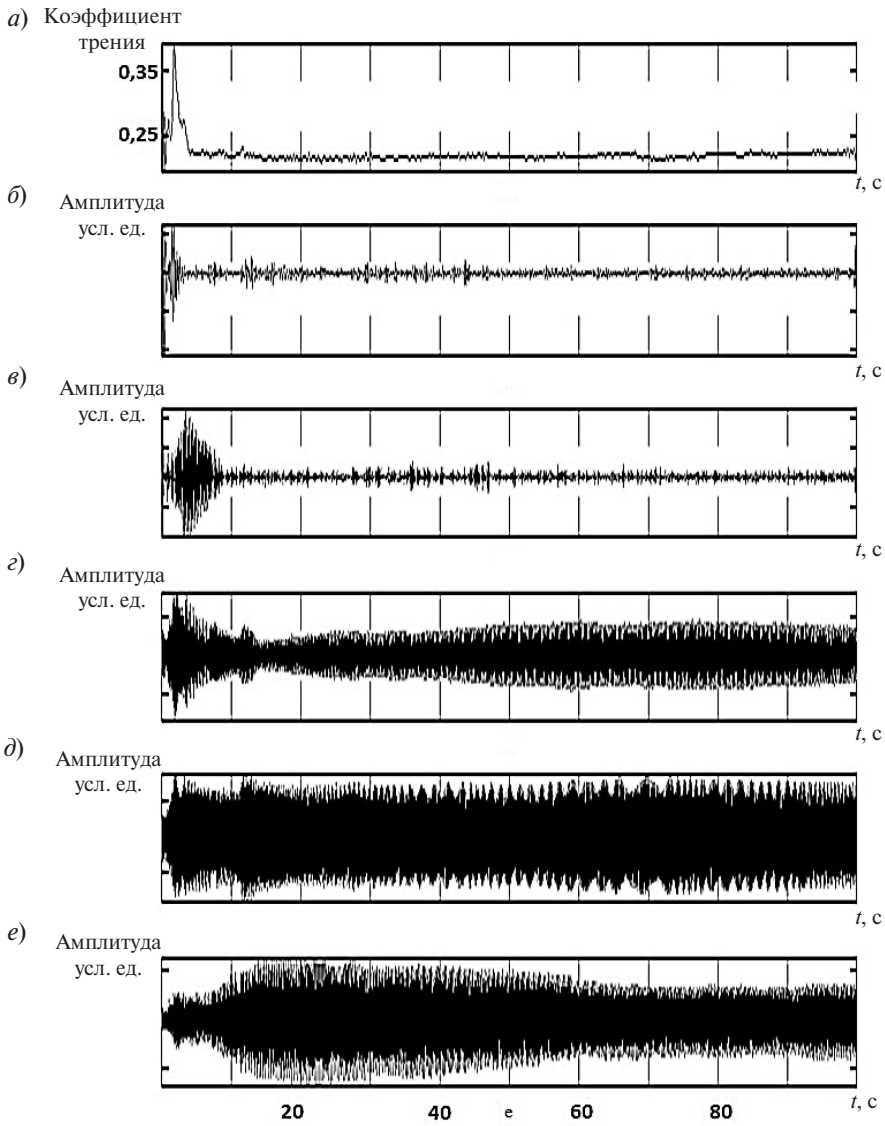
В работе использовалась керамика твердофазного спекания из карбида кремния. Этот материал часто используется в упорных подшипниках различных насосов. Трение проводилось по схеме «палец — диск» в паре между одинаковыми материалами в условиях смазки водой. Исходная шероховатость поверхности неподвижного образца до и после трения изучалась на профилометре TR-200 производства фирмы Qualitest.

Для регистрации акустической эмиссии использовался аппаратурный комплекс, включающий в себя контактные пьезопреобразователи типа П 113 из пьезокерамики ЦТС-19, рассчитанные на работу в диапазоне 0,2–1 МГц, усилительный тракт от прибора АФ-15, многофункциональную плату 6023E производства компании National Instruments (USA), обеспечивающую преобразование аналоговых измерительных сигналов в цифровые, и персональный компьютер. Аппаратурный комплекс позволяет регистрировать время появления АЭ события, его максимальную амплитуду A и длительность (количество осцилляций — S). Общий коэффициент усиления системы составлял 60 дБ. Акустическая эмиссия изучалась способом, описанным ранее в [3]. Полученные результаты анализировались в программе МАТЛАБ.

При трении во время взаимодействия шероховатостей контактирующих плоскостей возникают различные волновые явления, охватывающие большой диапазон частот, начиная от инфразвуковых и кончая ультразвуковыми. Анализ этих частот может дать информацию о размерах источников эмиссии волн и тем самым прояснить механизм взаимодействия поверхностных шероховатостей. Для экспериментальной регистрации волновых явлений можно воспользоваться стандартной акустоэмиссионной аппаратурой, которая в промышленном исполнении предусматривает регистрацию частот в диапазоне от 20 кГц до 2 МГц. Обычно при использовании АЭ для исследования разрушения конструкционных материалов стараются избежать шумов испытательного оборудования и ставят фильтры нижних частот. Если же из усилительного тракта убрать фильтры нижних частот, то можно существенно расширить диапазон в сторону нижних частот. В случае исследования разрушения поверхностных слоев материалов при трении низкочастотные взаимодействия являются основными. Можно предположить, что при трении будут иметь место не только волновые явления, связанные с взаимодействием отдельных шероховатостей (пятна контакта), но и более масштабные явления, связанные с волнистостью самих поверхностей. Все это имеет непосредственное отношение к приработке поверхностей.

Детальная картина волновых процессов, протекающих в поверхностных слоях материалов при трении, может быть проанализирована с помощью современного подхода на основе вейвлет–преобразования [4]. Специальные пакеты программ позволяют сразу увидеть не только разложение исходного сигнала по частотным составляющим, но и определить моменты появления и исчезновения той или иной частотной составляющей.

На рисунке приведены результаты вейвлет-анализа акустической эмиссии, возникающей в поверхностных слоях материалов при трении пары SiC/SiC в воде. В верхней части рисунка показана зависимость коэффициента трения от времени. Ниже приведены графики детализирующих коэффициентов для разных частот разложения. На рисунке видно, что начальная стадия трения (первые десять секунд) связана с низкочастотными колебаниями, которые близки к частоте вращения мотора трибометра и, по-видимому, обусловлены волнистостью трущихся поверхностей. При истирании неровностей, об-



Анализ приработки трибопары SiC/SiC в воде (нагрузка 75 Н; скорость скольжения 0,4 м/с), коэффициент трения (*а*) и детализирующие коэффициенты (их амплитуды) для частот разложения 10 (*б*), 20 (*в*), 40 (*г*), 80 (*д*) и 160 (*е*) Гц для вейвлет-преобразования

условленных волнистостью, поверхности становятся все более ровными и в работу вступают более мелкие выступы. Эти выступы обеспечивают более высокую частоту генерации АЭ. Интересно, что момент времени 20 с, соответствующий окончанию генерации АЭ на частоте 20 Гц, уже выходит за стадию резкого изменения коэффициента трения (10 с). Можно даже говорить о том, что коэффициент трения уже перешел в стабильную стадию, и это соответствует традиционным представлениям о завершении приработки [1].

На самом деле процесс приработки продолжается на более высоком структурном уровне и в конце концов, для данного конкретного примера, заканчивается на 70-й секунде, на частоте

Данные о шероховатости поверхности трения

Вид поверхности	R_a, мкм	R_z, мкм	Частота соударений шероховатостей, Гц
Исходная	1,6	4,9	50–100
После приработки в в воде	0,12	0,74	150–300

160 Гц. Далее детализирующий коэффициент принимает стабильное значение.

Посмотрим, как изменилась шероховатость поверхности в результате приработки. Данные об исходной шероховатости и шероховатости после приработки в воде приведены в таблице. Можно предположить, что исходная шероховатость останется примерно на сопоставимом уровне в первые 10 секунд трения. Считаем, что шероховатость поверхности SiC после приработки (по нашим данным — после 70 секунд) и далее остается постоянной. Параметры исследованных профилограмм показаны в таблице.

Шаг наиболее выступающих шероховатостей может быть определен, если известна опорная кривая. В нашей работе он определялся по верхней части опорной кривой, как это описано в статье [5]. Весьма вероятно, что при трении наиболее выступающие шероховатости обеспечивают частоту генерации АЭ. Эта частота может быть оценена, если известны шаг больших шероховатостей, длина дорожки трения и скорость скольжения. Все эти величины известны. Данные расчета приведены в таблице.

Оказалось, что частоты соударений шероховатостей очень близки к частотам разложения детализирующих коэффициентов, показанных на рисунке. Поэтому вейвлет-анализ процесса приработки может давать информацию о кинетике взаимодействия шероховатостей разных уровней в разные моменты времени. По-видимому, детальная картина процесса приработки материалов может быть получена только таким способом.

Использование акустической эмиссии с последующим вейвлет-анализом результатов дает детальную картину процесса приработки на уровне отдельных шероховатостей.

Время приработки, оцененное таким способом, значительно превышает значение, полученное по традиционному способу оценки времени приработки по стабилизации коэффициента трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10–08–00966-а) и Научной про граммы РАН под руководством академика И.Г. Горячевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комбалов, В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ[Текст] / В.С. Комбалов.— М.: Наука. 1974.— 112 с.

2. **Крагельский, И.В.** Возможность применения метода акустической эмиссии для оптимизации микрорельефа поверхностей трения [Текст] / И.В. Крагельский, В.М. Щавелин, Н.В. Гитис [и др.] // Трение и износ. —1984. Т. 5, № 5.— С. 773–778.

3. **Фадин, Ю.А.** Применение акустической эмиссии для оценки массового износа [Текст]/ Ю.А.Фадин // Трение и износ.— 2008.— Т. 29, № 1.— С. 29–32.

4. **Смоленцев, Н.К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB [Текст] / Н.К. Смоленцев.— М.: ДМК Пресс, 2005.— 304 с.

5. **Фадин, Ю.А.** Начальная стадия контакта хрупких тел при трении [Текст] / Ю.А. Фадин, О.Ф. Киреенко, О.С.Кузнецова [и др.] // Трение и износ.— 2011.— Т. 32, № 3.—С. 30–33.

УДК 62–97/-98: 621.224.346: 621.22–253: 621.311.212

В.В. Елистратов, М.А. Конищев, К.И. Давыдов

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОНАПОРНОГО БЛОКА МИКРО-ГЭС

Одно из наиболее эффективных направлений развития возобновляемой энергетики — это развитие малой гидроэнергетики с использованием низконапорной энергии небольших водотоков с помощью микро-ГЭС.

Возрастающая потребность в автономных микро-ГЭС связана с рядом факторов, в числе которых: удорожание органического топлива и стоимости энергии от традиционных энергоустановок; необходимость повышения качества энергоснабжения удаленных потребителей; повышение требований к экологической чистоте производства электроэнергии; задача снижения эксплуатационных расходов и др.

В связи с этим возникает необходимость в оптимизации проточного тракта и разработке новых, более совершенных конструкций микро-ГЭС, особенно работающих на низких (до 5 метров) напорах. Для этого нужны совместные теоретические расчеты параметров и элементов новых блоков и их энергогидравлические исследования в гидротурбинных лабораториях на экспериментальных стендах.

Объект исследований — низконапорный горизонтальный блок микро-ГЭС с осевым рабочим колесом. Применение вертикальных осевых турбин на низкие напоры приводит к увеличению гидравлических потерь в искривленном водопроводящем тракте, увеличению размеров и массы агрегата. Поэтому для низконапорных ($H = 2–5$ м) микро-ГЭС целесообразно использовать более быстроходные и экономичные горизонтальные капсульные агрегаты. Одно из главных преимуществ этих гидроагрегатов — наличие прямоосных подводящей и отсасывающей труб, в которых поток при движении через проточную часть турбины мало искривляется. Вследствие этого уменьшаются потери энергии и увеличивается пропускная способность.

Для исследований выбрано осевое поворотнолопастное рабочее колесо ПЛ984. Диаметр рабочего колеса $D_1 = 350$ мм. Рабочее колесо ПЛ984 имеет четыре лопасти с диапазоном изменения угла установки φ от -10 до $+15°$. Приведенные расход Q'_I и частота вращения n'_I для оптимального режима горизонтальной капсульной гидротурбины с рабочим колесом ПЛ984–35 [1] имеют следующие значения:

$$Q'_{I\text{опт}} = 1{,}2 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$n_{I\text{опт}} = 150 \text{ об/мин}; \ \eta_{\text{опт}} = 89{,}5 \ \%.$$

При проведении энергетических испытаний исследуемого низконапорного блока микро-ГЭС основными измеряемыми параметрами режима работы были:

уровень верхнего $H_{\text{вб}}$ и нижнего $H_{\text{вб}}$ бьефов, мм вод. ст.;

расход Q воды, пропускаемый турбиной, $\text{м}^3/\text{с}$;

частота n вращения вала агрегата, об/мин.;

момент M на валу, Н·м;

угол α_0 установки лопаток направляющего аппарата;

угол φ установки лопастей рабочего колеса.

Для измерений указанных параметров использованы современные измерительные преобразователи, обеспечивающие погрешность определения КПД около 0,3 %.

Цель энергетических испытаний — определение характеристик блока микро-ГЭС по значениям функций отклика в виде КПД и мощности и построение главной универсальной характеристики низконапорной гидротурбины.

Энергетические исследования низконапорного блока микро-ГЭС с рабочим колесом ПЛ984–35 проводились на экспериментальном стенде в лаборатории гидроэнергетических установок кафедры ВИЭГ СПбГПУ [2, 6].

Экспериментальный стенд включает напорный водосберегательный бак, подводящие трубопроводы, баки нижнего и верхнего бьефов,

модельную установку, отводящие трубопроводы, пульт управления. По своим основным техническим характеристикам стенд соответствует требованиям МЭК 60193 [3] и обеспечивает проведение испытаний с соблюдением основных критериев моделирования [4].

Диаметр рабочих колес испытываемых моделей равен 350 мм. При этом значение мощности двигателя-генератора соответствует значениям до 5,5 кВт. Диапазон изменения основных параметров в рабочей зоне составляет:

по расходу — от 0,05 до 0,3 м^3/с;

по напору — от 0,2 до 2,0 м;

по мощности — от 0,1 до 5,5 кВт.

Общая схема стенда с местами размещения контрольно-измерительной аппаратуры приведена на рис. 1. Особенностью стенда является то, что при снятии характеристик блока микро-ГЭС учитываются потери в подводящем и отводящем устройствах и определяются напор и КПД блока, а не турбины.

Для построения универсальной характеристики необходимо получить семейство рабочих характеристик для различных углов φ и α_0.

Испытания проводились в следующей последовательности: для фиксированного значения φ снимались рабочие характеристики при различных значениях α_0, затем изменялось значение φ и испытания повторялись.

Параметры режима работы установки определялись по следующим формулам:

напор блока $H_{бл}$ (принято, что скоростной напор на входе и на выходе примерно одинаковы)

$$H_{бл} = H_{вб} - H_{нб}; \qquad (1)$$

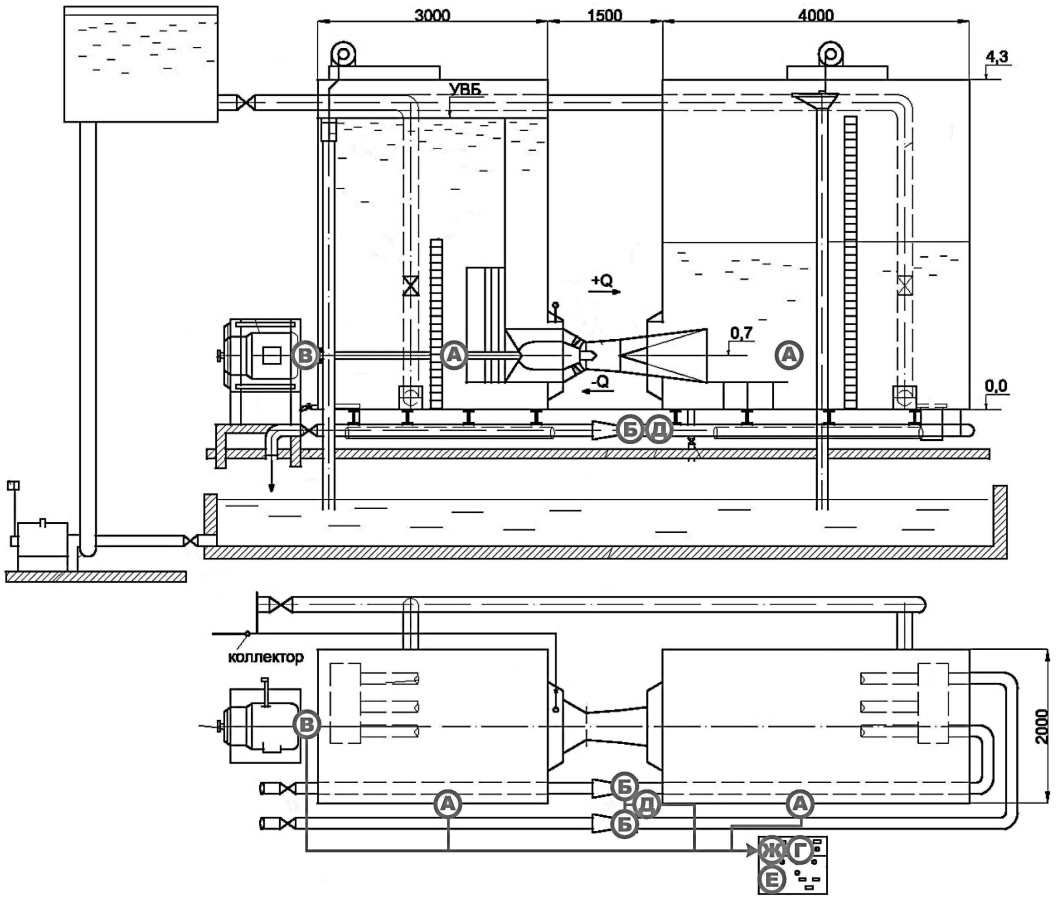


Рис. 1. Общая схема стенда испытаний микро-ГЭС с контрольно-измерительной аппаратурой:

А — емкостные преобразователи давления; Б — преобразователи дифференциального давления; В — вращающийся датчик крутящего момента; Г — частотный преобразователь; Д — аналого-цифровой преобразователь; Е — Пульт управления трехфазным асинхронным двигателем; Ж — персональный компьютер

расход

$$Q = K(\sqrt{H_{в1} - H_{н1}} + \sqrt{H_{в2} - H_{н2}}\ , \qquad (2)$$

где K — тарировочный коэффициент расходомера Вентури, $K = 1{,}723$;

коэффициент полезного действия

$$\eta_т = \frac{N_n}{N_в} = \frac{M\pi\frac{n}{30} + N_{мех}}{\gamma Q H_{бл}}. \qquad (3)$$

По результатам каждой серии энергетических испытаний построены рабочие характеристики блока микро-ГЭС в координатах $n_1' = f(Q_1')$ и $\eta = f(Q_1')$ при $\varphi = \text{const}$ и $\alpha_0 = \text{const}$.

В качестве примера результатов энергетических испытаний низконапорного блока микро-ГЭС с рабочим колесом ПЛ984–35 на рис. 2 приведены рабочие характеристики при $\varphi = -5$ и $\alpha_0 = (100–120)^\circ$.

По результатам испытаний была построена главная универсальная характеристика блока микро-ГЭС (рис. 3). Анализ универсальной характеристики показывает, что зона оптимума находится в интервале приведенных расходов $Q_1' = 0{,}9–1{,}55$ м^3/с и приведенных частот вращения $n_1' = 125–160$ об/мин. Максимальное значение КПД наблюдалось при $\varphi = -5$ и $\alpha_0 = 110^\circ$ и составило $\eta_{макс} = 89{,}0$ %.

По результатам анализа выполненных исследований было предложено компоновочное решение низконапорного блока микро-ГЭС, изображенное на рис. 4. Для сохранения прямолинейного характера движения воды предложено разместить в капсуле угловой повышающий редуктор, а генератор вынести за пределы водопроводящего тракта.

Данный блок микро-ГЭС мощностью 2–5 кВт предполагается использовать на низкие напоры $H = 2{,}5–5$ м. Произведен расчет параметров блока и диаметра рабочего колеса, определена зона работы гидротурбины для диаметров $D_1 = 200$ мм и $D_1 = 212$ мм.

Диаметр рабочего колеса определен по формуле

$$D_1 = \sqrt{\frac{N}{9{,}81\eta_т Q_1' H_р \sqrt{H_р}}}\ , \qquad (4)$$

где N — номинальная мощность гидротурбины, кВт; Q_1' — приведенный расход в расчетной точке, м^3/с; $H_р$ — рабочий напор гидротурбины, м; $\eta_т$ — КПД гидротурбины, соответствующий режиму ее работы в расчетной точке; $\eta_т = 88{,}0$ %.

Рабочий напор гидротурбины $H_р$ найден по следующей зависимости:

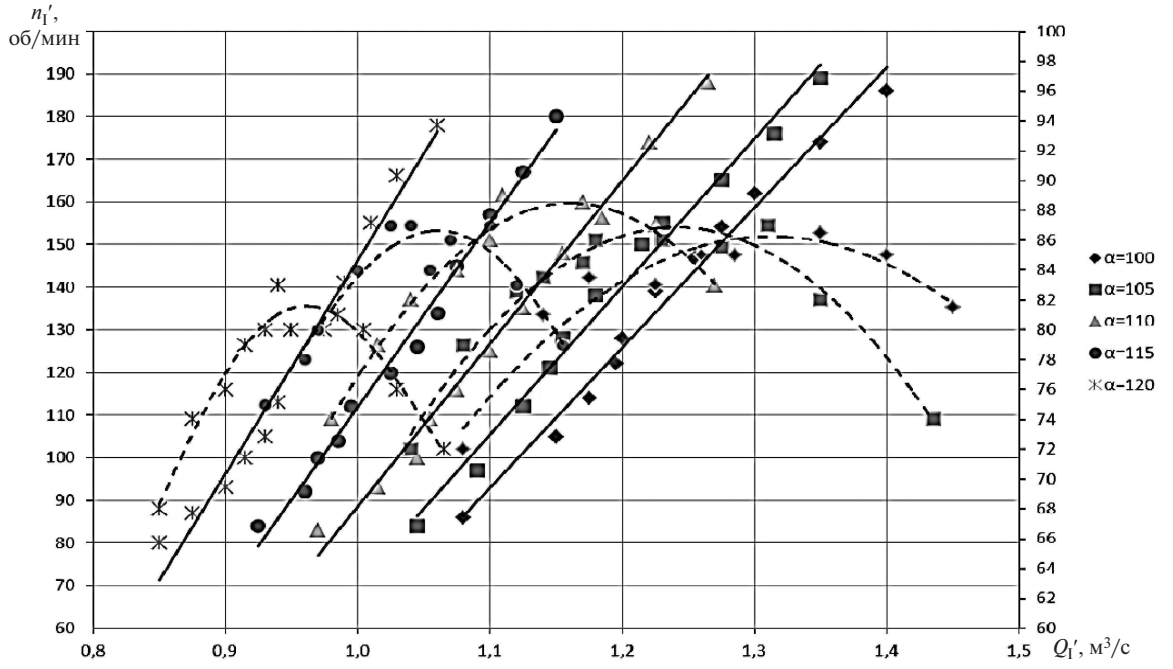


Рис. 2. Рабочие характеристики при $\varphi = -5$ и $\alpha_0 = 100–120^\circ$

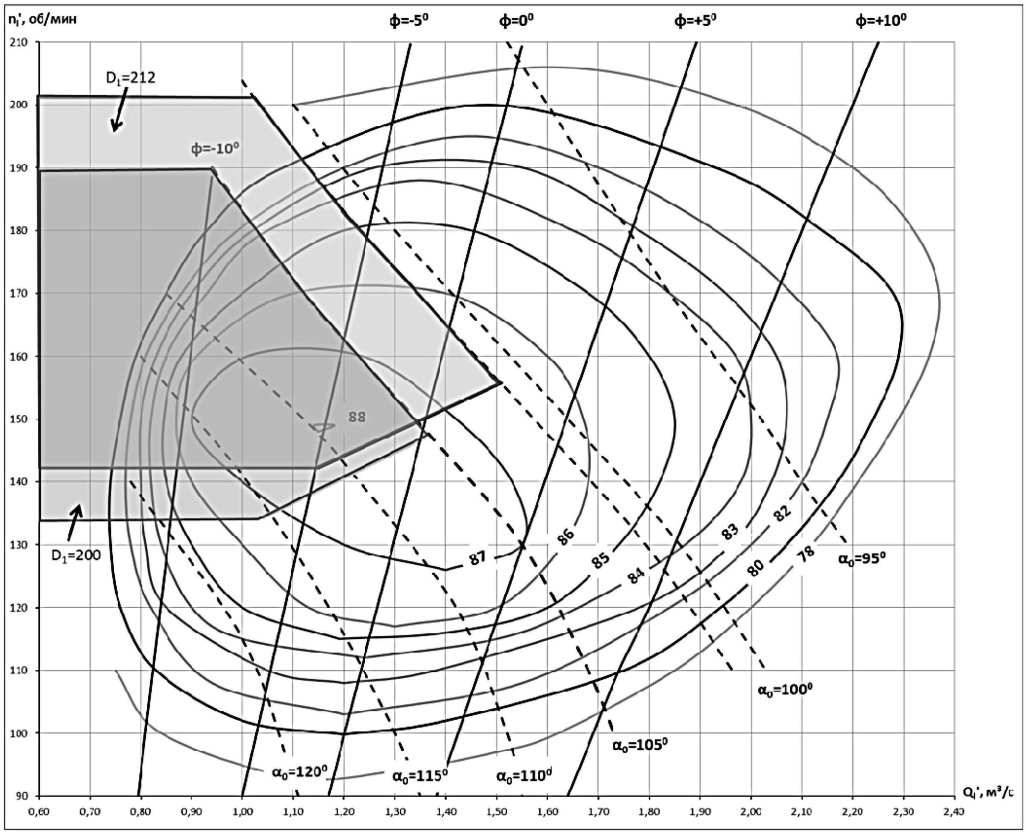


Рис. 3. Универсальная характеристика низконапорного блока микро-ГЭС с зонами работы для $D_1 = 200$ мм и $D_1 = 212$ мм

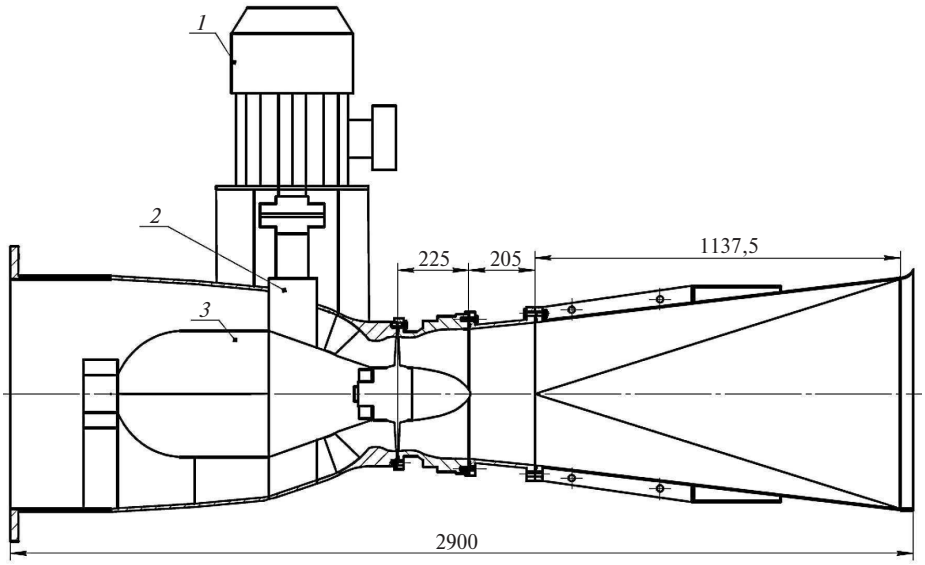


Рис. 4. Низконапорный блок микро-ГЭС: *1* — асинхронный двигатель; *2* — проходной статор; *3* — капсула с угловым редуктором

$$H_{\text{р}} = H_{\max} - \frac{1}{3}\left(H_{\max} - H_{\min}\right) =$$

$$= 5 - \frac{5-2{,}5}{3} = 4{,}17 \text{ м}. \qquad (5)$$

Значение приведенного расхода взято из универсальной характеристики, полученной в результате энергетических испытаний:

$$Q'_{\text{I}} = 1{,}3 Q'_{\text{Iопт}} = 1{,}6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчетные диаметры рабочего колеса для трех вариантов значений мощности блока микро-ГЭС — 2,5; 4 и 5 кВт — с учетом округления до стандартных значений составили соответственно 160, 200 и 212 мм.

Учитывая сложности изготовления рабочих колес малого диаметра, для дальнейшего рассмотрения оставлены варианты с D_1 = 200 мм и D_1 = 212 мм.

Увеличение диаметра ведет к возрастанию КПД и уменьшению приведенного расхода, а следовательно, к смещению расчетной точки.

Произведен пересчет приведенного расхода:

$$Q'_{a1} = 1{,}36 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \qquad Q'_{b1} = 1{,}51 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Частота вращения определена по формуле

$$n = \frac{n'_{1\text{опт}} \sqrt{H_{\text{р}}}}{D_1}, \qquad (6)$$

где $n'_{1\text{опт}}$ — оптимальная приведенная частота вращения турбины, определяемая по универсальной характеристике, $n'_{1\text{опт}} = 150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Таким образом:

$$n_a = 1531{,}74 \frac{\text{об}}{\text{мин}}; \qquad n_b = 1444{,}85 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Нормальная частота вращения принималась равной ближайшей большей синхронной частоте вращения генератора: в обоих случаях при числе пар полюсов p = 2 она равна $n = n_c$ = = 1500 об/мин.

Определены зоны работы турбины с рабочими колесами различного диаметра; они ограничены сверху и снизу по приведенной частоте вращения двумя горизонтальными линиями и соответствуют работе гидротурбины при минимальном и максимальном напорах.

Координаты (n'_{1P}, Q'_{1P}) точки P, соответствующие работе турбины при расчетном напоре и заданной мощности, определены по формуле (6):

$$n'_{a1P} = 146{,}91 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{a1P} = 1{,}36 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$n'_{b1P} = 155{,}73 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{b1P} = 1{,}51 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Аналогично определены координаты (n'_{1C}, Q'_{1C}) точки C, соответствующие работе турбины при максимальном напоре и заданной мощности:

$$n'_{a1C} = n'_{a1\text{м}\min} = 134{,}16 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{a1C} = 1{,}04 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$n'_{b1C} = n'_{b1\text{м}\min} = 142{,}21 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{b1C} = 1{,}15 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Далее по универсальной характеристике определена точка А, соответствующая работе турбины при минимальном напоре (пересечение линии α_0 = const через точку P с горизонтальной линией $n'_{1\text{м}\max}$ = const).

Таким образом, получено

$$n'_{a1A} = n'_{a1\text{м}\max} = 189{,}74 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{a1A} = 0{,}94 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$n'_{b1A} = n'_{b1\text{м}\max} = 201{,}12 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = \text{const};$$

$$Q'_{b1A} = 1{,}02 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

На основе полученных данных построены зоны работы турбины (рис. 3).

В результате исследований принято решение использовать для блока микро-ГЭС мощностью N = 4 кВт рабочее колесо диаметром D_1 = 200 мм с жесткозакрепленными лопастями при угле

установки $\varphi = -10^\circ$. Лопатки направляющего аппарата также жестко закрепляются в положении $\alpha_0 = 115^\circ$. Такое техническое исполнение с жестким закреплением рабочего колеса и направляющего аппарата обусловлено упрощением конструкции и удешевлением установки в целом, а также возможностью работы установки в автономном режиме. Несмотря на фиксированные угол установки лопастей рабочего колеса и угол установки направляющего аппарата, обеспечиваются достаточно высокие значения КПД блока микро-ГЭС при работе в требуемой зоне.

Статья подготовлена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК №02.740.11.0750) ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям» (ГК №16.516.11.6107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. **Виссарионов, В.И.** Перспективы использования реконструируемых низконапорных ГЭС в режимах ГЭС–ГАЭС [Текст] / В.И. Виссарионов, В.В. Елистратов, С.И. Поташник // Гидротехническое строительство.— 1989. № 10.

3. Международный код модельных приемо-сдаточных испытаний гидравлических турбин [Текст]: Рекомендации МЭК / МЭК.— Публикация 193.— Женева, 1965 г.— 54 с. Первое дополнение к публикации 193. Женева, 1974.— 21с.

4. **Малышев, В.М.** Модельные исследования гидротурбин [Текст] / В.М. Малышев.— Л.: Машиностроение, 1970.— 288 с.

5. Справочник конструктора гидротурбин [Текст] / Под ред. Н.Н. Ковалева.— Л.: Машиностроение, 1984.

6. Энергогидравлические исследования блока насосной станции с капсульными агрегатами в обратимых режимах работы [Текст]: Отчет о НИР / ЛПИ.— Л., 1986.— 73 с.

УДК 532:531

В.Н. Бухарцев, М.Р. Петриченко

ТРАНСЛЯЦИОННАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ФОРМУЛЫ ДЮПЮИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПРОМЕЖУТКА ВЫСАЧИВАНИЯ

Формула Дюпюи для средней скорости фильтрации в однородном грунте применима для равномерного (синоним: параллельноструйное) движения или для движения, близкого к равномерному. Широкое применение формулы Дюпюи в гидравлической теории фильтрации, в частности при расчетах неравномерного фильтрационного движения сквозь однородные грунтовые плотины, объясняется не столько устойчивостью традиции сколько соблазнительной точностью прогнозов: удается правдоподобно вычислять величину фильтрационного расхода и даже высоту промежутка высачивания. Правда, последнее требует искусственных приемов, но они также основаны на формуле Дюпюи. Альтернативой этим приемам служат точные гидромеханические решения, основанные на применении методов теории функций: используется отображение круговых и прямолинейных треугольников на круг и на верхнюю полуплоскость. Для отображающей функции получается дифференциальное уравнение с тремя регулярными особыми точками. Частные решения этого уравнения связаны некоторой группой преобразований [1]. Как показали Б.Б. Девисон и Н.Е. Кочин, групповые свойства решений уравнения Гаусса имеют приложение к теории фильтрационных потоков со свободной поверхностью [2].

Пусть H — глубина потока в сечении $x = 0$, h_0 — глубина фильтрационного потока в сечении $x = L$; $h_0 < h < H$ — глубина потока в любом

промежуточном сечении $0<x<L$, $h = h(x)$; q — фильтрационный расход на 1 м ширины перемычки; а также

$$\lambda = \frac{L}{H}; \quad \eta_0 = \frac{h_0}{H}, \quad 0 < \eta_0 < 1.$$

Тогда $l = \frac{H}{2\lambda}\left(1-\eta_0^2\right)$. Дифференциальное тождество Дюпюи для расхода сквозь прямоугольную перемычку, имеющее вид

$$l = -h\frac{dh}{dx}, \quad l = \frac{q}{k}, \qquad (1)$$

как известно, приводит к точным оценкам величины фильтрационного расхода. Конфигурация депрессионной кривой, прогнозируемая формулой (1), правдоподобна только для длинных (распластанных) перемычек (плотины) с длинными участками равномерного движения, удаленными от напорной грани и от точки выхода депрессионной кривой на низовой откос. В окрестности концов депрессионной кривой формула Дюпюи приводит к значительным погрешностям при вычислении ординат свободной поверхности фильтрационного потока.

Применение оператора сдвига [3] расширяет возможности формулы Дюпюи. Пусть

$$2l = -\exp\left(l\frac{d}{dx}\right)\left(\frac{dh^2}{dx}\right) = -\left(\frac{dh^2}{dx} + l\frac{d^2h^2}{dx^2} + \ldots.\right). \qquad (2)$$

Равенство (2) интерпретируется так. Если $\frac{dh^2}{dx} := y(x)$, то в силу (1) традиционная формула Дюпюи принимает вид: $2l = -y(x)$, а формула (2) получается из (1) сдвигом на l: $2l = -y(x+l)$. Иначе говоря, формула (1) задает линейный (по масштабу длины l) закон фильтрации, а равенство (2) постулирует зависимость градиента квадрата глубины от величины фильтрационного расхода. При малых значениях параметра $l = \frac{q}{k} = \frac{H}{2\lambda}\left(1-\eta_0^2\right)$ («длина фильтрации») оба тождества, (1) и (2), близки. Различие возникает при больших значениях длины фильтрации, т. е. в перемычках с $\frac{l}{H} = O(1)$.

Формулу (2) можно записать так:

$$-2l = f(x+l); \quad f(x) := \partial h^2(x), \qquad (2a)$$

где $\partial := \frac{d}{dx}$.

Значит, на глубину $h(x)$ выполняется разностное уравнение

$$h^2(x+l) - h^2(l) + 2lx = 0. \qquad (2b)$$

Справедлива следующая лемма: если $h^2(x) = H^2 - \frac{x}{L}\left(H^2 - h_0^2\right)$, то в силу (2b) $l = \frac{H^2 - h_0^2}{2L}$. Иначе говоря, (2) не противоречит формуле Дюпюи для расхода при любом постоянном значении $l > 0$. Равенство (2), ограниченное двумя первыми членами разложения справа, позволяет сформулировать задачу Коши о конфигурации депрессионной кривой:

$$l\frac{d^2h^2}{dx^2} + \frac{dh^2}{dx} = -2l, \quad x \in (0, L);$$

$$h(0) - H = \left(\frac{dh}{dx}\right)_{x=0} = 0. \qquad (3)$$

Для наглядности решения удобно использовать безразмерные переменные

$$\eta = \frac{h}{H} \in (0,1); \quad \xi = \frac{x}{L} \in (0,1);$$

$$\eta = \eta(\xi), \quad \eta(0) - 1 = \left(\frac{d\eta}{d\xi}\right)_{\xi=0} = 0$$

и безразмерные же параметры

$$\lambda = \frac{L}{H}; \quad \eta_0 = \frac{h_0}{H}; \quad \overline{\Delta} = \eta(1) - \eta_0.$$

В этих переменных задача Коши (3) принимает вид

$$\frac{d^2\eta^2}{d\xi^2} + \frac{2\lambda^2}{1-\eta_0^2}\frac{d\eta^2}{d\xi} = -2\lambda^2,$$
$$\eta(0) - 1 = \left(\frac{d\eta}{d\xi}\right)_{\xi=0} = 0. \qquad (4)$$

Решение задачи (4) имеет вид

$$\eta(\xi) =$$
$$= \sqrt{1 - \left(1-\eta_0^2\right)\xi + \frac{\left(1-\eta_0^2\right)^2}{2\lambda^2}\left(1 - \exp\left(-\frac{2\lambda^2\xi}{1-\eta_0^2}\right)\right)}. \qquad (5,a)$$

Это выражение совпадает с решением Дюпюи при $\lambda >> 1$ (длинная перемычка). Наоборот, для короткой перемычки

$$\eta(\xi) = \sqrt{1 - \lambda^2\xi^2}. \qquad (5,б)$$

В силу (5,*а*) относительная (в долях *H*) высота промежутка высачивания равна

$$\bar{\Delta} = \eta(1) - \eta_0 =$$

$$= \sqrt{\eta_0^2 + \frac{\left(1-\eta_0^2\right)^2}{2\lambda^2}\left(1 - \exp\left(-\frac{2\lambda^2}{1-\eta_0^2}\right)\right)} - \eta_0 > 0 \,. \quad (6)$$

Таким образом, справедливы следующие утверждения:

1. **При $\lambda >> 1$ высота промежутка высачивания мала и в пределе при $\lambda \to \infty$ будет $\bar{\Delta} \to +0$ (равномерно по $0 < \eta_0 < 1$).** В таблице приведены зависимости высоты промежутка высачивания от относительной (в долях *H*) длины перемычки при различных значениях глубины наполнения нижнего бьефа, $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}(\lambda, \eta_0)$, полученные по формуле (6). Рис. 1 иллюстрирует результаты расчета по формуле (6) высоты промежутка высачивания в зависимости от длины λ перемычки при переменной глубине η_0 наполнения нижнего бьефа. Как видно, увеличение длины перемычки уменьшает высоту промежутка высачивания.

2). **При $\lambda >> 1$ (практически при $\lambda \geq 3$) формула (5) не отличается от формулы Дюпюи для ординат депрессионной кривой. Исключение составляет створ $x = 0$ ($\xi = 0$), в котором, в отличие от решения Дюпюи, касательная к депрессионной кривой перпендикулярна вертикальной верховой грани**. На рис. 2 приведены безразмерные ординаты свободной поверхности фильтрационного потока

Депрессионные зависимости $\Delta(\xi)$ для перемычек различной относительной длины λ при различных относительных глубинах η_0 наполнения нижнего бьефа

Относит. координата сечения потока $\xi = x/L$	Высота Δ промежутка высачивания		
	$\eta_0 = 0$	$\eta_0 = 0{,}5$	$\eta_0 = 0{,}7$
При $\lambda = 0{,}5$			
0	1,0000	1,0000	–
0,1	0,9987	0,9997	–
0,2	0,9954	0,9956	–
0,3	0,9892	0,9894	–
0,4	0,9810	0,9815	–
0,5	0,9707	0,9715	–
0,6	0,9583	0,9596	–
0,7	0,9437	0,9458	–
0,8	0,9270	0,9301	–
0,9	0,9082	0,9124	–
1,0	0,8871	0,8930	–
$\bar{\Delta} =$	0,8871	0,3930	–
При $\lambda = 1{,}0$			
0	1,0000	1,0000	1,0000
0,1	0,9953	0,9954	0,9956
0,2	0,9951	0,9829	0,9842
0,3	0,9620	0,9643	0,9681

Окончание табл.

Относит. координата сечения потока $\xi = x/L$	Высота Δ промежутка высачивания		
	$\eta_0 = 0$	$\eta_0 = 0{,}5$	$\eta_0 = 0{,}7$
0,4	0,9356	0,9404	0,9421
0,5	0,9034	0,9122	0,9256
0,6	0,8656	0,8800	0,9009
0,7	0,8226	0,8442	0,8744
0,8	0,7739	0,8049	0,8464
0,9	0,7192	0,7620	0,8168
1,0	0,6575	0,7153	0,7771
$\overline{\Delta} =$	0,6575	0,2153	0,0771
При $\lambda = 3{,}0$			
0	1,0000	–	1,0000
0,1	0,9728	–	0,9813
0,2	0,9241	–	0,9552
0,3	0,8690	–	0,9281
0,4	0,8096	–	0,9002
0,5	0,7453	–	0,8714
0,6	0,6749	–	0,8415
0,7	0,5962	–	0,8108
0,8	0,5055	–	0,7787
0,9	0,3944	–	0,7452
1,0	0,2357	–	0,7102
$\overline{\Delta} =$	0,2357	–	0,0102
При $\lambda >> 1$ *(параболы Дюпюи)*			
0	1,0000	1,0000	1,0000
0,1	0,9486	0,9617	0,9741
0,2	0,8944	0,9219	0,9476
0,3	0,8366	0,8803	0,9263
0,4	0,7745	0,8360	0,8922
0,5	0,7071	0,7906	0,8631
0,6	0,6324	0,7416	0,8331
0,7	0,5477	0,6892	0,8018
0,8	0,4472	0,6324	0,7694
0,9	0,3162	0,5700	0,7352
1,0	0,0000	0,5000	0,7000
$\overline{\Delta} =$	0,0000	0,0000	0,0000

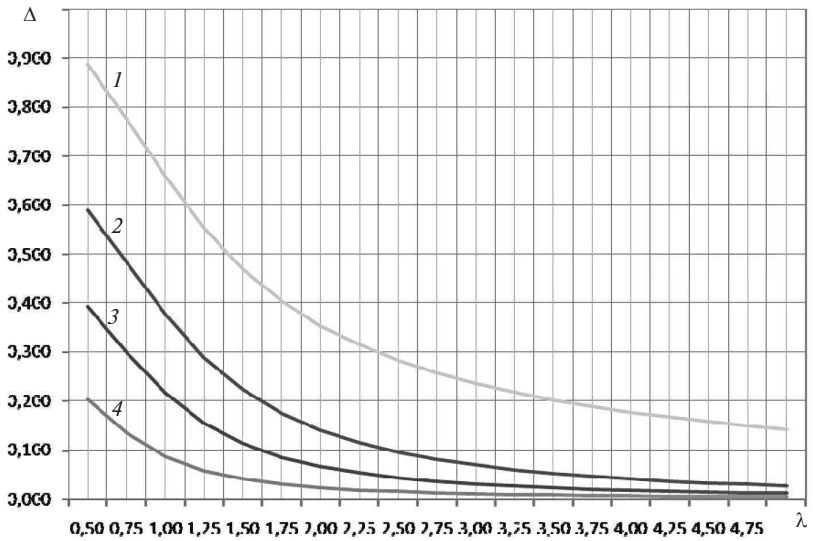


Рис. 1. Результаты расчета по формуле (6) высоты промежутка высачивания в зависимости от длины λ перемычки при переменной глубине наполнения нижнего бьефа η_0
(*1* —0; *2* —0,3; *3* — 0,5; *4* —0,7)

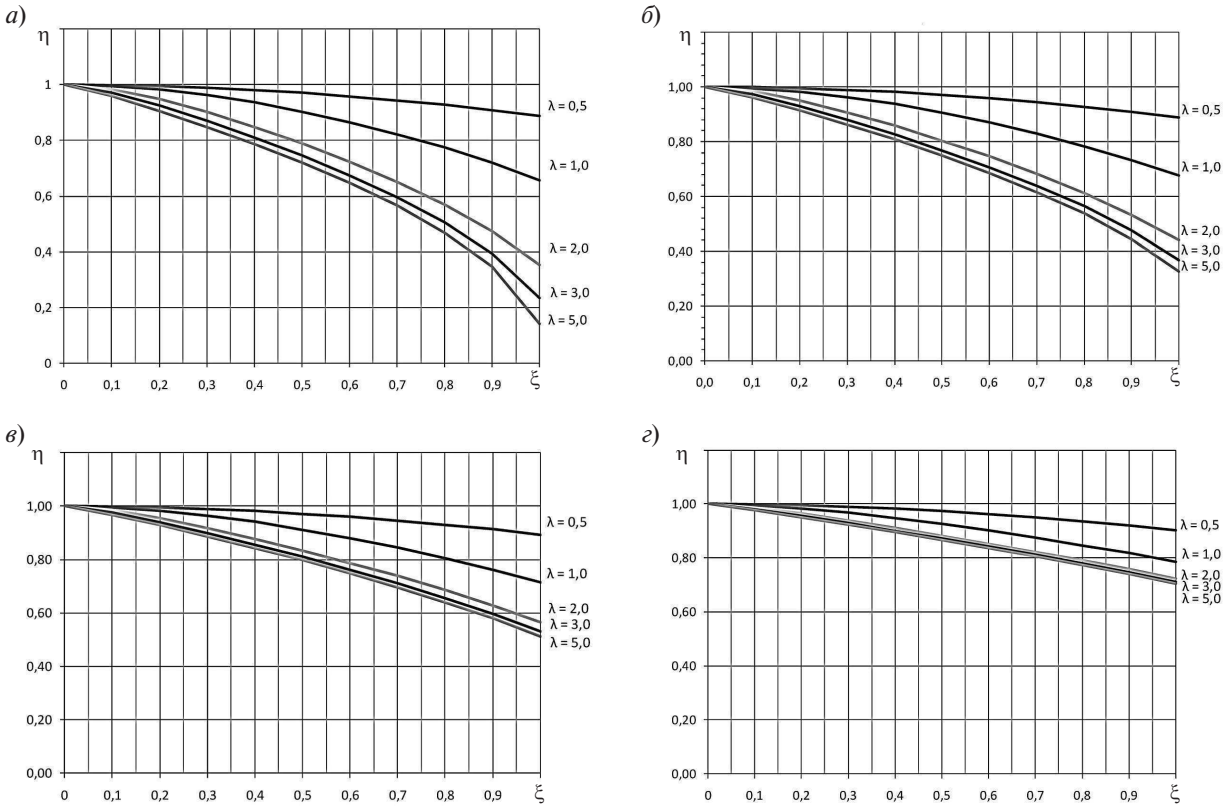


Рис. 2. Безразмерные ординаты свободной поверхности фильтрационного потока $\eta = \eta(\xi;\ \lambda,\ \eta_0)$ для λ = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 и при разных значениях постоянной глубины наполнения нижнего
а — $h_0 = 0$ $(\eta_0 = 0)$; *б* — $h_0 = 0{,}3H$ $(\eta_0 = 0{,}3)$; *в* — $h_0 = 0{,}5H$ $(\eta_0 = 0{,}5)$; *г* — $h_0 = 0{,}7H$ $(\eta_0 = 0{,}7)$

$\eta = \eta(\xi;\ \lambda,\ \eta_0)$, при различных длинах перемычки $\lambda = 0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}0;\ 3{,}0;\ 5{,}0$ и различных глубинах наполнения нижнего бьефа $\eta_0 = (0;\ 0{,}3;\ 0{,}5;\ 0{,}7)$.

По мере увеличения λ происходит сближение параболы Дюпюи и депрессионной кривой (5) равномерно относительно глубины наполнения нижнего бьефа:

$$\forall \eta_0 \in (0,1);$$

$$\forall \varepsilon > 0,\ \exists \Lambda >> 1 \Rightarrow 0 < \eta_{(5)} - \eta_D < \varepsilon; \quad \lambda > \Lambda.$$

3. Наконец, равномерно по $0<\xi<1$ при $\lambda>0$ выполняется условие $\eta \underset{\eta_0 \to 1-0}{\to} 1-0$; точно так же равномерно по $\lambda>0$ выполняется условие $\Delta \underset{\eta_0 \to 1-0}{\to} +0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Уиттекер, Е.Т.** Курс современного анализа. Ч. 2 [Текст] / Е.Т. Уиттекер, Дж.Н. Ватсон.— М.: Физматлит, 1962.— С. 65–90.

2. **Полубаринова-Кочина, П.Я.** Теория движения грунтовых вод [Текст] / П.Я. Полубаринова-Кочина.— М.: Наука, 1977.— С. 326–345.

3. **Белов, В.В.** Сборник задач по дополнительным главам математической физики [Текст] / В.В. Белов, Е.М. Воробьев.— М.: Высшая школа, 1978.— С. 21–23.

УДК 538.9:532.538:539.539

С.Н. Колгатин

КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА, БИНОДАЛЬ, СПИНОДАЛЬ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ УРАВНЕНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

Уравнение Ван-дер-Ваальса традиционно и закономерно излагается в курсе общей физики. Как правило, преподаватели ограничиваются общей идеей о взаимодействии молекул и их конечном объеме. Между тем упомянутое уравнение дает возможность продемонстрировать несколько концептуально важных физических понятий, которые необходимо знать будущему специалисту, таких, как бинодаль, спинодаль, критические параметры, метастабильная область. Напрямую эти понятия не связаны с уравнением Ван-дер-Ваальса, однако могут быть успешно объяснены с его помощью на доступном для понимания студентов уровне. В предлагаемой статье делается попытка дать краткий обзор вопроса на несколько более высоком уровне, чем лекционное изложение, с тем чтобы у преподавателя была возможность самостоятельно отобрать необходимый ему для построения курса материал. Статья также полезна ученым или специалистам, которым рассматриваемые вопросы интересны с точки зрения их практической работы.

Поправки Ван-дер-Ваальса

Большинство технических процессов описывается в рамках термодинамики, когда системе удается приписать определенные термодинамические параметры — плотность, температуру, давление и т. п. Даже в случае неоднородных в пространстве и нестационарных процессов, как правило, удается воспользоваться приближением локального термодинамического равновесия, когда можно приписать определенные термодинамические параметры физически малому объему* в течение промежутка времени, малого по сравнению с масштабом общего времени изменения этих параметров. Для описания системы, находящейся в состоянии локального термодинамического равновесия, первоочеред-

* Физически малый — это объем, содержащий достаточное количество атомов, чтобы можно было провести осреднение, и в то же время настолько небольшой, чтобы можно было считать осредненную характеристику (скажем, температуру или концентрацию атомов) в пределах этого объема постоянной.

ную роль играют уравнения состояния (в дальнейшем — УС) — соотношения, дающие возможность определять одни термодинамические параметры через другие. Можно, например, выражать давление p и энергию ε через молярный объем $V = \mu/\rho$ и температуру T: $p(V,T)$ (термическое уравнение) и $\varepsilon(V,T)$ (калорическое УС).

Простейшим и хорошо известным из школьного курса физики термическим уравнением состояния является уравнение Клапейрона — Менделеева для идеального газа

$$pV = RT\,, \qquad (1)$$

где $R = 8314$Дж/(кмоль·К) —универсальная газовая постоянная. Широко известно также калорическое уравнение для одноатомного газа, следующее из кинетического определения температуры:

$$\varepsilon = \frac{3}{2}RT\,. \qquad (2)$$

Изотермы идеального газа на плоскости (p, V) представляют собой гиперболы.

С точки зрения теоретической физики термическое и калорическое уравнения идеального газа можно получить, к примеру, из распределения Гиббса, если предположить, что вся энергия системы из точечных атомов — чисто кинетическая. При учете конечного размера атомов из доступного объема, очевидно, следует исключить некоторую часть, занимаемую самими частицами:

$$P(V-b) = RT\,.$$

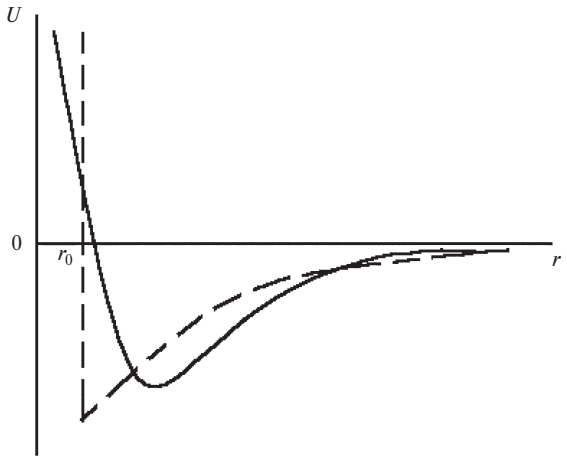


Рис. 1. Потенциал взаимодействия двух молекул (сплошная кривая) и его аппроксимация в приближении Ван-дер-Ваальса (пунктир)

При дальнейшем уточнении УС следует принять во внимание силы притяжения, действующие между атомами. В приближении парного взаимодействия его потенциал обычно аппроксимируется формулой Ленарда — Джонса (или подобной). График этого потенциала в зависимости от расстояния между молекулами приведен на рис. 1 (сплошная кривая). Если ограничиться моделью твердых шаров, притягивающихся друг к другу на расстоянии, то ближайшую к оси ординат часть графика необходимо заменить вертикальной прямой; в этом случае при достижении расстояния r_0 на атомы будет действовать бесконечно большая сила отталкивания. Форма аппроксимации второй ветви не играет большой роли, если считать все молекулы одинаковыми и учитывать только парные взаимодействия. Наличие сил притяжения приводит к появлению «внутреннего давления», т. е. силы, действующей на молекулу пристеночного слоя*.

Реальный газ оказывается как бы заключенным в упругую оболочку, как следствие — внешнее давление**, необходимое для удержания газа в заданном объеме V, оказывается меньшим, чем для газа с невзаимодействующими молекулами:

$$P_{\text{внешн}} = P = P_{\text{ид}} - P_{\text{внутр}} = \frac{RT}{V-b} - P_{\text{внутр}}\,,$$

или

$$P + P_{\text{внутр}} = \frac{RT}{V-b}\,. \qquad (3)$$

Существует множество способов учета поправки на взаимодействие молекул. Не самый удачный с количественной точки зрения способ Ван-дер-Ваальса исходит из первого, очевидного, предположения, что сила, которая действует на молекулу, находящуюся на границе объема, тем больше, чем больше число молекул (1-й фактор) и чем больше число молекул в самом пристеночном слое (2-й фактор). Второе предположение не очевидно и не совсем правильно: и первый, и второй факторы приводят к прямой пропорциональности внутреннего

* Силы притяжения, действующие на молекулу в объеме жидкости, взаимно компенсируются из-за большого числа молекул и их изотропного распределения по объему.

** В рамках термодинамики давления вне и внутри системы равны между собой: $P_{\text{внешн}} = P$.

давления числу молекул на единицу объема (или концентрации n): $P_{\text{внутр}} \sim n_{\text{внутр}} = n = \frac{N}{V}$ и $P_{\text{внутр}} \sim n_{\text{пристен}} = n = \frac{N}{V}$. И далее предполагается простое перемножение факторов $P_{\text{внутр}} \sim$ $\sim n_{\text{внутр}}\ n_{\text{пристен}} = n^2 \sim \frac{1}{V^2}$. Вводя коэффициент пропорциональности a, приходим к уравнению

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT\ . \qquad (4)$$

Значение константы a, учитывающей силы притяжения между молекулами, зависит от выбранного вида зависимости для потенциала сил притяжения (правый участок пунктирной кривой на рис. 1).

Уравнение Ван-дер-Ваальса количественно плохо совпадает с экспериментальными данными, по крайней мере, в более или менее широком интервале плотностей и температур. Тем не менее это уравнение дает возможность проиллюстрировать множество интересных физических явлений, имеющих место и для других, более сложных и теоретически обоснованных уравнений состояния. Рассмотрим некоторые из этих явлений, опираясь на уравнение Ван-дер-Ваальса.

Изотермы газа Ван-дер-Ваальса и экспериментальные изотермы реального газа

На рис. 2 приведены изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса в осях (p, V).

При высоких температурах ван-дер-ваальсовские кривые совпадают с изотермами идеального газа (кривая *4*). При более низких температурах на изотермах появляются характерные горбы (кривые *1*, *2*). При очень низких температурах минимум по давлению оказывается даже отрицательным (кривая *1*). Этому факту удается придать физический смысл, если принять, что отрицательное давление соответствует растяжению жидкости (в противоположность положительному, отвечающему всестороннему сжатию).

Кривые первого и второго типов (с горбами и без) разграничивает изотерма с точкой перегиба (кривая *3* на рис. 2). Этой изотерме соответствует критическая температура T_K, а давление и объем в точке перегиба P_K и V_K называют критическими. При температуре, большей критической, переход от газа к плотному жидкоподобному фазовому состоянию происходит плавно, без образования капелек, через непрерывный ряд промежуточных состояний. Для уравнения Ван-дер-Ваальса критические параметры можно выразить через константы a и b (подробный вывод этих соотношений содержится, например, в [1]):

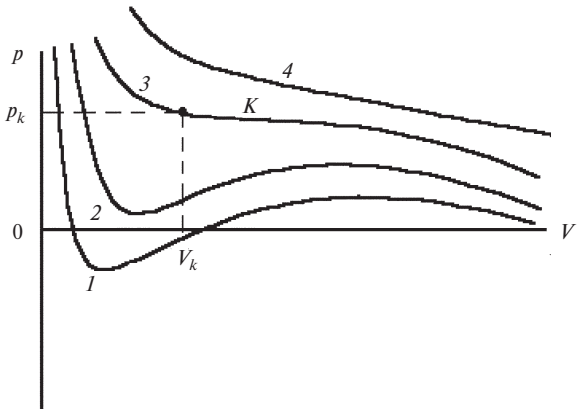


Рис. 2. Изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса

$$V_K = 3b;\ p_K = \frac{a}{27\,b^2};\ T_K = \frac{8a}{27\,R\,b}. \qquad (5)$$

Важность определения действительных (то есть не связанных с уравнением Ван-дер-Ваальса) критических параметров становится очевидной при рассмотрении так называемого *закона соответственных состояний*. Введем «приведенные» давление, объем и температуру:

$$\varphi = \frac{V}{V_K};\ \pi = \frac{p}{p_K};\ \tau = \frac{T}{T_K}.$$

Пользуясь соотношениями (5), можно выразить обычные параметры через приведенные — $V = 3b\varphi$; $p = \frac{a\pi}{27b^2}$; $T = \frac{8a\tau}{27Rb}$, а затем подставить их в уравнение (4). В результате в приведенных параметрах получим

$$\left(\pi + 3\varphi^2\right)\left(\varphi - \frac{1}{3}\right) = \frac{8\tau}{3}.$$

Это приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса не содержит индивидуальных констант, что наводит на мысль (впрочем, пока не нашедшую подтверждения) о существовании общего для всех веществ УРС. Закон соответственных со-

стояний гласит, что если два вещества находятся в состоянии с одинаковыми φ и τ, то и π у них одинаковое. Этот закон не выполняется ни для одного реального вещества. Несмотря на это, запись УРС в приведенных параметрах имеет большой смысл, так как благодаря ему для веществ с близким химическим составом удается хотя бы в первом приближении пользоваться одними и теми же соотношениями для давления и энергии.

Поведение вещества в критической точке можно наблюдать в хорошо известном эксперименте. Для этого нужно взять стеклянную ампулу объемом V_A и запаять в ней такую массу жидкости M, чтобы плотность $\rho = M/V_A$ примерно соответствовала критической (объем жидкости должен быть меньше, чем у ампулы). При атмосферном давлении хорошо визуально наблюдается резкая граница между жидкостью и паром. При нагревании вещества в сосуде давление внутри будет расти и в какой-то момент достигнет критического. При дальнейшем нагреве и росте давления различие между жидкостью и паром полностью пропадает, о чем можно судить по исчезновению границы раздела между ними; при этом вещество внутри ампулы становится прозрачным и выглядит совершенно однородно. При прохождении критической точки весь объем на короткое время становится непрозрачным, «затуманивается». На фотографиях можно различить крупномасштабную структуру неоднородностей, напоминающую турбулентность. Появление этих неоднородностей, связанное с потерей термодинамической устойчивости и быстрым (практически — взрывным) переходом к новому фазовому состоянию, вызывает сильное рассеяние света, получившее название *критической опалесценции Смолуховского*.

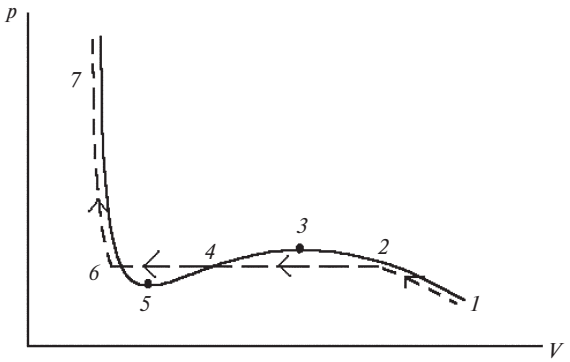


Рис. 3. Сравнение изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса (сплошная кривая) с экспериментальной (пунктир)

Сопоставим полученные из уравнения Ван-дер-Ваальса расчетные изотермы с экспериментальными. Если достаточно медленно (критерий медленности будет сформулирован ниже) изотермически сжимать газ начиная от большого объема, то первоначально экспериментальная изотерма (пунктир) совпадает с ван-дер-ваальсовской, показанной сплошной кривой (участок *1–2* на рис. 3).

При достижении некоторой точки, помеченной на рисунке цифрой *2*, реальная и теоретическая кривые расходятся; в эксперименте в этот момент наблюдается появление в газе мельчайших капелек жидкости (то есть начинается конденсация или образование тумана). При дальнейшем сжатии (от точки *2* к *6*) давление на реальной изотерме не меняется, а количество жидкости в двухфазной смеси неуклонно растет. С некоторой долей условности можно считать, что в точке *4* происходит смена «тумана» (то есть пара с капельками жидкости) на «кипяток» (жидкость с пузырьками пара). Постоянное давление, соответствующее участку *2–4–6*, называется давлением насыщенного пара, или давлением насыщения. Наконец, при достижении точки *6* весь пар оказывается сконденсированным. Участок *6–7* качественно описывает сжатие однородной жидкой фазы, но количественно особенно плохо соответствует эксперименту.

Бинодаль, спинодаль и метастабильная область

Интересно отметить, что при быстрых процессах (критерий быстроты будет обсужден ниже) удается реализовать участки теоретических изотерм *2–3* и *5–6*. Первый участок (*2–3*) представляет состояние пересыщенного пара, когда давление оказывается выше равновесного, соответсвующего участку *2–4–6*, а появления капелек (туман) тем не менее не наблюдается. Второй участок (*5–6*) соответсвует перегретой или растянутой жидкости, которая «проскочила» момент образования пузырьков и может оставаться однородной в течение некоторого времени. Участок *3–5* совершенно невозможно реализовать: в случае $\frac{\partial p}{\partial V} > 0$ состояние вещества будет неустойчивым в том смысле, что случайное

флуктуационное возникновение зародышей новой фазы приведет к их быстрому росту даже при бесконечно малых отклонениях от первоначального неустойчивого равновесия. Термодинамическое состояние такого вещества уже нельзя описывать в рамках модели локального термодинамического равновесия.

Соединим на плоскости (p, V) все точки типа *2* и типа *5* на ван-дер-ваальсовских изотермах с критической (на рис. 4 критическая точка помечена буквой *K*). Получившаяся таким образом кривая (кривая, помеченная как *Bi* на рис. 4) разделяет область однофазных состояний и область равновесного сосуществования пара и жидкости. Эта граница двухфазной области называется *бинодалью*.

Соединив точки ван-дер-ваальсовских изотерм типа *3* и *5* на рис. 3, получим так называемую «кривую потери термодинамической устойчивости», или *спинодаль*, помеченную символом *Spi* на рис. 4. Между кривыми *1* и *2* лежит *метастабильная область* (на рис. 4 она заштрихована). В однофазной области, лежащей в координатах (p, V) выше бинодали, состояние вещества абсолютно устойчиво в том смысле, что любой возникший в жидкости пузырек пара схлопнется, а любая капелька, попавшая в пар, полностью испарится. Состояние вещества внутри метастабильной области можно назвать относительно устойчивым: при возникновении значительной поверхности противоположной фазы начинается быстрый и необратимый фазовый переход; однако этот процесс требует некоторой «активации», а относительно малые флуктуации термодинамических параметров затухают.

Будем характеризовать глубину возможного проникновения в метастабильную область и приближения к границе термодинамической устойчивости для пара *пересыщением* — отношением давления при данной температуре к давлению насыщенного пара, а для жидкости — *перегревом*, т. е. отношением температуры к обычной температуре кипения при данном давлении. Предположим, что в процессе изотермического сжатия или расширения пройдена бинодаль и вещество оказалось в метастабильной области. Тогда возможны несколько вариантов поведения системы. Один из них реализуется, если в веществе имеется достаточное количество посторонних примесей. Частицы

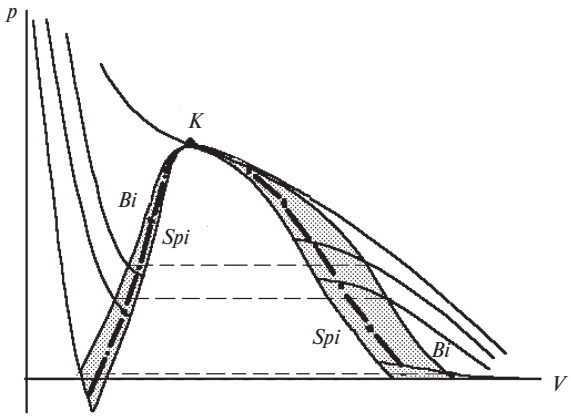


Рис. 4. Изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса (сплошные черные кривые), участки экспериментальных изотерм внутри двухфазной области (пунктиры), бинодаль (*Bi*) и спинодаль (*Spi*), достижимая граница метастабильной области (штрих-пунктир) и метастабильная область (заштрихована)

этих примесей могут послужить центрами для образования новой фазы. Со стороны большого объема (малой плотности) в качестве таких центров конденсации может выступать, к примеру, взвешенная в воздухе пыль. При обратном процессе, известном как вскипание, центрами парообразования почти всегда служат имеющиеся в жидкости пузырьки посторонних газов, ионы и т. п. Иногда роль «затравки» при кипении играют пузырьки пара той же жидкости, образовавшиеся на мелких неоднородностях (трещины, царапины) дна или стенок сосуда. Мельчайшие частицы новой фазы получили название «зародышей», а описанный выше процесс их возникновения на посторонних центрах — «гетерогенного зародышеобразования».

Процесс гетерогенного зародышеобразования будет затруднен в двух случаях. Во-первых, если заранее позаботиться об удалении посторонних центров. Например, можно «дегазировать» дистиллированную воду при помощи длительного кипячения, а затем проводить нагрев предварительно остуженной жидкости в стеклянной колбе с хорошо отполированными стенками, на которых нет ни трещин, ни царапин. В результате удается нагреть воду при атмосферном давлении без кипения до ~130 °C. Во-вторых, можно проводить процесс сжатия пара или расширения жидкости настолько бы-

стро, что процессы гетерогенного зародышеобразования, требующие некоторого времени «на раскачку» (например, на случайное образование и рост зародышей или на доставку новых порций жидкости для превращения ее в пар), просто не будут успевать отслеживать изменения температуры и плотности. Теоретически можно провести расширение столь быстро, чтобы достичь спинодали. При пересечении спинодали должен произойти взрывной переход от метастабильного состояния к равновесному, двухфазному. Характер этого процесса должен, по-видимому, качественно напоминать описанный выше переход через критическую точку, где, по выражению В.П. Скрипова [2], «спинодаль выходит из глубины на доступную наблюдению поверхность».

Однако достичь кривой термодинамической устойчивости весьма сложно даже для сверхбыстрых процессов. Чтобы на качественном уровне понять последнее обстоятельство, следует учесть, что зародыши новой фазы из-за существования поверхностного натяжения образуются в виде либо капелек (при конденсации), либо пузырьков (при кипении). Из формулы Лапласа для давления над искривленной поверхностью жидкости [1] следует, что внутри пузырька радиусом R давление всегда меньше внешнего на величину $\frac{\sigma}{2R}$ (σ — коэффициент поверхностного натяжения), а над поверхностью капельки на такую же величину больше. Как следствие, образовавшаяся при достижении внешним давлением значения насыщения капелька тут же разлетится на составившие ее молекулы, а возникший при достижении обычной температуры кипения пузырек пара схлопнется из-за разности давлений в сосуществующих фазах. Выросший до определенного размера зародыш имеет шансы продолжить рост (при $R \to \infty$ лапласовская поправка стремится к нулю), но процесс этот маловероятен — молекулы должны «случайно» удерживаться вместе достаточно долго. Поэтому возникновение жизнеспособного зародыша должно сопровождаться преодолением некоторого энергетического барьера. Величина этого барьера быстро уменьшается, а связанная с ней вероятность возникновения критического пузырька резко возрастает по мере продвижения в глубину метастабильной области.

В конце концов метастабильное вещество приходит к состоянию, когда в его объеме в результате флуктуаций ежесекундно образуется достаточное для полного снятия пересыщения количество зародышей. При этом начинается процесс интенсивного фазового перехода по всему объему вещества, а метастабильное вещество за короткое время превращается в двухфазную смесь.

Теория гомогенного зародышеобразования дает возможность рассчитать максимально возможное при заданной температуре пересыщение или достижимый при данном давлении перегрев. Совокупность таких параметров можно изобразить в виде кривой на плоскости (p, V), называемой *границей метастабильной области*. Граница метастабильной области лежит между бинодалью и спинодалью. Положение границы метастабильной области, вообще говоря, должно зависеть от характерной длительности процесса, так как для развития и роста зародышей нужно некоторое время. Однако, если учесть тот факт, что время снятия больших пересыщений или перегревов оказывается на практике равным 10^{-7}—10^{-6}с для жидкости и 10^{-4}—10^{-5}с для пара [2], а характерные масштабы большинства физических процессов, описываемых на основе термодинамического подхода, существенно больше, то можно говорить об универсальной линии достижимого пересыщения или перегрева. Такая линия изображена штрих-пунктиром на рис. 4. Здесь же показана бинодаль (*Bi*) и спинодаль (*Spi*). В верхней части все кривые практически сливаются, что легко понять, если учесть уменьшение до нуля поверхностного натяжения в критической точке.

Определенный интерес представляет вопрос о трактовке спинодали в области отрицательных давлений. Согласно современным физическим представлениям разрыв жидкости (кавитация) не отличается от вскипания. Низкотемпературное кипение легко себе представить, если вспомнить часто упоминающийся в школьных учебниках опыт с откачкой воздуха из стеклянной колбы с водой: известно, что с уменьшением давления жидкость в колбе вскипит даже при комнатной температуре. Состояния растянутой жидкости на практике достаточно сложно реализовать. В технических устройствах растяжение воды достигается, например, при высокоскоростном вращении лопастей гребного винта.

Разрыв воды при превышении некоторой критической скорости вращения винта приводит к образованию газовой полости. При попадании в эту полость следующая лопасть винта может сломаться от удара о границу с жидкостью. В большинстве опытов растяжение достигается за счет центробежных сил при вращении жидкости в трубках различной формы. Этот процесс не является быстрым в отмеченном выше смысле, поэтому, видимо, измеренные таким образом кавитационные прочности различных жидкостей (то есть отрицательные давления, при которых наступает разрыв) весьма далеки от спинодали. Динамические опыты по разрыву жидкостей достаточно редки. Можно упомянуть здесь опыт Карлсона [ ]. В этом опыте ртуть наливалась в прозрачную кювету из оргстекла, которая закрывалась алюминиевой крышкой. В крышке при воздействии электронного пучка генерировалась ударная волна. При выходе волны на тыльную по отношению к излучению сторону кюветы при некоторых параметрах импульса происходил отрыв граничного слоя ртути. Отрыв фиксировался по интерферометрическим наблюдениям за движением днища. Проведенные в [4] расчеты показали, что прочность ртути на разрыв в этих условиях близка к давлению, при котором начинается интенсивное гомогенное зародышеобразование.

В заключение следует подчеркнуть, что все рассмотренные эффекты (бинодаль, спинодаль, критическая точка, отрицательные давления и тому подобное) имеют место, разумеется, не только для уравнения Ван-дер-Ваальса, но и для других УРС, более адекватно описывающих поведение вещества в широком диапазоне изменения термодинамических параметров. Однако уравнение Ван-дер-Ваальса, будучи достаточно простым для изложения и понимания, делает возможным изучение на качественном уровне, доступном даже для студентов первого курса. Можно отметить, что за рамками статьи остались вопросы фазового равновесия (и его нарушений в метастабильной области) для систем жидкость — твердое тело или газ — твердое тело.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика [Текст] / Д.В. Сивухин.— М.: Наука, 1979.

2. **Скрипов, В.П.** Метастабильная жидкость [Текст] / В.П. Скрипов.— М.: Наука, 1972.

3. **Carlson, G.A.** // J. Appl. Phys.— 1975.Vol. **46**. — P. 4069–4070

4. **Колгатин С.А.** / Колгатин С.Н., Степанов А.М., Хачатурьянц А.В. // Журнал прикладной механики и технической физики.— 1984. № 5.— С. 55– 59.

УДК 551.55:551.508.5:551.508.8

М.В. Дюльдин, А.А. Панфилов, Н.В. Столяров

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРОВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Развитие народного хозяйства в целом и агропромышленного комплекса в частности неразрывно связано с увеличением энергопотребления. Темпы развития централизованного энергоснабжения порой не отвечают повышенному спросу на электроэнергию и мощность. Этот сдерживающий фактор вынуждает отдельные сельскохозяйственные предприятия создавать собственные энергонезависимые производства. Как показывает мировой опыт, одним из решений данной проблемы является использование ветроэлектрических станций (ВЭС), которые могут не только удовлетворить собственные нужды энергопотребления, но и давать прибыль от продажи электроэнергии. Для обоснования параметров ВЭС и определения экономической эффективности их применения наряду с другими источниками энергоснабже-

ния необходимо в первую очередь определить ветроэнергетические ресурсы (ВЭР) региона.

Все используемые способы прогнозирования энергетической, а впоследствии — и экономической эффективности ВЭС основаны на использовании теоретических или эмпирических моделей распределения ветрового потока в приземном слое предполагаемого размещения ветроэлектрической установки (ВЭУ). В математическом плане расчеты сводятся к определению функции распределения скоростей ветра на высоте расположения оси ветроколеса ВЭУ с заданной рабочей характеристикой.

Для получения достоверных данных о функции распределения скоростей ветра, а также суточной, сезонной изменчивости и других характеристик необходимы данные наблюдений за период не менее 10 лет. Основным источником таких данных служат специализированные справочные издания, обобщающие результаты многолетних наблюдений на государственной метеорологической сети (ГМС) [1], а также данные аэрологических станций [2]. Однако для решения ряда практических задач ветроэнергетики имеющихся данных в большинстве случаев оказывается недостаточно из-за больших расстояний между ГМС (50–100 км и более), существенно превышающих масштабы пространственной изменчивости характеристик ветра, особенно в районах со сложной орографией и переменной шероховатостью. В случаях отсутствия метеостанций вблизи предполагаемого размещения ВЭС расчет ВЭР, определяющих предполагаемую выработку электроэнергии проектируемой ВЭС, существенно усложняется и может быть реализован двумя способами.

Первый способ подразумевает выполнение достаточно сложного и трудоемкого статистического и численного моделирования с использованием данных ближайших метеостанций или метеостанций-аналогов, данных о рельефе, свойствах подстилающей поверхности. Основной недостаток данного способа — невысокая точность, особенно при наличии неоднородности в рядах наблюдений, вызванной изменением инструментальной базы, высоты флюгера, периодичности измерений.

Второй способ предусматривает проведение натурных измерений ВЭС длительностью 1–2 года непосредственно в месте расположения. Данный способ, несомненно, имеет более высокую точность, особенно если учесть, что на некоторых метеостанциях до сих пор не осуществлен переход от флюгерных измерений с помощью доски Вильда к автоматическим измерениям с помощью анеморумбометров [1]. Установлено, что усредненные за двухминутный интервал скорости по флюгеру Вильда существенно отличаются от десятиминутных скоростей, осредненных автоматическими анемометрами типа М63. Недостатки данного способа — отсутствие учета годовой изменчивости ветра и более высокая стоимость. Как правило, при проектировании ВЭС для повышения точности измерений указанные методики используют совместно. Это позволяет установить соответствие данных ветромониторинга и региональных климатических норм.

При проведении ветромониторинга измерения производятся одновременно на разных высотах, поскольку существующие одноуровневые модели экстраполяции флюгерных измерений могут давать результаты, значительно различные в зависимости от местных ветровых условий. Так, например, при определении среднегодовой скорости ветра на высоте 100 м над поверхностью земли общепринятая в мировой практике датская логарифмическая экстраполяция дает погрешность до 50 %, а двухуровневая модель В.Г. Николаева «Флюгер-XXI» дает погрешность до 15 % [2].

Мачты, как правило, оборудуются автоматизированными метеорологическими комплексами, в состав которых, кроме датчиков скорости и направления ветра, входят датчики температуры, относительной влажности, атмосферного давления и осадков. Информация с датчиков регистрируется, архивируется и передается пользователю с помощью специального оборудования и программного обеспечения. Количество датчиков ветра зависит от высоты мачты.

Датчики скорости и направления ветра могут быть раздельными (рис. 1, *а*), объединенными (рис. 1, *б–д*), модульными с единым портативным модулем, в который помимо датчиков ветра, входят датчики температуры, влажности, давления, осадков, а также измерительный преобразователь. При проведении мачтовых измерений, как правило, используются чашечные и ультразвуковые датчики ветра.

Принцип работы чашечных анемометров основан на использовании зависимостей между скоростью воздушного потока и частотой вращения вертушки. К преимуществам чашечных анемометров относятся простота конструкции, низкая стоимость и широкое использование в мировой практике. К недостаткам можно отнести погрешности измерений за счет инерционности конструкции и трудоемкость обслуживания необогреваемых моделей при их обледенении.

Более точны и надежны ультразвуковые датчики благодаря отсутствию подвижных частей. В зависимости от модели датчики снабжаются тремя или четырьмя равноудаленными друг от друга ультразвуковыми измерительными преобразователями (рис. 1, *г*). Скорость и направление ветра определяются по времени, за которое ультразвук проходит от одного преобразователя до других. Время прохождения сигнала зависит от скорости ветра: при нулевой скорости ветра время прямого и обратного хода сигнала одно и то же; при ветре вдоль траектории звука время прохождения сигнала против ветра больше, а по ветру — меньше. Многократное измерение времени прохождения сигнала обеспечивает точность измерений до 0,01 м/с. Современные ультразвуковые датчики позволяют определять три компоненты скорости ветра. Единственный недостаток данного типа измерительного оборудования по сравнению с чашечными анемометрами — его более высокая стоимость.

Максимальная высота ветроизмерительных метеомачт варьируется от 50 до 100 метров, что позволяет полностью удовлетворить потребности малой ветроэнергетики (мощность ВЭУ до 100 кВт). При проектировании ВЭУ мегаваттного класса с высотой башни более 80 метров проведение мачтовых измерений полностью не перекрывает всю ометаемую площадь ротора, а в некоторых случаях не позволяет оценить скорость ветра даже на высоте оси ротора. Поэтому часто полученные данные о скорости ветра с метеомачты должны быть пересчитаны при помощи метода экстраполяции на большую высоту, где будет находиться ось ветроколеса (рис. 2).

В связи с этим внимание привлекают метод дистанционного акустического зондирования ветрового потока (Sodar — Sound Detection and Ranging) и метод дистанционного оптического зондирования (Lidar — Light Detection and Ranging), которые предлагают альтернативный подход к измерениям скоростей ветра. В основе принципа работы Sodar (аналогично работает Lidar, только вместо звукового сигнала используется лазерный луч) лежит эффект Доплера, который описывает изменение частоты звуковой волны от движущегося источника, регистрируемое неподвижным приемником. Sodar посылает в атмосферу высокочастотные звуковые сигналы (около 4,5 кГц) последовательно в трех направлениях: один луч в вертикальном направлении (W) и два ортогональных луча с наклоном примерно 17 градусов от вертикали (U, V). Акустические волны отражаются от подвижных турбулентных воздушных масс в атмосфере, и часть посланного сигнала возвращается в Sodar с некоторой измененной частотой. После этого Sodar измеряет отраженный сигнал, рассчитывается доплеровское изменение частоты для ряда высот (до 200 м) с интервалом в 10 метров по каждому направлению луча. После чего скорости ветра по каждому направлению луча усредняются за десятиминутный интервал и рассчитывается средняя векторная скорость ветра и направление ветра.

Следует отметить, что точность измерения скорости ветра при помощи Sodar немного отличается от точности измерений с помощью

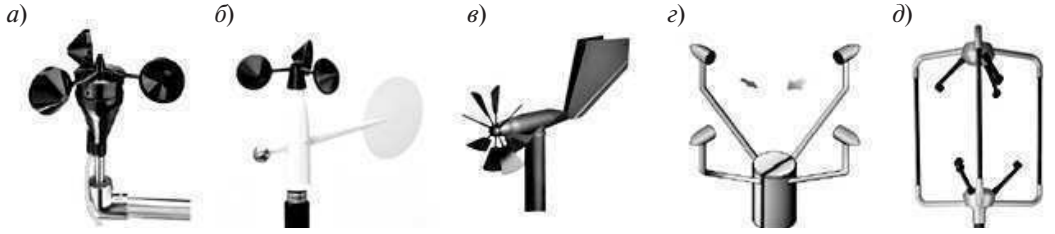


Рис. 1 Датчики скорости и направления ветра:

а — чашечный анемометр; *б* — анеморумбометр с чашечным анемометром; *в* — анеморумбометр типа М63 с крыльчатым анемометром; *г* — ультразвуковой датчик ветра; *д* — ультразвуковой 3D датчик ветра

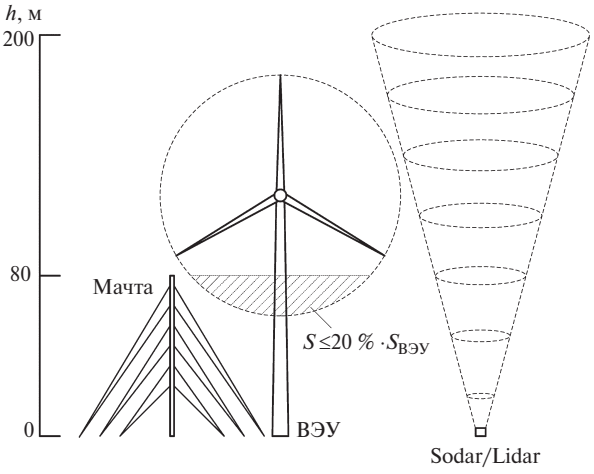


Рис. 2. Высотное сравнение метеомачты высотой 80 м, установок типа Sodar/Lidar и габаритов ВЭУ мегаваттного класса

чашечных анемометров. Sodar измеряет ортогональные компоненты скорости ветра и затем осредняет их для определения векторной скорости ветра. Чашечные или крыльчатые анемометры измеряют скалярную скорость ветра. Скалярная скорость обычно на 1–2 % больше векторной [3].

Помимо измерения скорости ветра, установка Sodar автоматически рассчитывает дополнительные параметры: стандартное отклонение, интенсивность турбулентности, скорость и направление порыва. Пример массива данных, измеренных на площадке СПбГПУ 27 января 2012 года и осредненных за десятиминутный интервал, приведен в таблице. Состояние атмосферы и акустические помехи от близлежащих зданий в момент измерений позволили получить качественные данные только на интервале высот от 40 до 170 метров.

Для проведения ветромониторинга в удаленных и не имеющих централизованного электроснабжения местах могут использоваться автономные передвижные установки Sodar или Lidar. На рис. 3, *а* представлена установка Sodar WindExplorer, закупленная ФГБОУ ВПО СПбГПУ в 2011 году в рамках реализации программы национального исследовательского университета (НИУ). Установка состоит из двуосного прицепа в прочном фанерном корпусе, в который встроены антенный модуль и рефлектор, электронный блок с компьютером, панелью управления и жестким диском, датчики скорости ветра, температуры, влажности, дождя и снега. Для работы в условиях холодного климата предусмотрен подогревающий элемент на корпусе рефлектора в целях предотвращения накопления снега и удаления льда. Для более длительного и постоянного использования установки Sodar оснащаются небольшим бензиновым генератором, солнечными фотоэлектрическими модулями и иногда ветрогенератором малой мощности, которые автоматически подзаряжают встроенные аккумуляторные батареи, когда это необходимо. Для сравнения на рис. 3, *б* представлен внешний вид установки Lidar WindcubeV2 в неавтономном исполнении и ее габариты.

Установки Sodar и Lidar используются в практике ветромониторинга с целью снижения неточности в измерениях скорости ветра, присущей традиционному методу ветромониторинга при помощи метеомачт, часто не позволяющему провести измерения на высоте оси ветроколеса ВЭУ мегаваттного класса с высотой башни более 80 м. Отсутствие данных натурных измерений на требуемой высоте вынуждает прибегать к математическим экстраполяционным моделям, пересчитывать имеющиеся скорости ветра с высоты расположения анемометра на необходимую высоту оси ветроколеса. Как уже было отмечено, применение методов экстраполяции неизбежно приводит к увеличению неточности оценки конечных результатов. На рис. 4 сравниваются три основные технологии, позволяющие измерять характеристики ветрового потока. Из данного рисунка видно, что установки дистанционного зондирования позволяют получать более детальный высотный профиль ветрового потока, чем ГМС и метеомачты, имеют большую регулярность измерений, а также являются значительно более мобильными, что приводит к увеличению точности оценки ветропотенциала.

Системы дистанционного зондирования позволяют проводить ветромониторинг для более точного и достоверного прогнозирования среднегодовой выработки электроэнергии, обеспечения прогноза выработки с вероятностью до 90 % и, как следствие, снижения инвестиционных рисков строительства ВЭС, что служит ключевой информацией для банков и инвесторов при принятии решения по финансированию проектов [4].

Измеряемые и расчетные параметры ветрового потока установкой SODAR за десятиминутный интервал

YN	*SPD*	*DIR*	*W*	*SDW*	*IW*	*GSPD*	*GDIR*	*U*	*SDU*	*NU*	*IU*	*SNRU*	*V*	*SDV*	*NV*	*IV*	*SNRV*	*NW*	*SNRW*
170	7,31	117	–	–	31	8,17	116	6,5	0,44	30	36	3	–3,34	0,83	34	36	3	27	5
160	7,28	112	–0,03	0,41	40	10,65	113	6,72	0,99	53	45	4	–2,78	0,63	73	51	4	56	6
150	3,68	108	–0,04	0,37	59	5,86	98	3,5	0,7	84	60	5	–1,15	0,39	101	95	7	92	8
140	1,65	105	–0,12	0,22	170	3,34	102	1,59	0,52	99	102	7	–0,43	0,49	107	109	7	109	19
130	4,3	114	0,1	0,36	88	7,88	113	3,94	0,84	95	79	5	–1,72	0,55	95	94	6	102	10
120	4,22	111	0,02	0,32	81	5,62	95	3,93	0,48	97	85	6	–1,53	0,35	104	121	8	98	9
110	3,61	111	–0,04	0,42	90	5,53	95	3,38	0,48	106	114	7	–1,26	0,47	103	125	8	104	9
100	3,69	108	0,02	0,46	99	5,16	93	3,51	0,44	107	134	8	–1,11	0,47	106	149	8	101	10
90	2,99	112	–0,04	0,4	142	4,59	88	2,77	0,47	107	173	8	–1,13	0,5	109	159	8	108	11
80	3,63	108	–0,1	0,25	244	5,29	83	3,46	0,44	107	210	10	–1,12	0,53	106	194	8	109	17
70	3,24	102	–0,03	0,32	284	4,69	113	3,16	0,45	108	257	9	–0,69	0,45	109	330	9	109	15
60	2,47	86	–0,09	0,25	308	3,56	68	2,46	0,33	109	355	11	0,18	0,36	109	405	11	109	15
50	1,87	91	–0,14	0,4	202	4,08	87	1,87	0,48	108	346	10	–0,02	0,41	109	343	10	109	12
40	2,94	88	–0,16	0,45	202	4,85	91	2,94	0,47	107	242	8	0,1	0,45	107	270	9	108	12

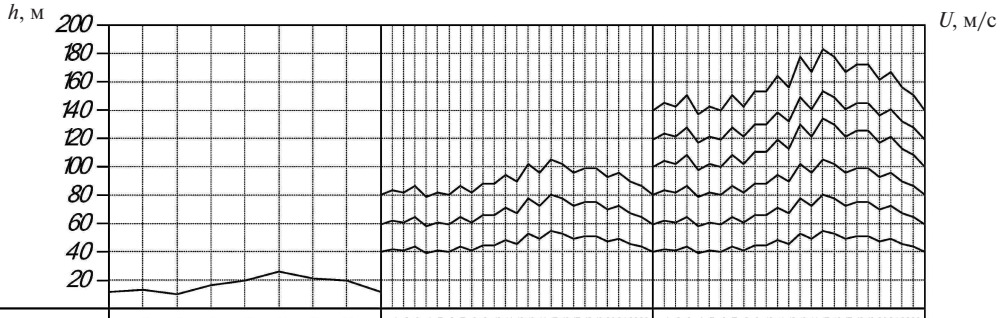
Примечание: *HT* — высота над землей, м; *SPD* — скорость ветра, м/с; *DIR* — направление ветра, град.; *W* — вертикальная скорость ветра, м/с; *SDW* — стандартное отклонение *W*, м/с; *NW* — количество успешно зафиксированных измерений луча *W*; *IW* — вертикальная интенсивность турбулентности; *SNRW* — отношение сигнал/шум луча *W*; *GSP* — скорость порыва ветра, м/с; *GDIR* — направление порыва ветра, град; *U* — скорость ветра по направлению ортогонального луча *U*, м/с; *SDU* — стандартное отклонение *U*, м/с; *NU* — количество успешно зафиксированных измерений луча *U*; *IU* — интенсивность турбулентности луча *U*; SNRU — отношение сигнал/шум луча *U*; *V* — скорость ветра по направлению ортогонального луча *V*, м/с; SDV — стандартное отклонение *V*, м/с; *NV* — количество успешно зафиксированных измерений луча *V*; *IV* — интенсивность турбулентности луча *V*; *SNRV* — отношение сигнал/шум луча *V*



Рис. 3. Внешний вид установки Sodar WindExplorer производства компании ASC на территории Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (*а*) и установки Lidar WindcubeV2 (*б*)

Несмотря на схожий принцип работы, системы Sodar и Lidar имеют ряд принципиальных различий. Так, установки Sodar имеют относительно низкое энергопотребление и более низкую стоимость, чем Lidar. К недостаткам Sodar относят помехи в виде эха, которые образуются в случае отражения звукового сигнала от близко расположенных препятствий (деревья или строения), шумовые помехи от внешних источников (транспортные магистрали, строительные площадки и т. п.), снижение точности измерений в периоды атмосферных осадков, невозможность расположения установки Sodar в непосредственной близости с метеомачтой. По причине использования не звуковой, а световой волны установки Lidar не имеют недостатков в виде помех из-за эха и позволяют получать достоверные данные в периоды осадков. Эти установки производятся в компактном и легком исполнениях (вес около 45 кг) и могут быть установлены двумя рабочими менее чем за 20 минут [5]. К недостаткам установок Lidar можно отнести их высокую стоимость, более высокое энергопотребление, чем у Sodar, и наличие хрупких компонентных частей, что требует обеспечения дополнительной безопасности при транспортировке.

Таким образом, сравнивая результаты измерений ветрового потока различными спосо-



Время, ч	3 6 9 12 15 18 21	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Тип изм. станции	Мачта ГМС	Мачта высотой 80 м	Sodar/Lidar
Регулярность изм.	3 ч.	Любая	Любая
Высота изм.	10–12 м	От 10 до 100 м	От 30 до 200 м
Интервал осредн.	10 мин.	Любой	Любой
Мобильность	Нет	От 10 до 100 дней	1 xfc

Рис. 4. Сравнительная характеристика измерений скорости ветра ГМС, стационарной мачтой и установкой Sodar/Lidar

бами, можно сделать вывод, что установки дистанционного зондирования ветрового потока позволяют дополнять, а в некоторых случаях заменять ветромониторинг при помощи анемометров, получать более точные и достоверные данные по ветру одновременно на нескольких заданных высотах, снижать затраты на проведение ветромониторинга, уменьшать технические риски, связанные с реализацией проектов строительства ВЭС.

Статья подготовлена в рамках реализации ФЦП «Научные и начно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0750) и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 16.516.11.6107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климатические факторы возобновляемых источников энергии [Текст] / Под ред. В.В. Елистратова, Н.В. Кобышевой, Г.И. Сидоренко.— СПб.: Наука. 2010.— 235 с.

2. **Николаев, В.Г.** Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения [Текст] / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов / Под ред. В.Г. Николаева.— М.: Атмограф, 2008.— 584 с.

3. Long Island, MA: SODAR-Based Wind Resource Assessment [Электронный ресурс]: University of Massachusetts Amherst, RERL, 2006. Режим доступа: http://www.umass.edu/windenergy/publications/resource/Long_Island/Report/Long_Island_Wind_Resource_Assessment_Report.pdf, свободный – Загл. с экрана – Яз. англ.— Дата обращения: 13.03.2012.

4. **Pierce, N.** What Is Sodar? A Snapshot of Wind Development Applications[Электронныйресурс] / Naomi Pierce.— SECONDWIND: WindIQ Knowledge Center–Электрон. дан.— Режим доступа: http://info.secondwind.com/knowledge-center/bid/59589/What-Is-Sodar-A-Snapshot-of-Wind-Development-Applications, свободный— Загл. с экрана— Яз. англ.— Дата обращения: 14.03.2012.

5. Technical specs WINDCUBEv2 [Электронный ресурс]: Leosphere.com— Электрон. дан.— Режим доступа: http://www.leosphere.com/products2.php?rubrique = 36&cat = wl&item = 1wc7ts, свободный— Загл. с экрана— Яз. англ. Дата обращения: 13.03.2012.

УДК 007.52: 629.786.2

В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев

АНАЛИЗ СТРУКТУР И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Манипуляционные средства необходимы для формирования и эксплуатации орбитальных станций, межпланетных комплексов и автоматических космических аппаратов, а также поддержания напланетной деятельности (на Луне и Марсе). Обычно для одного объекта требуется группировка, состоящая из нескольких манипуляторов.

Каждый манипулятор несет, по меньшей мере, один рабочий орган (РО). Для задания произвольного положения РО достаточно 6 степеней подвижности. Но если в рабочей зоне вдруг окажутся препятствия, если манипулятор требуется компактно сложить для прохождения шлюзовой камеры или выведения на орбиту, если по разным причинам накладывается требование симметричности манипулятора, то необходимо вводить, по меньшей мере, одну избыточную степень подвижности, т. е. манипулятор становится семистепенным. Такое устройство условимся называть полным манипулятором.

В практике космической робототехники из-за сложности и громоздкости поступательные степени подвижности распространения не получили, поэтому далее они не рассматриваются.

Манипуляторы на базе вращательных кинематических пар могут иметь разнообразные компоновки. Но из них рациональны по критерию минимального отношения размеров собственной конструкции к размерам рабочей зоны схемы,

эквивалентные манипулятору с одностепенным локтевым шарниром и сферическими трехстепенными плечевыми и кистевыми шарнирами. На практике обычно все шарниры одностепенные. В начале и конце манипулятора (в плече и кисти) устанавливают по три таких шарнира с взаимно перпендикулярными осями вращения.

Устройства шарниров, включая приводы и частично элементы системы управления, по своим габаритам (особенно вдоль оси вращения) в небольших манипуляторах оказываются сопоставимыми со звеньями плеча и локтя. При переориентации в широком диапазоне оси вращения некоторых шарниров из исходного взаимно перпендикулярного положения могут приблизиться к параллельному. В этом случае изменение ориентации выходного звена даже на небольшой угол относительно одной из осей может потребовать радикального изменения ориентации по другой оси.

По этим причинам рациональная компоновка устройств переориентации рабочего органа в значительной мере определяется видом общей конфигурации манипулятора, которую он принимает при выполнении основных (целевые, наиболее ответственные) операций. У работающего человека кисть лежит приблизительно вдоль продольной оси локтевого звена (отклонения менее 45°). Для такой конфигурации предпочтительно два последних перед захватным устройством шарнира устанавливать перпендикулярно оси локтевого звена, а третий шарнир располагать ближе к локтевому шарниру и вписывать в локтевое звено (рис. 1, *а*). Этот вид компоновки манипулятора наиболее близок к руке человека, и поэтому условимся его называть антропоморфным.

Критерий антропоморфности актуален прежде всего в случае прямого копирования исполнительным манипулятором движений задающего. Этот способ управления в робототехнике, в том числе космической, применяется относительно редко.

Если основание манипулятора и обслуживаемый объект располагаются приблизительно в общей плоскости, например на наружной поверхности космического аппарата, а вылеты предельны, то ось кисти с РО оказывается приблизительно перпендикулярной (отклонения менее 45°) продольной оси локтевого звена и всего манипулятора в целом (рис. 1, *б*). Подобная ситуация распространена как в стационарных, так и мобильных роботах. В этих случаях предпочтительно ось предпоследнего перед рабочим органом шарнира располагать перпендикулярно оси локтевого звена, а оси двух других шарниров кисти — параллельно этой оси (в вытянутом положении манипулятора). Подобную компоновку манипулятора имеют большинство сервисных и промышленных роботов. Ее мы условимся называть техногенной (как альтернатива антропоморфной). Дополнительное преимущество данной компоновки — в возможности использования последнего шарнира для смены РО, в том числе в ручном режиме.

Для движения в узких (по сравнению с размерами робота) и извилистых полостях перспективны манипуляторы в виде длинной (более 6–7)

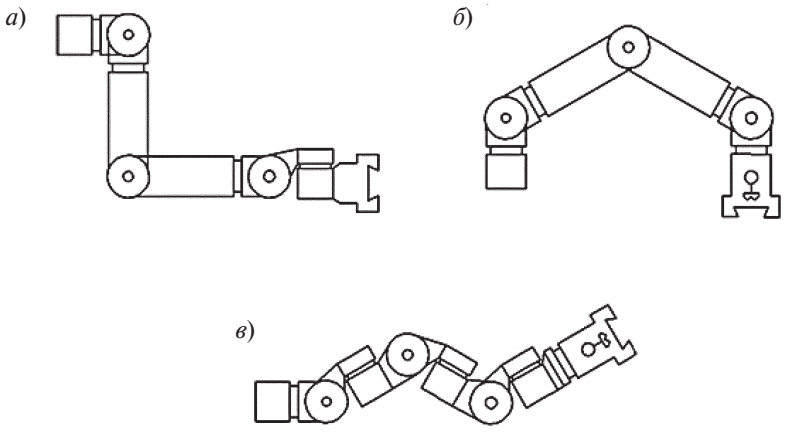


Рис. 1. Виды компоновки манипуляторов:
а — антропоморфная; *б* — техногенная; *в* — змеевидная

цепи шарниров с осями вращения, перпендикулярными продольной оси манипулятора в целом (рис. 1, *в*). Такая змеевидная (серпентоморфная) схема позволяет менять направление движения робота в узких каналах поворотом нескольких шарниров на небольшие углы, не прибегая к интенсивной переориентации звеньев. Аналогичным образом движутся змеи в норах.

Как уже отмечено, предлагается подразделять манипуляторы по приблизительным размерам (радиусам вылета) на малые (менее 0,8 м), средние (от 0,8 м до 1,4 м) и большие (грузовые) — от 1,4 м до 15 м.

Изначально манипуляторы с радиусом порядка 10 м (такие, как Canadarm) создавались для разгрузки многоразовых кораблей. Поэтому их часто называют грузовыми. Следует обратить внимание на то, что связь между грузоподъемностью и размерами (радиусом) манипуляторов косвенная. Громоздкие тяжелые объекты, как правило, требуется перемещать на расстояния, сопоставимые с их размерами. Крупный стационарный манипулятор может обследовать значительную часть орбитальной станции и обслуживать научные аппараты в пределах досягаемости.

Однако увеличение габаритов неизбежно связано с ухудшением точности. Точность и жесткость манипуляторов на 70–80 % зависит от выходной ступени передач приводов шарниров. При использовании в качестве выходной тихоходной ступени передач наиболее точных (из имеющихся на рынке предложений) редукторов только упругий люфт (в одном шарнире) составляет порядка $U_р = 1–3$ угл. мин. Если допустить одинаковую погрешность $U_р = 1$ угл. мин. у всех шарниров, то оценка снизу ширины $U_о$ зоны неопределенности положения рабочего органа предельно вытянутого манипулятора, вызванная упругим люфтом передач, составляет: $U_о = 0{,}7–2{,}7$ мм для малых манипуляторов; $U_о = 2{,}7–4{,}8$ мм для средних манипуляторов; $U_о = 4{,}8–51$ мм для грузовых манипуляторов. В условиях космоса (вакуум, низкие температуры) упругий люфт имеет тенденцию к возрастанию. С учетом других источников погрешностей, в том числе влияния других ступеней передач, подшипников, податливости приводов и длинных звеньев, реальная зона неопределенности может возрасти в 2–3 раза и составить: до 5–7 мм для малых манипуляторов; 10–15 мм для средних манипуляторов; до 50–150 мм для грузовых манипуляторов. Эти оценки подтверждаются практикой использования робототехнических систем в космосе. У наземных роботов большая часть зазоров выбирается весом, а привод вращения относительно вертикальной оси обычно включает жесткую зубчатую передачу большого диаметра с механизмами выборки зазора, поэтому у них подобные погрешности значительно меньше.

Робототехнические системы (РТС) космических аппаратов могут иметь в своем составе один или несколько манипуляторов. Главным образом это и определяет различия между возможными вариантами их построения. Рассмотрим эти варианты.

Одиночные стационарные манипуляторы применялись для разгрузки многоразовых космических кораблей (рис. 2, *а*). У таких манипуляторов (даже грузовых) рабочая зона составляет незначительную часть поверхности орбитальной станции. Доступ к остальной поверхности закрыт как самими корпусами станции, так и установленным на ней оборудованием.

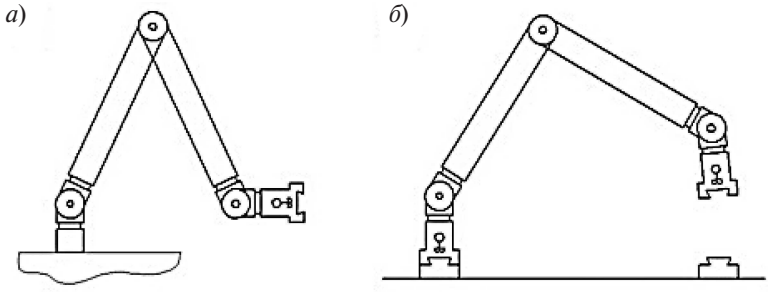


Рис. 2. РТС с одним манипулятором:
а — стационарная РТС; *б* — мобильная РТС, шагающая по пассивным частям УЗС на поверхности ОС

Для расширения обслуживаемой зоны грузовым или средним манипуляторам придается возможность автономного перемещения путем перешагивания по конструктивным элементам ОС (рис. 2, *б*). Для грузовых манипуляторов (ГМ) в качестве опорных элементов должны использоваться пассивные части устройств захвата и стыковки (УЗС) в виде базовых точек, обеспечивающих компенсацию исходных погрешностей в диапазоне порядка 50–100 мм и однозначную фиксацию по всем шести компонентам (трем линейным и трем угловым). Такое устройство может иметь габариты порядка 300–400 мм и массу 5–10 кг. Для средних роботов достаточны конструктивные элементы ОС, частично адаптированные к захватыванию, например унифицированные стойки поручней для космонавтов или сами поручни. В особо сложных случаях возможна установка на нескольких такелажных элементах.

Два манипулятора могут объединяться в РТС последовательно, параллельно или в виде взаимодействующих автономных роботов. ГМ имеет большую рабочую зону, но неточен, зона неопределенности положения его рабочего органа может достигать 50–150 мм. Средний манипулятор точнее, но и вылеты у него меньше. Иногда эти противоречия предлагается решать последовательным соединением грузового и среднего манипулятора (рис. 3, *а*). ГМ захватывает своим УЗС (активной частью) основание среднего манипулятора. Однако погрешности цепи манипуляторов суммируются. Поэтому задача повышения точности РТС таким образом решена быть не может.

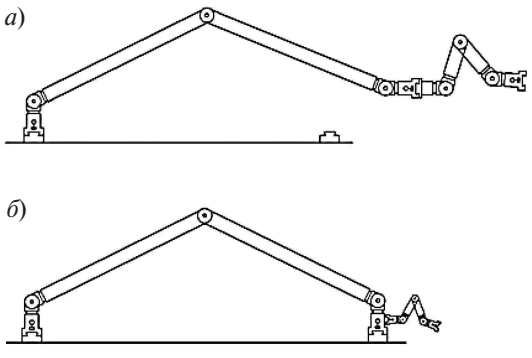


Рис. 3. Перенос среднего манипулятора грузовым манипулятором:
а — последовательное соединение манипуляторов; *б* — средний манипулятор установлен на корпусе УЗС грузового манипулятора

Ситуация меняется, если средний манипулятор крепится на корпусе УЗС (активной части) ГМ (рис. 3, *б*), причем последнее устройство фиксируется на базовой точке ОС. Тот же эффект достигается, если ГМ только переносит средний манипулятор, а последний сам фиксируется на базовой точке ОС одним из двух УЗС на его концах. Здесь перенос среднего манипулятора грузовым служит альтернативой автономному перемещению среднего манипулятора перешагиванием по конструктивным элементам на поверхности ОС.

Параллельная установка двух манипуляторов на общем корпусе-основании приводит к компоновке робота, подобной верхнему поясу человека (рис. 4).

На корпусе целесообразно разместить дополнительное УЗС. Такой робот может удерживаться на ОС одновременно двумя УЗС, причем еще остается свободным один манипулятор для переноса точки опоры при перешагивании (рис. 4, *а*) или воздействия рабочим органом на обслуживаемое или собираемое оборудование (рис. 4, *б*). В результате повышается надежность ходьбы за счет дублирования захвата и увеличивается жесткость системы при силовом воздействии. Данная РТС способна выполнять одновременно двумя манипуляторами сборочные или иные технологические операции, например состыковывать электрический соединитель, висящий на двух гибких кабелях (рис. 4, *в*). Для таких сложных сборочных операций космическая транспортно-манипуляционная система (рис. 5) двумя УЗС на нижней части корпуса фиксируется на поручнях орбитальной станции.

Правым манипулятором она заводит устанавливаемую штангу *1* в кронштейн *2* с проушиной на корпусе орбитальной станции, а левым манипулятором фиксирует эту штангу осью *3*.

Кроме последовательного и параллельного, возможно комбинированное соединение двух манипуляторов (рис. 6). Один манипулятор играет роль транспортного (рис. 6, *а*). Он оснащен специальными захватными устройствами для перемещения перешагиванием по унифицированным конструктивным элементам ОС. Второй манипулятор (технологический) крепит-

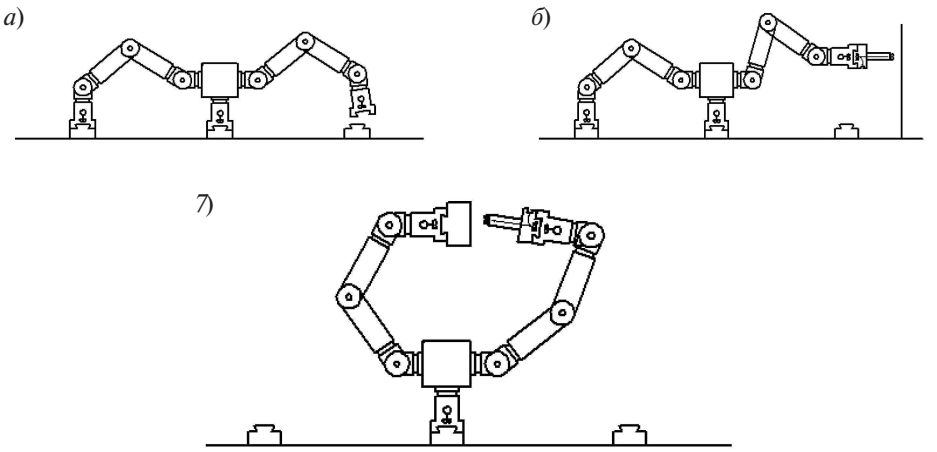


Рис. 4. РТС с двумя манипуляторами:
а — шагание с дублированием захвата конструктивных элементов ОС; *б* — технологическое действие на конструкции ОС; *в* — выполнение технологической операции одновременно двумя манипуляторами

ся к звену транспортного, смежному с кистью (модули переориентации). Специализация манипуляторов позволяет упростить управление. В некоторых случаях удается обойтись без смены рабочих органов. РТС с комбинированной связью между манипуляторами может использоваться в обращенном варианте (рис. 6, *б*). Один из манипуляторов одновременно двумя рабочими органами выполняет технологическую операцию, например сборку. А второй манипулятор стоит на УЗС корпуса ОС и удерживает первый манипулятор в зоне выполнения работ.

Это минимальная схема, позволяющая выполнять работы одновременно двумя взаимодействующими органами. Отсутствие избыточности затрудняет и в некоторых случаях даже делает невозможными другие стадии функционирования РТС, в том числе перемещение, подготовку к операции, смену рабочих органов.

В РТС манипуляторы могут быть не связаны между собой. Например, один манипулятор выполняет точные технологические операции, а второй — грубые силовые (грузовые). Такое разделение возможно как на стационарных, так и на мобильных автономных манипуляторах (рис. 7, *а*). Простейшие мобильные семистепенные манипуляторы имеют на своих концах УЗС, с помощью которых они перемещаются перешагиванием по унифицированным конструктивным элементам на корпусе ОС. Они могут функционировать совместно, например одновременно двумя рабочими органами стыковать электрическое соединение на гибких кабелях. Подобные мобильные автономные манипуляторы являются базовыми элементами систем манипуляторов с реконфигурируемой структурой. В зависимости от специфики решаемой задачи из них возможно собирать агрегаты любой компоновки. Захватывая крупногабаритный объект *1*, они могут его перемещать (рис. 7, *б*).

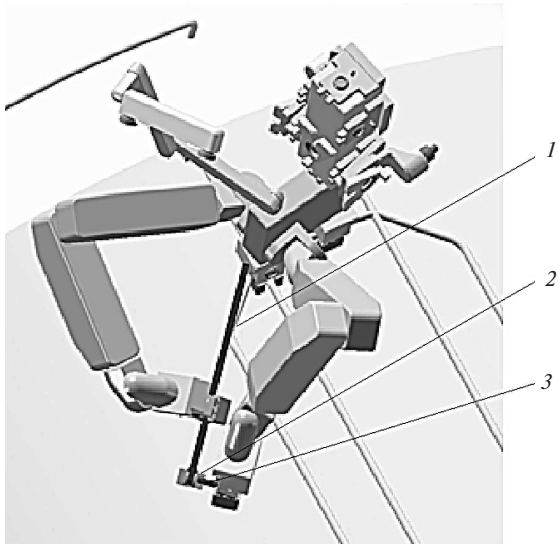


Рис. 5. Космическая транспортно-манипуляционная система (СПбГПУ, ЦНИИ РТК)

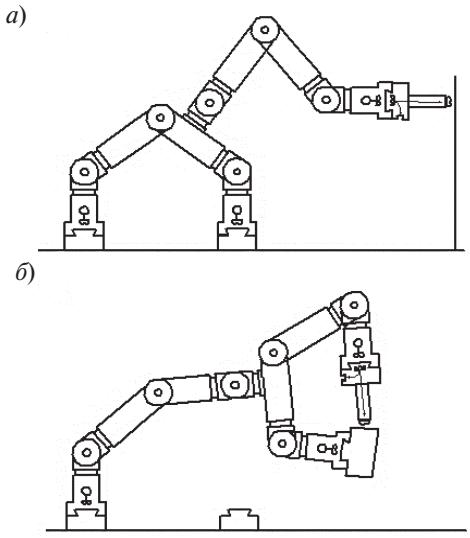


Рис. 6. РТС с комбинированным соединением двух манипуляторов: *а* — технологическое действие на обслуживаемое оборудование; *б* — выполнение технологической операции одновременно двумя рабочими органами

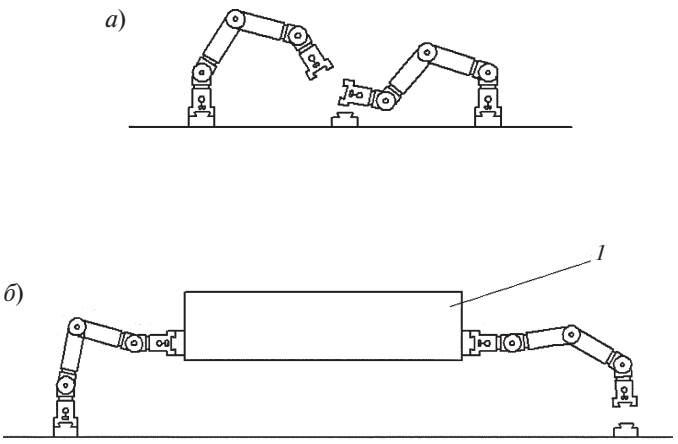


Рис. 7. РТС с двумя автономными манипуляторами: *а* — автономные мобильные манипуляторы; *б* — транспортирование громоздкого объекта одновременно двумя автономными манипуляторами

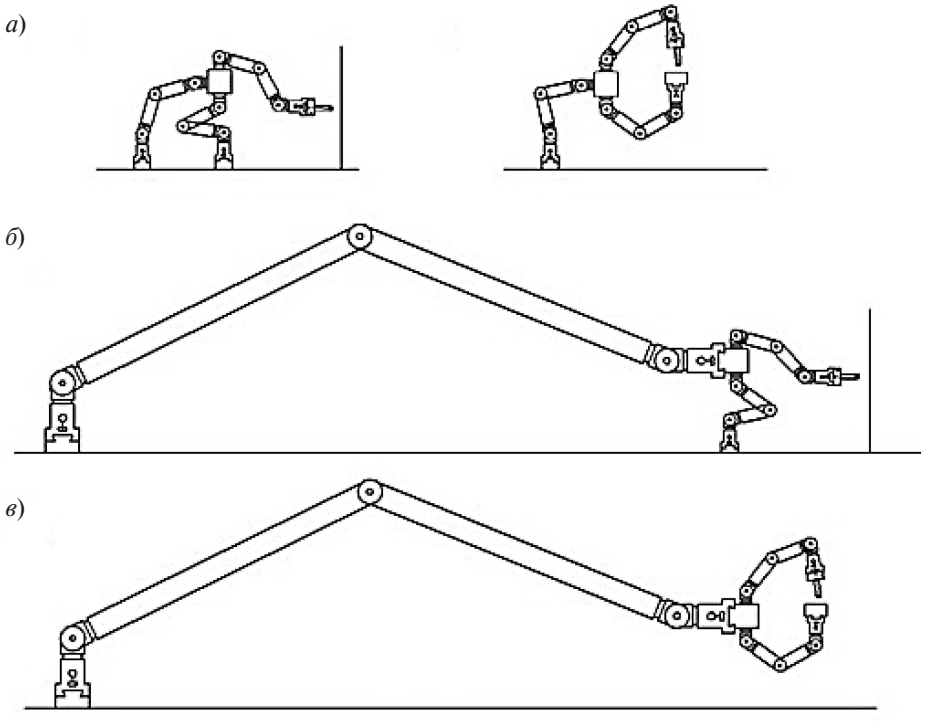


Рис. 8. РТС с тремя манипуляторами:
а — действие на обслуживаемый объект; *б* — сборочная операция одновременно двумя манипуляторами; *в* — фиксация ГМ одним из средних манипуляторов; *г* — сборочная операция средними манипуляторами, переносимыми ГМ

Если вместо груза взять длинный шест, то можно организовать перемещение РТС через значительные разрывы между такелажными элементами конструкции ОС. Одно из важнейших преимуществ подобных распределенных реконфигурируемых РТС — повышение устойчивости к отказам. При выходе из строя одного из манипуляторов он без проблем заменяется на запасной. Изложенное относится также к реконфигурируемым РТС с большим количеством автономных мобильных манипуляторов (3–6 и более).

РТС с тремя манипуляторами. Простая параллельная установка трех манипуляторов на общий корпус (рис. 8, *а*, *б*) является развитием схемы с двумя манипуляторами (рис. 7). Одно из УЗС ставится не непосредственно на корпус, а через манипулятор. Такая прямая модификация ничего нового не дает, но более сложна.

Но если на тот же корпус, кроме манипуляторов, установить дополнительное УЗС, то повышаются:

надежность передвижения перешагиванием по конструктивным элементам ОС за счет троирования захвата — в каждый момент не менее трех УЗС удерживают РТС на ОС;

жесткость и несущая способность системы при силовом воздействии на обслуживаемый объект (за счет фиксации РТС по трем разнесенным в плоскости конструктивным элементам ОС).

Робот с двумя манипуляторами, подобный верхнему поясу человека, устанавливают на ГМ, например Robonaut (NASA, США). При захвате одним из манипуляторов конструктивных элементов ОС блокируются колебания и зазоры в ГМ (рис. 8, *в*). Свободный манипулятор в состоянии выполнять операции (в том числе силовые) с высокой точностью. Но эта схема не дает серьезных преимуществ по сравнению с более простой, приведенной на рис. 3, *б*. Возможны операции одновременно двумя манипуляторами (рис. 8, *г*), например сборочные. Но после захвата одной части соединения и отпускания вторым манипулятором конструктивных элементов ОС начинаются колебания ГМ, что затрудняет захват второй части разъема.

Три автономных мобильных манипулятора в состоянии выполнять весьма сложные сборочные операции. Например, два манипулятора

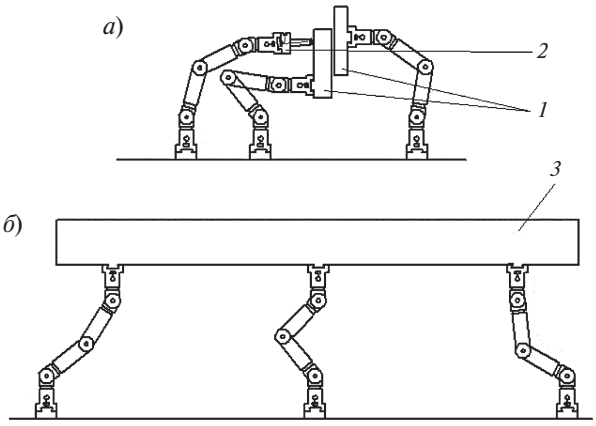


Рис. 9. Три автономных манипулятора:
а — процесс сборки; *б* — перенос крупного объекта

удерживают собираемые детали *1*, а третий *2* их скрепляет (рис. 9, *а*). Такие манипуляторы могут переносить громоздкие объекты *3* (рис. 9, *б*), причем в надежном режиме дублирования захвата опорных элементов в каждый момент времени.

РТС с четырьмя манипуляторами. Четыре манипулятора на общем корпусе образуют «приматоморфную» РТС (рис. 10). Основные ее преимущества — повышенная точность и жесткость фиксации на ОС за счет захвата за три разнесенных в плоскости конструктивных элемента. При этом четвертый манипулятор остается свободным для выполнения операций, требующих повышенной точности, жесткости и нагрузочной способности (рис. 10, *а*). При работе одновременно двумя манипуляторами, например сборке, корректная фиксация на ОС достигается за счет использования спаренных захватных устройств (рис. 10, *б*).

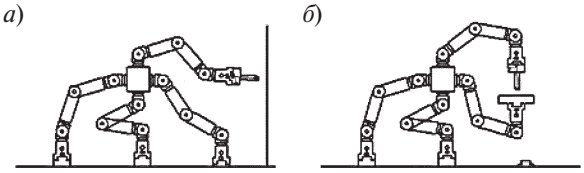


Рис.10. РТС с четырьмя манипуляторами
на общем корпусе:
а — воздействие на обслуживаемое оборудование;
б — работа одновременно двумя манипуляторами

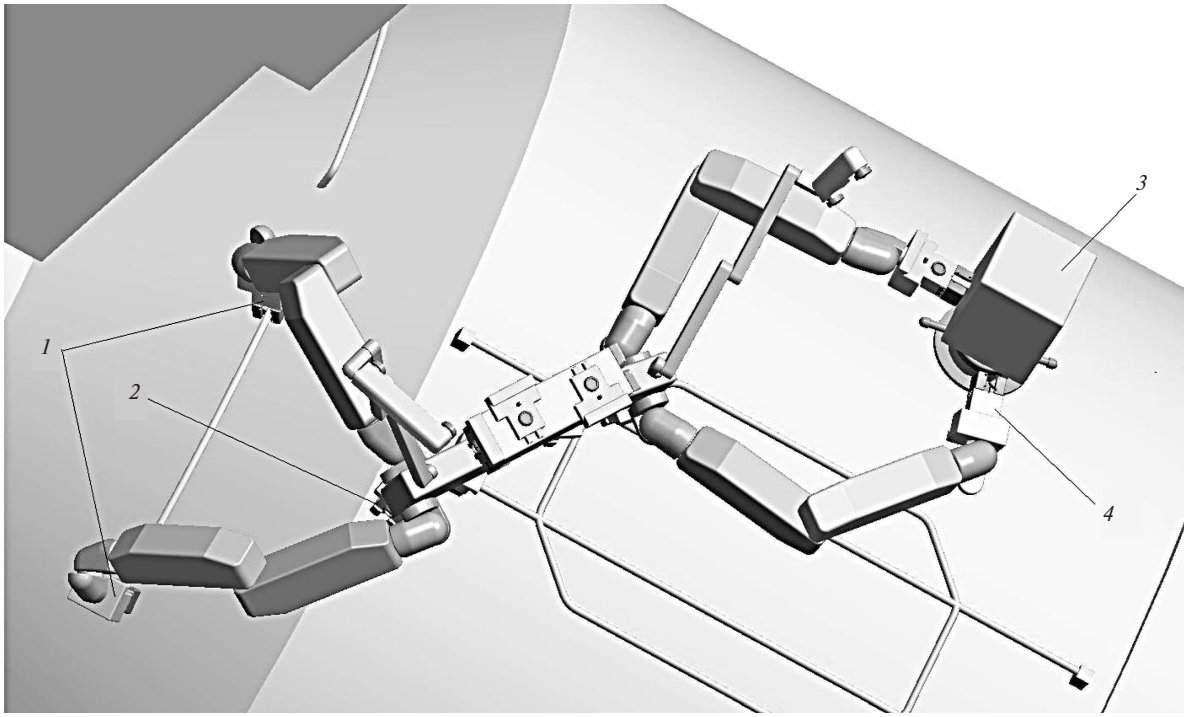


Рис. 11. Установка контейнера с научной аппаратурой агрегатом
из двух антропоморфных транспортно-манипуляционных систем

Для максимальной универсальности РТС подобно живым существам должны обладать четырьмя — шестью манипуляторами. В перспективе безусловно будут созданы такие устройства. Но при существующем уровне развития техники автоматизированного управления и привода эта задача слишком сложна. Самые простые устройства с одним манипулятором способны выполнять незначительную часть операций из полного перечня требуемых. Но они незаменимы для реконфигурации орбитальных станций и космических комплексов, а также работ в удаленных от основания зонах.

На орбитальных станциях и напланетных базах перед роботами ставится задача замены космонавтов в период их отсутствия или на опасных операциях*. Для этих функций наилучшим образом подходит антропоморфная компоновка в виде РТС с двумя манипуляторами, установленными на общем корпусе (например, показанная на рис. 5). Она в состоянии выполнить большинство требуемых функций. Но для особо сложных операций, преимущественно сборочных на большом удалении от опоры на такелажные элементы станции, требуются более сложные РТС с четырьмя манипуляторами. Однако их вывод на орбиту неоправдан из-за редкости таких операций. Более перспективно временное объединение нескольких РТС, например двух антропоморфных (рис. 11).

В таком агрегате УЗС *1* двух манипуляторов и УЗС *2* корпуса РТС обеспечивают надежную фиксацию на такелажных элементах, разнесенных в плоскости. Третий манипулятор устанавливает монтируемый объект *3* на базовую точку, а четвертый *4* — фиксирует его. Возможны и другие эффективные варианты группового использования нескольких мобильных РТС.

* **Градовцев, А.А.** Экстремальная робототехника — робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры [Текст] / А.А. Градовцев, А.С. Кондратьев, А.Н. Тимофеев // Экстремальная робототехника / Труды междунар. научно-техн. конф.— СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2011. — С. 23–29.

УДК 519.1: 655.1

А.В. Иванов, В.В. Ваганов, К.А. Котов

ВЫБОР СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

На заданном множестве производственных заказов, принятых в производство автоматизированной системой управления (АСУ) технологического процесса (ТП), путь реализации каждого заказа должен соответствовать наименее затратному пути в выбранной ресурсной метрике. Зная вершины наименее затратного маршрута распространения заказа по этапам производства, задействуют различные полиграфические производственные единицы, обеспечивающие именно принятые в АСУ ТП заказы.

Постановка задачи

Пусть на входе в АСУ ТП имеется N этапов производства на различных единицах технологического оборудования и M полиграфических заказов. Для каждой пары «этап — заказ» (I, J) можно построить путь, соединяющий эти два элемента и не заходящие в другие элементы. Пусть стоимость такого пути составит $A(I,J)$. Вне элементов пути не пересекаются. Требуется синтезировать алгоритм для нахождения самой дешевой системы путей, позволяющей попасть из любого этапа в любой заказ. Результаты нужно задать таблицей B[1:N,1:N], где $B[I,J] = 1$ тогда и только тогда, когда путь, соединяющий элементы I и J, следует строить.

Поиск на основе решения задачи о наименьшем разбиении

Сеть путей в пространстве оборудования АСУ ТП будет реализовывать некоторый связный (так как можно проехать из любого элемента в любой) граф без циклов (поскольку одно ребро из цикла можно выбросить, а связный граф останется связным). Поэтому алгоритм построения сети путей, суммарная стоимость которых минимальна, тривиален. На каждой итерации необходимо находить путь с минимальной стоимостью, который не образует цикла с уже выбранными путями на предыдущих итерациях. Основную трудность такого решения составляет проверка условия, образуют ли ребра цикл.

Однако решение существенно упрощается, если рассматривать только минимальные ребра только между двумя множествами — помеченных вершин и непомеченных вершин. Понятно, что эти множества должно соединять хотя бы одно ребро, чтобы граф был связным. Ясно, что оно должно быть минимальным по длине. В описываемом ниже алгоритме это делается следующим образом.

Для каждой вершины из множества непомеченных вершин (а на начальном этапе — это все вершины, кроме первой) определяется ближайшая вершина из множества помеченных вершин $\Omega[k]$. На каждой итерации с использованием массива Ω определяется кратчайшее ребро (i, j) между множествами помеченных вершин и непомеченных вершин. Найденное ребро выбирается для системы путей, а соответствующая вершина j считается помеченной. После этого пересчитывается массив Ω. При этом учитывается, что изменение некоторой величины Ω [k] может произойти только тогда, когда расстояние от k до j меньше, чем от k до Ω [k]. Алгоритм записан так:

для i от 1 до N выполнять
начало цикла
флаг[i]: = 0;
Ω [i]: = 1
конец цикла
флаг[1]: = 1;
для k от 1 до N-1 выполнять
начало цикла
мин.расст.: = бесконечность;
для i от 2 до N выполнять
если флаг[i] = 0 и мин.расст. > C[Ω [i],i]
то мин.расст.: = C[Ω [i],i];
j: = i;
Вывод ребра (Ω *[j],j*)
флаг[j]: = 1;
для i от 2 до N выполнять

если флаг[i] = 0 и C[Ω [i],i]>C[i,j],
то Ω [i]: = j;
конец цикла

Программно-алгоритмическая компонента решения

Пусть дан ориентированный граф (рис.1), его матрица смежности *A* и транспонированная матрица смежности *A**с единичными диагональными элементами.

Интерес представляют столбцы, содержащие единицу в первой строке, столбцы, содержащие единицу во второй строке и не содержащие в первой, и так далее. Используем дополнительную матрицу *B*l, ее тип:

type Pr = array[1..MaxN, 1..MaxN+1] of integer;
var *B*l:*Pr*,

где *MaxN* — максимальная размерность задачи. При инициализации матрица *B*l должна иметь вид: в первой строке — [1 2 3 .. *N*0]; все остальные элементы равны нулю.

Исходное предположение заключается в том, что все столбцы матрицы *A** имеют единицы в первой строке. Проверим его. Будем просматривать элементы очередной строки (*i*) матрицы *B*l. Если *B*l[*i*,*j*]<>0, то со значением *B*l[*i*,*j*] как номером столбца матрицы *A** проверим соответствующий элемент A*. При его неравенстве нулю элемент *B*l остается на своем месте, иначе он переписывается в следующую строку матрицы *B*l, а элементы текущей строки *B*l сдвигаются вправо, сжимаются. Для нашего примера матрица *B*l после этого преобразования будет иметь вид

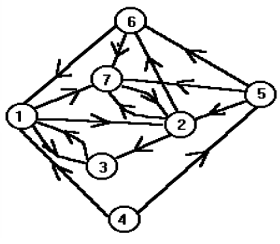
$$Bl = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 6 & 0 & \dots & 0 \\ 2 & 5 & 7 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

В задаче определены стоимости вершин графа, или стоимости столбцов матрицы *A**, и необходимо найти разбиение наименьшей стоимости. Пусть стоимости описываются в массиве Price (Price:*array*[1..*MaxN*] *of integer*) и для примера, приведенного на рисунке, имеют значения [15 13 4 3 8 9 10]. Осталась чисто техническая деталь — отсортировать элементы каждой строки матрицы *B*l по возрастанию стоимости соответствующих столбцов матрицы *A**. Результирующая матрица *B*l имеет вид:

$$Bl = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 6 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 5 & 7 & 2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Логика формирования матрицы приведена ниже по тексту.

procedure Blocs;*{выделения блоков}*
{Bl — глобальная переменная}
procedure Sort;
{Price и Bl — глобальные переменные}
begin
...
end;
procedure Press(*i*,*j*:*integer*);*{Сдвигаем элементы строки с номером i начиная с позиции* (*столбца*) *j на одну позицию вправо}*
{Bl — глобальная переменная}
var k:integer;
begin
k: = j;
while Bl[i,k]<>0 do begin{Поэтому размерность матрицы с плюс единицей. В последнем столбце строки всегда записан 0.}
Bl[i,k]: = Bl[i,k+1];
Inc(*k*);
end;*{while}*
end;*{Press}*



$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \qquad A^* = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Рис.1. Исходные данные задачи о наименьшем разбиении

```
var i,j,cnt:integer;
begin
FillChar(Bl,SizeOf(Bl),0);
for i: = 1 to N do Bl[1,i]: = i;{предполагается, что
в первом блоке все столбцы}
for i: = 1 to N-1 do begin
j: = 1;cnt: = 0;
while Bl[i,j]<>0 do begin
if A*[i,Bl[i,j]] = 0 then begin{столбец не в этом
блоке}
Inc(cnt);
Bl[i+1,cnt]: = Bl[i,j];{переписать в следующую
строку}
Press(i,j);
Dec(j);
end;{if}
Inc(j);
end;{while}
end; {for}
Sort;
end;{Blocs}
```

Матрица *B*l разбита на блоки, и необходимо выбрать по одному элементу (если соответствующие строки еще не покрыты) из каждого блока. Процесс выбора следует продолжать до тех пор, пока не будут включены в «покрытие» все строки или окажется, что некоторую строку нельзя включить.

Если при поиске независимых множеств шли «сверху вниз», последовательно уточняя логику, то сейчас необходимо идти «снизу вверх», складывая окончательное решение из сделанных «кирпичиков». Начать следует со структур данных. Ищется лучшее решение, т. е. то множество столбцов, которое удовлетворяет условиям задачи (непересечение и «покрытие» всего множества строк) и суммарная стоимость которого минимальна. Значит, необходима структура данных для хранения этого множества и значения наилучшей стоимости, а также структуры данных для хранения текущего (очередного) решения и его стоимости. В решении строка может быть или не быть. Следовательно, требуется фиксировать эту информацию:

```
type Model = array[1..MaxN] of boolean;
varSbetter:Model;Pbetter:integer;{лучшее решение}
S:Model;P:integer;{текущее решение}
R:Model;{R[i] = true — признак «покрытия»
строки i текущим решением}
```

Логика включения (исключения) столбца с номером *k* в решение (из решения) имеет вид:

```
procedure Include(k:integer); {включить столбец
в решение}
{A*, R, Price, S, P — глобальные переменные}
var j:integer;
begin
P: = P+Price[k];{текущая цена решения}
S[k]: = true;{столбец с номером k в решение}
for j: = 1 to N do
if A*[j,k] = 1 then R[j]: = true; {строки, «покрытые» столбцом k}
end;{Include}
procedure Exclude(k:integer);{исключить столбец
из решения}
var j:integer;
begin
p: = p-Price[k];
S[k]: = false;
for j: = 1 to N do if (A*[j,k] = 1) and R[j] then R[j]:
= false;
end;{Exclude}
```

Проверка того, сформировано ли решение, заключается в просмотре массива *R* и определении, все ли его элементы равны истине:

```
function Result:boolean;
var j:integer;
begin
j: = 1;
while (j< = N) and R[j] do Inc(j);
if j = N+1 then Result: = true else Result: = false;
end; {Result}
```

Также, необходимо определить, можно ли столбец с номером *k* включать в решение. Для этого следует просмотреть столбец с номером *k* матрицы *A** и проверить, нет ли совпадений единичных элементов со значением *true* и соответствующих элементов массива *R*:

```
function Cross(k:integer):boolean; {пересечение
столбца с частичным решением, сформированным ранее}
var j:integer;
begin
j: = 1;
while (j< = N) and Not(R[j] and (A*[j,k] = 1))
do Inc(j);
if j = N+1 then Cross: = true else Cross: = false;
end;{Cross}
```

Заключительная логика поиска (*Find*) имеет в качестве параметров номер блока (строки матрицы *Bl*) —переменная *bloc* и номер позиции в строке. Первый вызов — *Find*(1,1).

```
procedure Find(bloc,jnd:integer);
{переменные глобальные}
begin
if Result then begin if P<Pbetter then begin Pbetter:
= P;
Sbetter: = S;
end;
end
else if Bl[bloc,jnd] = 0 then exit
else if Cross(Bl[bloc,jnd]) then begin
Include(Bl[bloc,jnd]);
Find(bloc+1,1);
Exclude(Bl[bloc,jnd]);
end
else if R[bloc] then Find(bloc+1,1);
Find(bloc,jnd+1);
end;{Find}
```

Общая логика, метода решения задачи о наименьшем разбиении:

```
program R_min;
const MaxN = ...;
type ... var ...
procedure Init; {ввод и инициализация данных}
begin
...
end;
procedure Print;{вывод результата}
begin
...
end;
{процедуры и функции, рассмотренные ранее}
{основная логика}
begin
Init;
Blocs;
Find(1,1);
Print;
end.
```

Таким образом, разработаны элементы программного комплекса, реализующего алгоритмы синтеза последовательности этапов полиграфического производства с учетом многовариантного состава единиц технологического оборудования на основе комбинаторного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миронова, Г.В.** Организация полиграфического производства [Текст] / Г.В. Миронова [и др.].— М.: Изд-во МГУП, 2002.— 352 с.

2. **Раскин, А.Н.** Технология печатных процессов [Текст] / А.Н. Раскин [и др.].— М.: Книга, 1989.— 367 с.

3. **Волкова, Л.А.** Издательско-полиграфическая техника и технология [Текст] / Л.А. Волкова.— М.: Изд-во МГУП, 1999.— 143 с.

4. **Акулич, И.Л.** Математическое программирование в примерах и задачах [Текст] / И.Л. Акулич.— М.: Высш. шк., 1986.— 319 с.

5. **Назаров, А.В.** Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем [Текст] / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов.— СПб.: Наука и Техника, 2003.— 384 с.

6. **Page, E.W.** Algorithm development for neural networks [Текст] / E.W. Page, G.A. Tagliarini // SPIE.— 1988.— Vol. 880.— P. 11–19.

УДК 303.732.4

Ю.А. Голуб, О.А. Матенёв

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКОГО КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ: АНАЛИЗ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ

Важнейшая задача проектирования структуры любой базы данных (БД) — обеспечение работы с самыми разнообразными типами и источниками информации. В соответствии с реальной практикой источниками и потребителями информации служат не только подразделения

данного предприятия, головная контора холдинга или аппарат министерства, но и предприятия других отраслей (возможные поставщики и потребители, государственные регламентирующие органы и др.). Принцип глобализации бизнеса диктует: источники и потребители информации будут находиться в любой географической точке, где это окажется нужно.

Отсюда следуют стратегические для структуры БД и информационной системы (ИС) в целом решения. Объединение требований к динамике и разнообразию типов информационных потоков, обрабатываемых в ИС, с учетом роста их объемов и требований к разнообразию методов обработки позволяет дать следующую обобщенную характеристику технологий, формирующих структуру БД в составе ИС:

компонентная технология проектирования и перекомплектации предметноориентированных операционных БД, допускающих работу пользователей через общие, в том числе для хранилища данных (ХД), интерфейсы;

расширенная технология хранилища данных, интегрирующая исторические форматированные данные, архивные текстовые документы, звуковые и видеоархивы, а также картографические данные и включающая средства оперативной аналитической обработки данных и необходимые виды «дружественных» интерфейсов, например гипертекстовый, геоинформсистем (ГИС) и др.;

открытость БД для включения в нее и получения из нее информации с использованием принципов глобальной информационной магистрали (ГИМ);

структура открытых систем (СОС), расширенная методами и средствами компонентного формирования: на верхнем уровне это открытость компонентного проектирования БД и свободного обмена с источниками информации любых внешних систем, на нижнем уровне — технологическая открытость БД на основе стандартов переносимости, интероперабельности, масштабируемости и др.

Расширенная технология интегрального хранилища (ИХ) заставляет на новой основе ставить вопрос о разработке интегрированной совокупности интерфейсов пользователя, которая создавала бы естественные условия для работы с информацией и функциями вне зависимости от того, к какому классу хранимых данных разработчик вынужден отнести сегодня его (пользователя) информацию.

Исключение избыточности данных выдвигает требование однократного ввода данных в БД для решения разных задач и защиты от возникновения противоречий (нарушение логической целостности) при актуализации хранимых данных. Однако в условиях глобального информационного пространства и компонентного проектирования контекст этих требований должен быть пересмотрен. Несомненно, в операционных БД рационально планировать «острова» нормализованных и в классическом смысле безызбыточных кластеров отношений или объектов. Эти «острова» чаще всего и будут давно известными предметными БД. Вместе с тем объединение исторических данных из ХД, БД ГИС-систем, архивов текстовых документов, потоков информации, получаемых по информационной магистрали (ИМ) и др., в общей постановке проектирования корпоративной БД приводит к отказу от повсеместного и всеобязательного принципа исключения избыточности: проектирование корпоративной БД на уровне логической схемы и на концептуальном уровне не

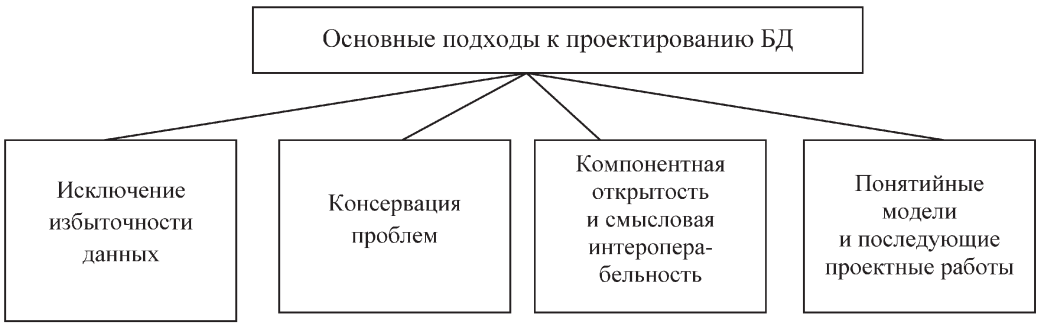


Рис. 1. Основные подходы к проектированию БД

опирается как на глобальный критерий на требование и процедуры исключения избыточности в данных.

Новая ситуация, включая существенный и заранее нерегламентированный поток информации из ИМ в корпоративную БД, потребует разработки или увеличения возможностей «процедур отождествления» экземпляров информационных структур, т. е. определения того, что эти экземпляры описывают один и тот же предмет реального мира.

Консервация проблем. Сам характер дисциплины проектирования, предусмотренный каскадной схемой, методами структурного проектирования, иерархическими подходами и структурами, подталкивает сейчас проектировщиков фиксировать достаточно жестко определенные модели предметной области (ПрО). Должна быть изменена CASE-технология проектирования БД таким образом, чтобы исключить консервацию существующих проблем предприятий в жестких, «цельноинтегрированных» структурах БД. Для этого может потребоваться изменение не только технологии, но и инструментов проектирования. Предполагаемые подходы:

возможность фиксировать описания атрибутов, сущностей, связей, функций и т. д. с любой степенью неполноты, производить описания на уровне недетализированных, предметно связанных совокупностей информационных структур («кластеры сущностей»);

проектирование или реконструкция моделей компонентов ИС и БД, их интеграция в общем понятийном пространстве;

проектирование упорядоченной последовательности состояний корпоративной БД как последовательности совокупностей эксплуатируемых предметных баз данных, включающих наследованные БД, структурно предопределенные БД «покупных» функциональных компонентов, спроектированные специально для данного предприятия БД и причем две последние категории постепенно заменяют наследованные, а затем и параллельно заменяют друг друга в процессе развития ИС;

открытость репозитория CASE-системы, словаря СУБД и системы 4GL, позволяющая надстраивать метаобъекты и механизмы требуемыми тезаурусными и глубинными семантическими отношениями между элементами, а также производить двухсторонний обмен метаинформацией с другими системами 4GL и CASE, соединять модели разных компонентов в одну с использованием и сохранением всех необходимых семантических отношений.

Компонентная открытость и смысловая интероперабельность. Компонентный подход в разработке ИС требует компонентного проектирования БД. Замена некоторой функциональной компоненты ИС на подобную, но спроектированную другим разработчиком, потребует структурной замены некоторой части корпоративной БД. Такая замена должна поддерживаться как постоянный процесс перепроектирования БД. При замене компоненты БД интерфейсы имеющихся приложений и их пользователей должны получать точно ту же в смысловом отношении информацию, что и ранее.

Реальное компонентное проектирование БД может основываться на формировании и использовании общей для комплексируемых компонент понятийной модели и поддержании соответствий между моделями компонент БД (а также связанных с ними приложений) и общей понятийной моделью. В последнее время развиваются программные реализации полных формальных систем, обычно основанных на объектном подходе, которые могут приближаться к инструментальному решению этой задачи. [1]

Понятийные модели и последующие проектные работы. На последующих этапах проектирования собственно БД понятийную модель продолжают использовать, имея в виду различные цели, например:

разработку совокупности разных предметных информационных моделей с выделением общих информационных сущностей;

разработку функциональных моделей разных типов;

разработку семантически богатых средств поддержки пользователя и др.

На этапе проектирования необходимо предусмотреть все возможные действия, которые могут возникнуть на различных стадиях жизненного цикла БД.

На этапе анализа концептуальных требований и информационных потребностей решаются следующие задачи:

анализ требований пользователей к БД (концептуальные требования);

выявление имеющихся задач по обработке информации, которая должна быть представлена в БД (анализ приложений);

выявление перспективных задач (перспективные приложения);

документирование результатов анализа.

Требования пользователей к разрабатываемой БД представляют собой список запросов с указанием их интенсивности и объемов данных. Эти сведения разработчики получают в диалоге с будущими пользователями БД. Здесь же выясняют требования к вводу, обновлению и корректировке информации. Требования пользователей уточняют и дополняют при анализе имеющихся и перспективных приложений.

Широко известные методы проектирования баз данных появились в процессе разработки все более сложных ИС, которые должны были рассматривать потребности не одного пользователя, но больших групп и коллективов. Одна такая интегрированная БД создавалась для решения многих задач, каждая из которых использовала только свою часть данных, обычно пересекающуюся с частями, используемыми в других задачах. Поэтому главнейшими методами проектирования стали методы исключения избыточности в данных. Эти методы связывались с другими средствами обеспечения логической целостности данных.

Было сформулировано принципиальное требование отделения программ от интегрированных данных. Этот принцип, направленный на отчуждение данных в качестве ресурса предприятия, важен также тем, что консервативные по характеру данные отделялись от прикладных программ, которые могли часто подвергаться изменениям.

Другой важной проблемой проектирования БД стало обеспечение нужных эксплуатационных параметров (объем внешней памяти, время выполнения различных операций). Известны и другие требования. Например, информация не должна потеряться не только из-за отказов оборудования, но и вследствие ошибки пользователя. Это отличается от того положения, при котором тот, кто решает некую задачу, сам и отвечает за сохранность данных для нее.

Сформировалось понимание интегрированной БД как общего информационного ресурса предприятия. Хранимые данные стали аналогичны большому компьютеру, который одновременно используется многими пользователями с различными целями и должен быть все время работоспособен.

Классическая методология проектирования БД — это мощное и красивое течение со своей философией, способами восприятия реальности и способами существования в ней. В этом течении возникла своя прикладная математика, свое понятие «Мира», «Предметной Области» и их моделей. В отношении проектирования БД осознаны и интегрированы в стройные схемы методы выполнения таких проектных этапов:

сбора сведений о ПрО (анализ потребностей и описание ПрО с использованием так называемых «процессного», или up — «usage perspective», подхода и «непроцессного», или isp — «information structure perspective», подхода);

выбора языка представления так называемой «семантической» модели для фиксации сведений о ПрО, их последующего анализа и синтеза модели БД;

анализа собранных сведений о ПрО (классификация, формализация и интеграция структурных элементов описания ПрО; формализация как структурных, так и процедурных ограничений целостности элементов в будущей модели ПрО; определение динамики экземпляров объектов ПрО);

синтеза концептуальной модели БД (проектирование целостной концептуальной схемы БД на выбранном языке семантического моделирования);

выбора конкретной модели данных и СУБД для реализации БД; проектирования логической схемы БД для выбранной СУБД («проектирование реализации»);

разработки физической структуры БД («физическая», или «внутренняя», схема, она же — «схема размещения»), включая размещение БД по узлам;

разработки технологии и процедур начального создания и заполнения БД;

разработки технологии и процедур сопровождения БД, а также универсальных программ доступа к БД и соответствующих интерфейсов пользователей;

информационного обеспечения разработки конкретных программ обработки данных (ме-

таинформация, данные контрольных примеров и др.);

получения обратной связи от разработчиков прикладных программ и пользователей ИС о полноте и эффективности организации БД;

тестирования БД, ее развития и улучшения (настройка) ее структуры.

Требования к базе данных

Чтобы обеспечить максимальные возможности для каждого пользователя, т. е. поддержку выполнения всех бизнес-функций тем пользователем, который и получает конечный результат, со стороны ИС, БД и СУБД требуются [2, 4]:

средства доступа ко всем необходимым данным с использованием распределенных БД, средства репликаций данных, управления событиями в данных и процессах обработки транзакций;

использование архитектуры и разнообразных программных средств — хранилища данных, оперативной аналитической обработки данных (OLAP), быстрой разработки приложений (RAD) к «ИС руководителя» (EIS), поддержки принятия решений (DSS) на основе хранилища данных, OLAP и RAD/EIS;

применение средств DSS на основе анализа БД прецедентов, а также методов логического вывода, нейронных сетей и нейрокомпьютеров и др.;

единый интерфейс пользователя для работы с разными компонентами данных и приложений, использование в этом интерфейсе средств, повышающих простоту поиска информации и обращения к конкретным прикладным функциям (например, функции геоинформсистем, гипертекстовые, естественного языка, речевого ввода).

Разработка концепции и структуры корпоративной базы данных для новой ИС, реализация структуры БД предполагают снятие (существенное уменьшение) ограничений на ее развитие, в том числе при смене функций или функциональных компонентов обработки информации, за счет:

применения методов компонентного проектирования предметных БД как для операционных, так и для исторических БД, хранилищ данных, архивов документов, геоинформационных и иных данных;

разработки процедур компонентного изменения корпоративной БД при изменении бизнес-процедур, видов деятельности, применяемых приложений и географического размещения предприятия;

постоянной актуализации понятийной модели деятельности предприятия для учета новых понятий, возникающих при замене прикладных компонент на функционально сходные и при изменении видов деятельности предприятия, и построения на этой основе новых интерфейсов между компонентами ИС;

динамического администрирования и управления фрагментами распределенной корпоративной БД в случае изменения частоты их использования, при модификации структуры этих баз и изменении их размещения.

Одним из главных методов проектирования считается метод «организации запросов». Ему уделяется особое место в каждом проекте структуры БД, так как именно на основе этого метода создается основной интерфейс пользователя (ответ пользователю на запросы).

Рис. 2 иллюстрирует взаимодействие пользователя, СУБД и операционной системы (ОС) при обработке запроса на получение данных. Цифрами помечена последовательность взаимодействий [3]:

1 — пользователь посылает СУБД запрос на получение данных из БД.

2 — анализ прав пользователя и внешней модели данных, соответствующей данному пользователю, подтверждает или запрещает его доступ к запрошенным данным.

3 — в случае запрета на доступ к данным СУБД сообщает пользователю об этом (стрелка *12*) и прекращает дальнейший процесс обработки данных; в противном случае СУБД определяет часть концептуальной модели, которая затрагивается запросом пользователя.

4 — СУБД получает информацию о запрошенной части концептуальной модели.

5 — СУБД запрашивает информацию о местоположении данных на физическом уровне (файлы или физические адреса).

6 — в СУБД возвращается информация о местоположении данных в терминах операционной системы.

7 — СУБД просит операционную систему предоставить необходимые данные, используя средства операционной системы.

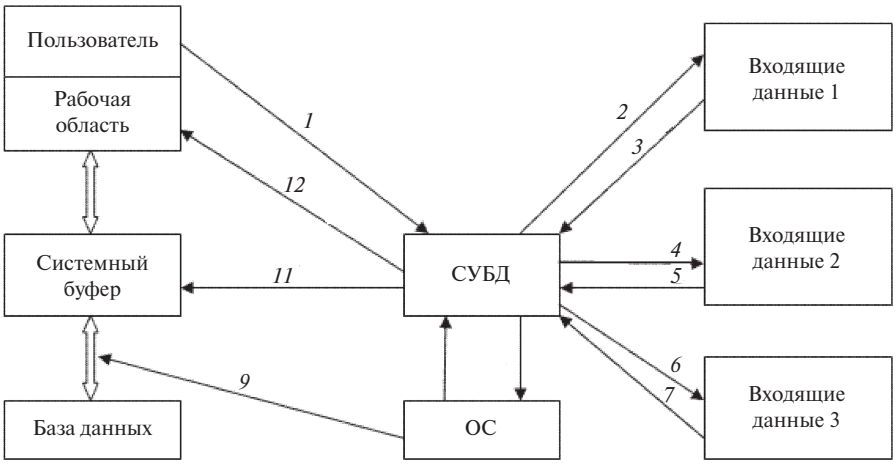


Рис. 2. Схема прохождения запроса к БД

8 — операционная система осуществляет перекачку информации из устройств хранения и пересылает ее в системный буфер.

9 — операционная система оповещает СУБД об окончании пересылки.

10 — СУБД выбирает из доставленной информации, находящейся в системном буфере, только то, что нужно пользователю, и пересылает эти данные в рабочую область пользователя.

Проектирование и реализация проекта базы данных — достаточно длительный процесс, в течение которого могут возникнуть потребность в корректировке проекта, а также затруднения в выполнении некоторых принятых проектных решений.

Поэтому в проектировании БД существенное значение имеет создание многомерной структуры. При проектировании БД мониторинга показателей особое место занимает распределение накопленной информации по ним в структуре БД.

Предлагаемая структура распределения показателей в процессе проектирования БД позволяет отслеживать возникающие трудности и принимать необходимые решения на этапах разработки и реализации проекта.

Представляется, что в базе данных особое место занимает проверка того, как соотносятся входящие показатели, характеризующие процессы в кластере, и непосредственно эти процессы (рис. 3).

На основании анализа задач экономического мониторинга построена модель БД, позволяющая хранить данные мониторинга в различных разрезах.

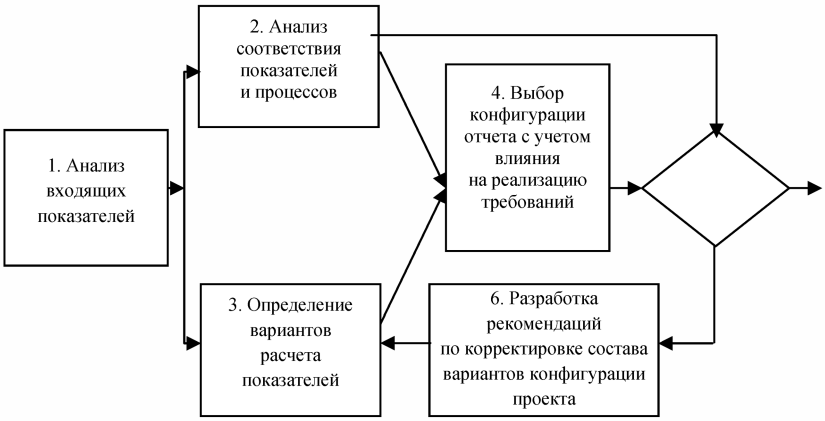


Рис. 3. Структура распределения показателей

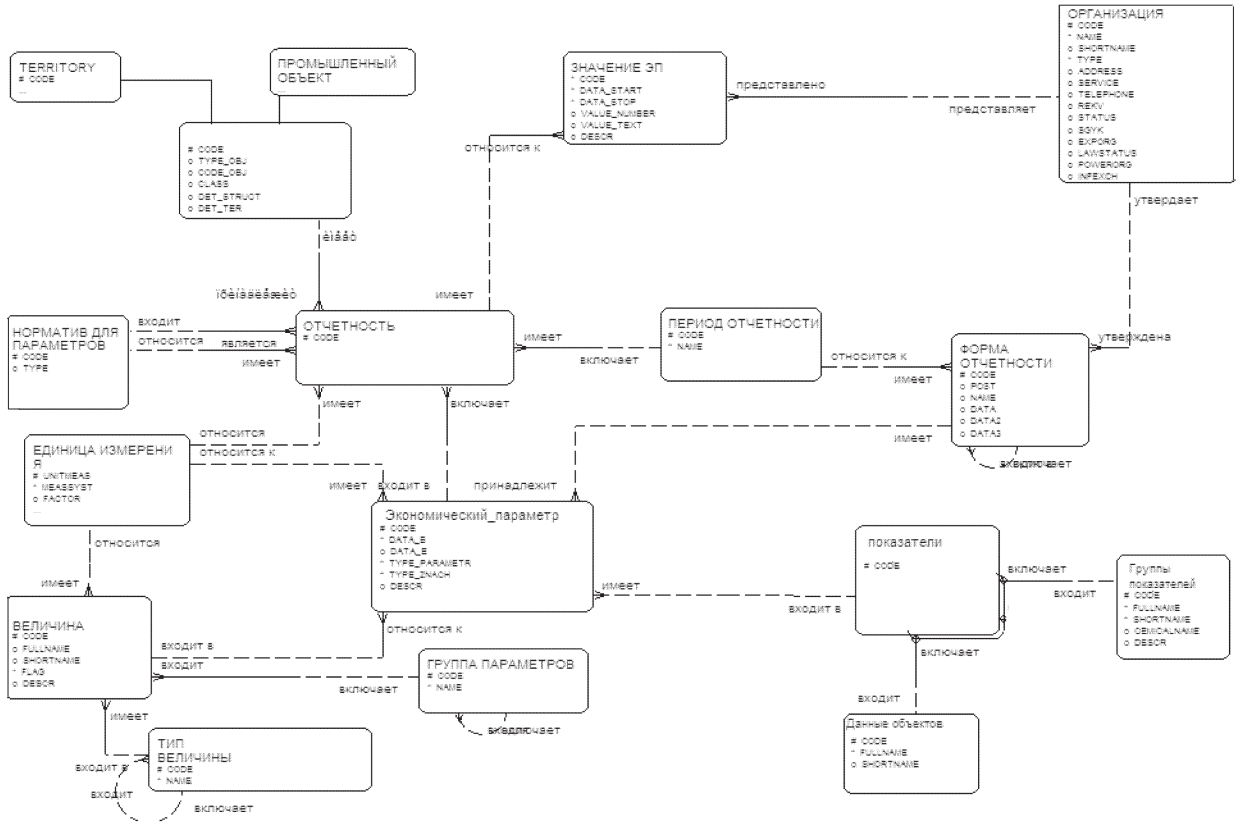


Рис. 4. Логическая модель базы данных

Данные разделяются:

по экономическим показателям (величинам);

по объектам мониторинга;

по организации — источнику данных.

На рис. 4 приведена схема логической модели БД «Экономический мониторинг».

Полученная логическая модель данных ложится в основу формирования структуры БД и общего проекта.

Использование типовых методов и подходов проектирования позволяет наладить процесс создания и разработки базы данных, избежать логических ошибок в структуре, выбрать оптимальную среду разработки и заранее определить набор параметров и функций самой базы данных.

Таким образом, проведен анализ основных подходов и методов проектирования баз данных, даны краткие характеристики, а также рассмотрен пример разработки структуры базы данных с использованием выделенных методов и подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зиндер, Е.З.** Критерии выбора современной СУБД как объекта инвестиций для развития предприятия [Текст] / Е.З. Зиндер // СУБД.— 1995. № 1.

2. **Денисов, А.А.** Основы теории систем и системного анализа [Текст]: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Системный анализ и управление» [Текст] / А.А. Денисов.— Изд-е 2-е, перераб. и доп.— СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001.

3. **Новиков Ю.** Компьютеры, сети, Интернет, Энциклопедия [Текст] / Ю. Новиков, Д. Новиков, А. Черепанов, В. Чуркин.— СПб.: Питер, 2002.— 928 с.: ил.

4. **Юрьев, В.Н.** Информационные системы в экономике [Текст]: Учебник / В.Н. Юрьев, В.Н. Волкова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 538 с.

УДК 622:691.4.052.012

Б.Ю. Васильев

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МЕТОДАМИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Одно из важнейших направлений развития газовой отрасли — энергоэффективность, энерго- и ресурсосбережение при транспортировке природного газа по магистральным газопроводам. В работе [1] выделены следующие основные мероприятия по эффективному развитию газотранспортной промышленности: реконструкция газотранспортных объектов и системная организация технологических режимов работы газопроводов; сокращение потерь газа; внедрение автоматизированных систем управления и телемеханики; улучшение технического состояния газоперекачивающих агрегатов (ГПА); расширение использования регулируемых электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА). Также в [1] отмечено, что использовать природный газ необходимо не только в качестве топлива, но и как ценное химическое сырье. Широкое развитие должны получить высокотехнологичная газохимия и производство синтетического жидкого топлива на основе газа. Невозобновляемость природного газа, истощение основных и большая удаленность открываемых месторождений, большие экспортные обязательства страны делают проблему эффективности газотранспортной промышленности особо острой.

Газотранспортная система России создавалась на протяжении последних 50 лет и продолжает интенсивное развитие сегодня. В состав системы входят свыше 160 000 км газопроводов, около 260 компрессорных станций, на которых эксплуатируются более 4000 ГПА суммарной мощностью более 40 млн кВт. Российская газотранспортная система обеспечивает транспортировку более 570 млрд м^3 в год природного газа от месторождений к потребителям как внутри страны, так и за рубежом [2].

Около 86 % парка ГПА имеют газотурбинные приводы, 90 % которых морально и физически устарели. Усредненный коэффициент полезного действия (КПД) газотранспортной системы — 20–25 %. На долю агрегатов с электроприводом приходится около 14 %, более 70 %, которых имеет срок службы около 20 лет, а отдельные — 30–40 лет. Большинство ЭГПА — нерегулируемые. Для некоторых газопроводов характерна работа в режиме падающей газоподачи и газопотребления. Это приводит к изменению режимов и энергетических свойств ЭГПА, которое в конечном счете выражается в повышенном энергопотреблении.

Энергоэффективные алгоритмы управления ЭГПА

Для высоковольтного ЭГПА наиболее целесообразно использовать многоуровневые преобразователи частоты (МПЧ) с пространственно-векторной модуляцией (ПВМ). МПЧ могут включать в себя различное количество низковольтных ячеек, соединенных последовательно в каждой фазе нагрузки. Структурная схема представлена на рис. 1.

Обеспечение высокого уровня энергетической эффективности и управления ЭГПА во многом зависит от структуры, а именно, схемы преобразователя частоты, типа полупроводниковых ключей, способа модуляции, типа электродвигателя и логических алгоритмов управления (ЛАУ) коммутаторами, активным выпрямителем (АВ) и инвертором (И).

В последнее время в области управления и автоматизации электротехнических комплексов, в состав которых входит электропривод, широкое распространение получили алгоритмы, основанные на методах искусственного интеллекта, нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмах. Эти алгоритмы позволяют преодолевать неопределенности различного вида (компенсации, парирования, подавления) и повысить качество управления, имея при этом простую структуру вычислительного алгоритма.

Различные структуры нечетких систем управления электроприводом приведены в [3–5]. Нечеткие системы в этих работах отличаются по

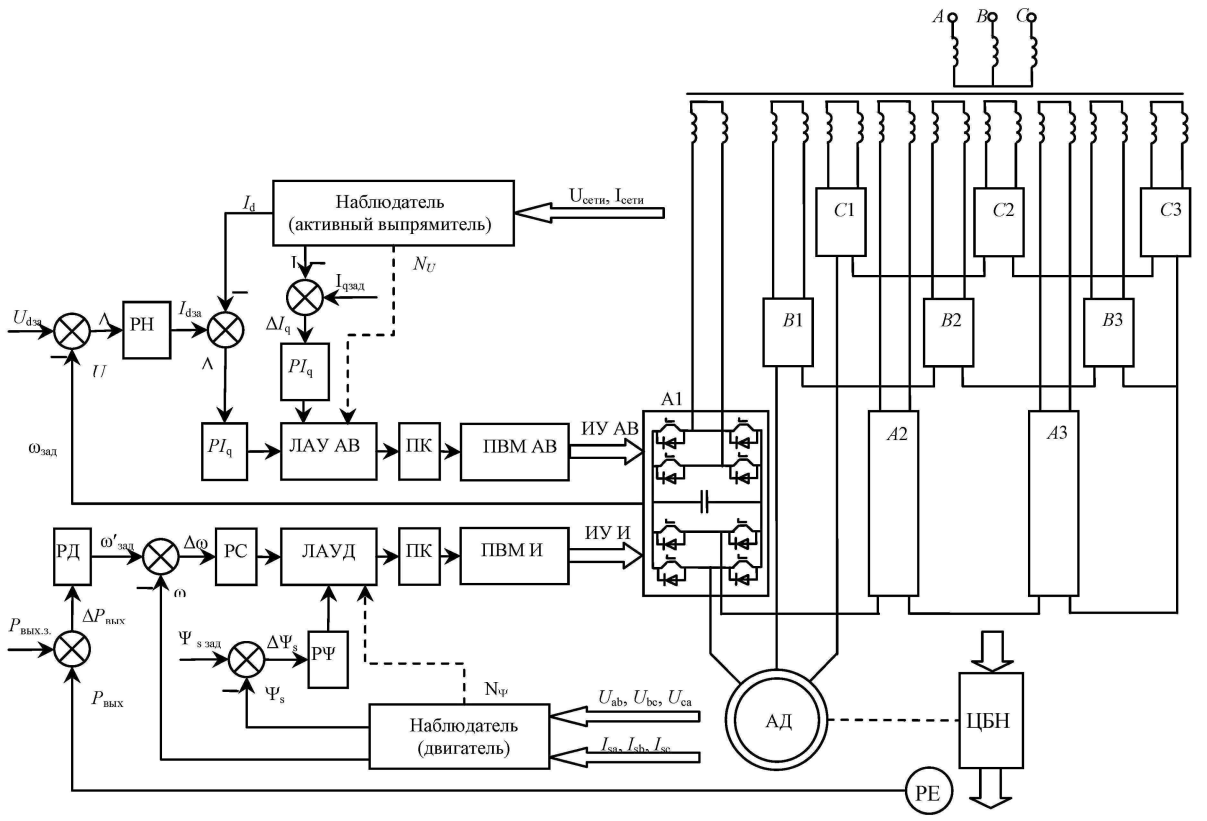


Рис. 1. Структурная схема ЭГПА

количеству входных и выходных переменных, базам знаний, операциям логического вывода и др. Рассматриваемый в статье нечеткие ЛАУ АВ и И рассчитаны на использование трех входных и одной управляющей (выходной) переменной, которые представлены в таблице.

Процедура нечеткого вывода основана на алгоритме минимаксного вывода Мамдани. Операции агрегирования и активации производятся с использованием операции логической конъюнкции. Процедура композиции, в результате которой получается итоговое нечеткое мно-

Входные и выходные переменные ЛАУ АВ и И

Алгоритм	Переменные	
	Входные	Выходные
ЛАУ активного выпрямителя	Активная составляющая сетевого тока (ΔI_d). Реактивная составляющая сетевого тока (ΔI_q). Угол поворота вектора сетевого напряжения (N_U)	Результирующий вектор напряжения активного выпрямителя
ЛАУ инвертора	Потокосцепление статора ($\Delta\Psi$). Электромагнитный момент (ΔM). Угол поворота вектора потокосцепления (N_Y)	Результирующий вектор напряжения инвертора

жество для управляющей переменной с результирующей функцией принадлежности, выполняется по операции дизъюнкции. Приведение к четкости (дефаззификация) основано на центроидном методе.

Эффективность ЭГПА с нечетким управлением в сравнении с векторным алгоритмом была проверена на имитационных моделях, созданных в MatLab Simulink, Sim Power System и Fuzzy Logic Toolbox. Моделирование производилось для высокооборотного электродвигателя (мощность 6300 кВт, напряжение 6000 В, частота вращения 8200 об/мин).

На рис. 2, *а*, *б* приведены осциллограммы заданной и действительной частоты вращения и электромагнитного момента электродвигателя, отнесенных к их номинальным значениям, при векторном и при нечетком управлении. Анализ осциллограмм показывает, что время регулирования частоты вращения при нечетком управлении меньше на 32 %. Амплитуда пульсаций электромагнитного момента при нечетком управлении в установившемся режиме — 5–7 % от номинального значения, а при векторном управлении — около 27 %, т. е. в 4,5 раз больше.

На рис. 2, *в*, *г* приведены осциллограммы потребляемой мощности (P — активная, Q — реактивная), которые показывают, что при наличии в преобразователе частоты активных выпрямителей и нечетком алгоритме управления электропривод потребляет чисто активную мощность. Коэффициент полезного действия в установившемся режиме работы электропривода при нечетком управлении выше на 24 % и равен 0,87 (см. рис. 2, *е*), аналогичный показатель при векторном управлении — 0,65 (рис. 2, *д*).

Нечеткий алгоритм управления обеспечивает значительное снижение коэффициента несинусоидальных искажений формы тока в сети электроснабжения.

На рисунке 3, *а* и 3, *б* представлены осциллограммы токов, которые потребляет электропривод соответственно с векторным и нечетким управлением, и их спектральный состав. При нечетком управлении все гармоники не превышают 2 %, практически полностью подавляются

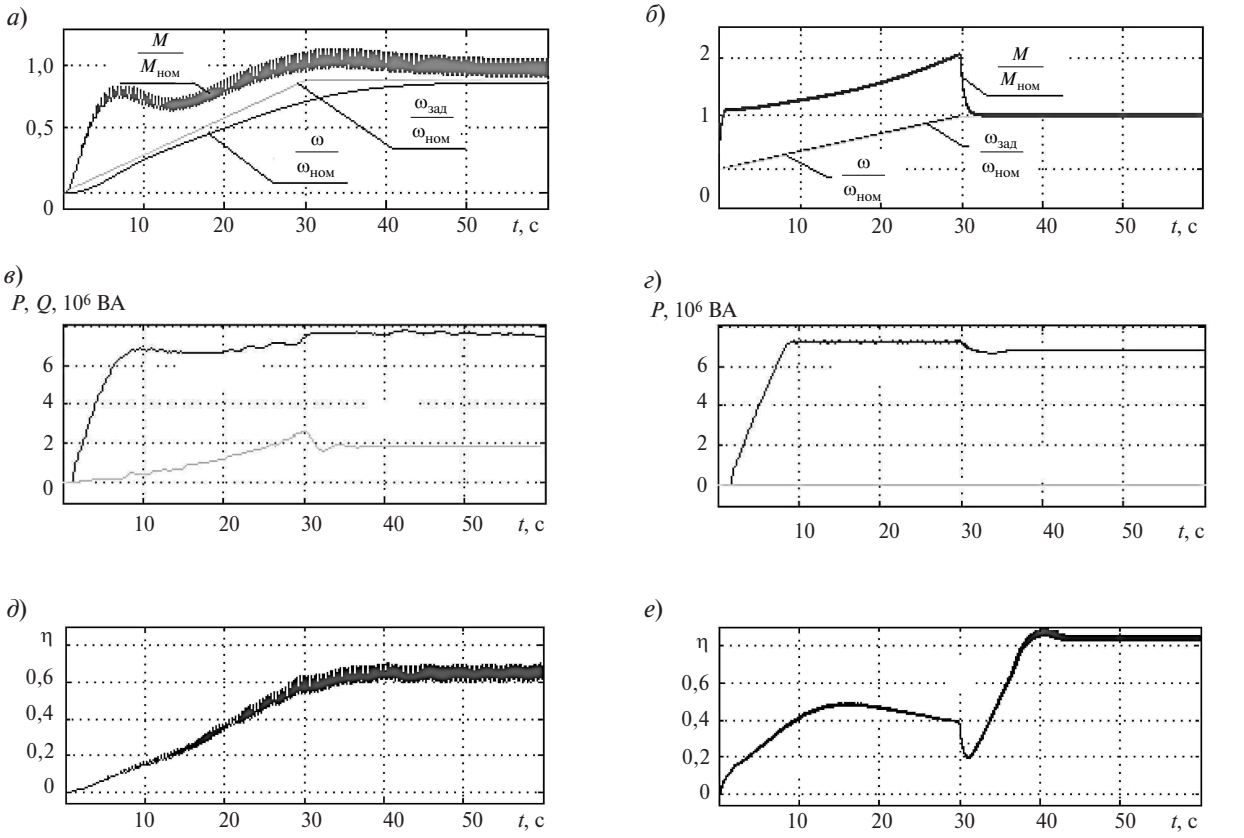


Рис. 2. Осциллограммы электропривода

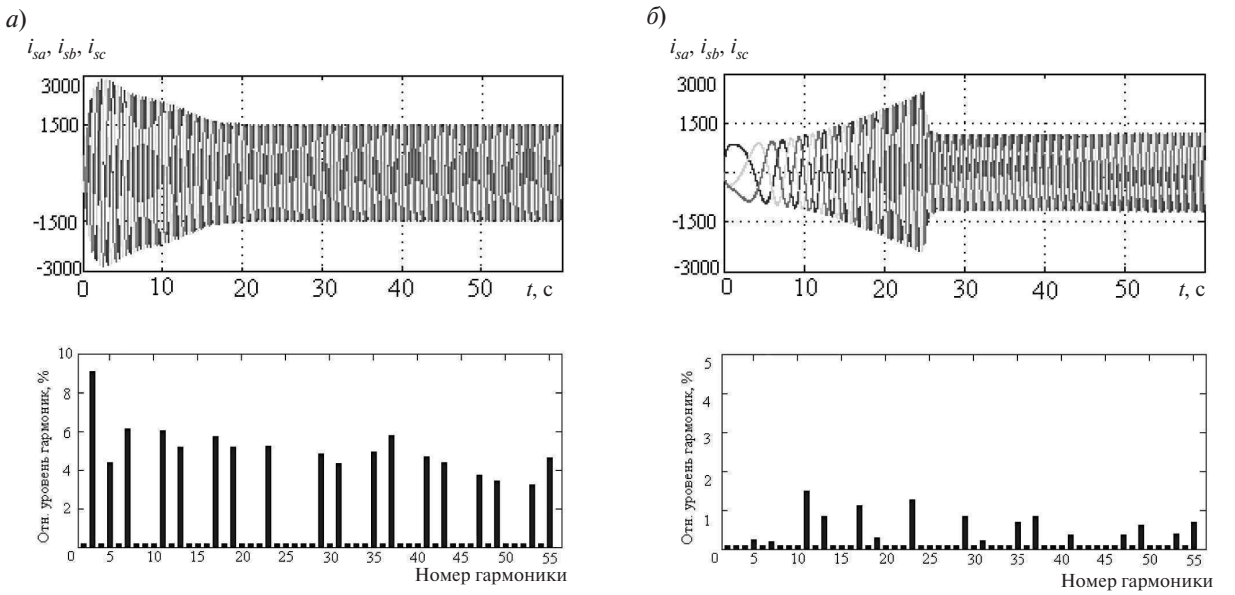


Рис. 3. Осциллограммы токов (*а*, *б*) и их спектральный состав (*в*, *г*)

5-я и 7-я гармоники. Коэффициент несинусоидальных искажений тока при нечетком управлении равен 1,2, при векторном управлении — 5,7, что в 4,75 раза больше и превышает предельно допустимый уровень искажений, определенный в ГОСТ 13109–97 (5 % для сетей в 6–20 кВт).

Коэффициент мощности электропривода с векторными алгоритмами управления составляет около 0,6–0,7; при нечетком управлении он близок к единице (0,97–1). За счет высокого коэффициента мощности действующее значение тока электропривода с нечетким управлением ($I \approx 1420$ А) на 14 % меньше, чем у электропривода с векторным алгоритмом управления ($I \approx 1600$ А).

Газотранспортная система России — одна из крупнейших в мире и обладает мощнейшим парком газоперекачивающих агрегатов. Электроприводы установлены на 14 % всех агрегатов, большинство из которых имеют критический износ и нерегулируемы, что снижает эффективность и надежность всей газотранспортной системы.

Использование многоуровневых преобразователей частоты, в ячейках которых установлены активные выпрямители, и нечетких алгоритмов управления обеспечивает потребление электроприводом чисто активной мощности, снижение потребления электроэнергии примерно на 14 % и повышение КПД электропривода газоперекачивающего агрегата до уровня 0,85–0,9.

Электропривод ГПА с нечеткими алгоритмами управления коммутаторами обладает более высокими регулировочными характеристиками, а именно: снижается время регулирования частоты вращения на 32 %, а также уменьшаются колебания электромагнитного момента в 4–5 раз.

Представленная работа проводится в рамках федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 по теме «Энергоэффективность и энергосбережение объектов магистрального газопровода».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Текст] / Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. # 1715-р

2. Энергоснабжение и автоматизация энергооборудования компрессорных станций [Текст]: Т. 2 / Под ред. О.В. Крюкова.— Нижний Новгород: Вектор ТиС, 2011.— 664 с.

3. **Козярук, А.Е.** Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов [Текст] / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков / Санкт-Петербургская электротехническая компания.— СПб., 2004.

4. **Jagadish, H.Pujar.** Robust sensorless speed control of induction Motor with DTFC and fuzzy speed regulator [Текст] / Jagadish H. Pujar, S.F. Kodad // International Journal of Electrical and Electronics Engineering.— 2011. Vol. 5 № 1.— P. 17–26.

5. **Metidji, B.** A new fuzzy direct torque control strategy for induction machine based on indirect matrix converter [Текст] / B. Metidji, F. Tazrart, A. Azib // International Journal of Research and Reviews in Computing Engineering.— 2011. №1.

УДК 665.3:541.69

Л.К. Васильева, А.Г. Воловей, Б.И. Иголкин, В.С. Мехтиев

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Известные методы изучения и контроля растительных масел основаны в основном на химическом анализе состава или на измерении физических показателей качества масел. Химические методы анализа достаточно трудоемки, длительны и довольно дороги в силу особенностей состава и структуры растительных масел [1].

Методы определения физических показателей (плотность, вязкость, коэффициент преломления и др.) не обладают достаточной точностью и надежностью в случае близких по виду масел, хотя усовершенствования в этой области продолжаются. Так, известен прибор для установления фальсификации арахисового масла, определяющий примеси рапсового (сурепного), подсолнечного, кукурузного, хлопкового, пальмового и соевого масел на основе колориметрических измерений [2].

Наиболее совершенные методы изучения, в частности жирнокислотного состава масел, в настоящее время — это газовая хроматография и инфракрасная спектроскопия, но они требуют специального дорогостоящего оборудования, затрат времени на обработку полученных данных, квалифицированного персонала [2].

В комплекс нормируемых показателей безопасности растительных масел включены в числе прочего кислотное и перекисное числа, регламентируемые государственными стандартами [4, 5].

Поиски более оперативных и недорогих методов анализа растительных масел привели к разработке нового направления, в основе которого лежит определение неэлектрических величин методами электрических измерений. При этом физические или химические характеристики жидкостей, а также их состав определяют косвенным путем — сопоставлением с их электрофизическими параметрами, которые измеряют специально разработанными для этой цели методами и устройствами.

В основу разработки предлагаемого устройства положен способ определения рода жидкостей [6]. Согласно изобретению способ заключается в том, что измеряют удельные активные электропроводности жидкости в диапазоне частот электромагнитных колебаний от 1 кГц до 10 МГц при двух любых температурах жидкости в указанном диапазоне. По пересечению зависимостей от частоты удельных электропроводностей при двух (и более) температурах находят характеристическую частоту колебаний, которую используют как основной критерий определения рода жидкости.

Было установлено, что точка пересечения (ТП) частотно-температурных зависимостей для отдельного вида растительного масла является индивидуальным показателем его внутреннего электромагнитного состояния (качества), обусловленного химическим составом, молекулярной структурой, наличием добавок и примесей. Этот показатель выражается сочетанием двух параметров — характеристической частоты и характеристической электропроводности.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1 [7].

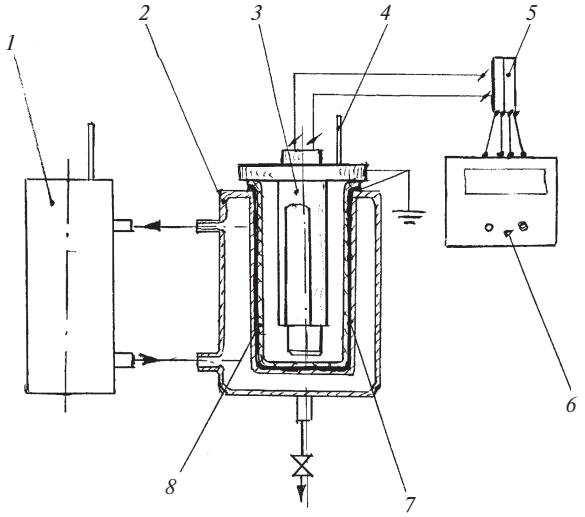


Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения электрофизических свойств растительных масел

Отличительной особенностью данной установки является применение для научных исследований емкостного трехэлектродного датчика (ДП) *3*, согласованного коаксиальным кабелем с измерителем *6* иммитанса Е7–20, включающим в себя: генератор электромагнитных колебаний для воздействия электрическим полем на исследуемую жидкость с частотой от 25 Гц до 1 МГц; электроизмерительный прибор для оперативного приема электрических сигналов с датчика; микропроцессор для вычислительной обработки показаний измерительного прибора; индикатор для наглядного представления полученных параметров — проводимости и емкости пробы масла, постоянно находящейся в объеме одного и того же однородного электромагнитного поля, и последующего построения частотных и температурных зависимостей этих параметров.

В рабочем объеме трехэлектродного датчика, помещенного с помощью стеклянного стакана *7* с алюминиевой изоляцией *8* в приспособление для термостатирования (теплообменник) *2* и согласованного с электронным блоком *5*, *6*, на масло воздействует электромагнитное поле с дискретно контролируемой частотой в диапазоне от 10 до 100 кГц. Температура масла при термостатировании датчика с маслом в диапазоне от 20 до 70 °С и выбранных граничных температурах поддерживалась с помощью термостата *1* LOIP LT-100, связанного с теплообменником резиновыми шлангами с нанесенной теплоизоляцией. Дополнительно температура исследуемого масла контролировалась ртутным термометром *4*.

Установка позволяет определять целый ряд электрофизических параметров в соответствии с руководством по эксплуатации на прибор Е7–20. Применительно к растительным маслам было выявлено, что наибольшей информативностью обладает параметр проводимости, измеряемый в диапазоне температур от 20 до 60 °С. Расчет удельной активной электропроводности проводился с учетом геометрического коэффициента трехэлектродного датчика равного 0,953 $м^{-1}$.

Определение параметров электромагнитного состояния, т. е. характеристической частоты и характеристической электропроводности растительного масла, производится следующим образом:

пробу исследуемого растительного масла отбирают в специальный стакан из термостойкого стекла, экранированный алюминиевой фольгой, и помещают в устройство для термостатирования;

подготовленный чистый и сухой датчик ДП опускают в стакан на такую глубину, чтобы обеспечить надежный контакт растительного масла с верхним охранным электродом;

стакан с растительным маслом и датчиком термостатируют при выбранной температуре и проводят измерения активной проводимости масла при дискретном изменении частоты электромагнитных колебаний в диапазоне от 10 до 100 кГц при двух температурах измерения, отличающихся на 40–50 °С;

определяют точку пересечения зависимостей проводимости от частоты и температуры исследуемого масла, т. е. характеристическую частоту и характеристическую электропроводность, или величину показателя электромагнитного состояния (качества) масла;

строят характеристическую кривую или экспериментальную зависимость; показателей электромагнитного состояния в координатах «частота — электропроводность», которая отражает закономерное изменение состояния (состав и структура) масла по стадиям исследуемого технологического процесса.

Следует отметить, что сами частотно-температурные кривые, получаемые при этих измерениях, служат дополнительным фактором срав-

нительной оценки видов растительных масел, так как отражают термоактивационный характер подвижности молекул компонентов, входящих в состав масел, и ее изменение в связи с особенностями производства, перевозки, хранения и пр.

На рис. 2 приведены в качестве примера частотно-температурные кривые свежего подсолнечного масла «Затея», переписное число (ПЧ) которого равно 5, с добавками этого же масла, но окисленного до ПЧ = 17. При сравнении взаимного расположения и формы кривых при низ-

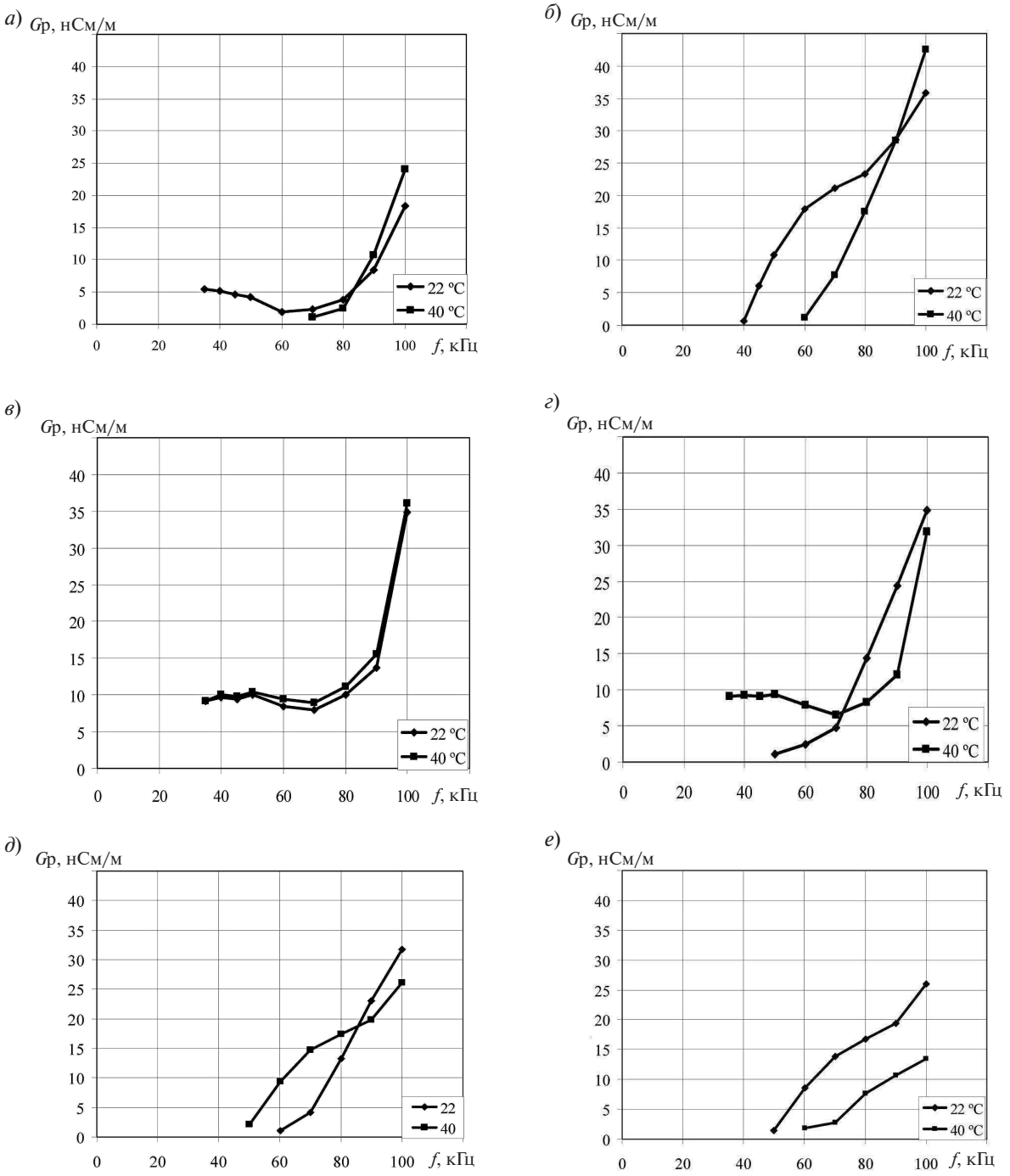


Рис. 2. Изменение электропроводности свежего масла «Затея» при введении окисленного масла

кой (22 °С) и условно высокой (40 °С) температурах влияние окисления проявляется весьма отчетливо. В частности, по мере введения окисленного масла происходит инверсия расположения высоко- и низкотемпературной ветвей кривых: в неокисленном масле до точки пересечения высокотемпературная ветвь идет ниже низкотемпературной (*а* и *б* на рис. 2); в составах с 60- и 80 %-м введением окисленного масла высокотемпературная ветвь идет выше (рис. 2, *г*, *д*), а в составе с 100 %-м содержанием окисленного масла высокотемпературная ветвь идет уже ниже низкотемпературной (рис. 2, *е*) при всех исследованных частотах за счет резкого снижения координаты точки пересечения по частоте.

Обращает на себя внимание состав с 40 %-м содержанием окисленного масла (рис. 2, *в*). Здесь при всех исследованных частотах от 35 до 100 кГц высоко- и низкотемпературные ветви электропроводности масла практически сливаются. То есть обычно наблюдаемая в маслах точка пересечения, характеризующая независимость электропроводности от температуры при вполне определенной характеристической частоте, превращается в линию (кривую), характеризующую независимость электропроводности данного состава от температуры во всем исследованном диапазоне частот.

Очевидно, что рассмотренные особенности частотно-температурных кривых, или спектральных показателей электропроводности, обусловлены жирнокислотным составом масла, который обусловливает молекулярную структуру и подвижность ее элементов, проявляющуюся в наблюдаемых на рис. 2 формах кривых и их расположении относительно друг друга.

Представленные данные наряду с ранее полученными на этой установке результатами экспериментальных работ [8] позволяют рекомендовать рассмотренное устройство в качестве надежного инструмента для изучения электрофизических свойств растительных масел и разработки методик контроля их состава и структуры. Подана заявка на полезную модель «Устройство диагностики состава и структуры растительных масел» [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Руководство** по методам исследования, технохимическому контролю и учету производства в масложировой промышленности. Том 1, кн. 1-я: Общие методы исследования жиров и жиросодержащих продуктов (химия и анализ) [Текст] // Под общей ред. докторов техн. наук В.П. Ржехина и А.Г. Сергеева.— Л.: ВНИИЖ, 1967.— 1042 с.

2. **Патент на изобретение № CN 20091077338.** Способ и устройство для определения фальсификации арахисового масла [Текст] / Aimin Y., Zhende W.— от 15.07.09.

3. **ГОСТ Р 51471–99.** Жир молочный. Метод обнаружения растительных жиров газожидкостной хроматографией стеринов. **ГОСТ Р 53600–2009.** Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области.

4. **ГОСТ Р 52110–2003**. Масла растительные. Методы определения кислотного числа.

5. **ГОСТ Р 51487–99.** Масла растительные и жиры животные. Метод определения перекисного числа

6. **Патент на изобретение №2383010**. Способ определения рода жидкостей [Текст] / С.В. Усиков, Н.В. Астратьева, Л.К. Васильева [и др.].— от 27 февраля 2010г.

7. **Иголкин, Б.И.** Изменение электромагнитного состояния растительных масел в зависимости от стадии рафинации [Текст] / Б.И. Иголкин, А.Г. Воловей, В.С. Мехтиев [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1.— С. 220–223.

8. **Иголкин, Б.И.** Электропроводность растительных масел в зависимости от температуры и частоты электромагнитных колебаний [Текст] / Б.И. Иголкин, Л.К. Васильева, В.В. Васипов [и др.]// Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 2.— С. 278–282.

9. **Заявка на полезную модель:** Устройство диагностики состава и структуры растительных масел. [Текст] / Иголкин Б.И., Васильева Л.К., Панкова Н.В, Усиков А.С., Мехтиев В.С., Ребане К.Ю., Васипов В.В. Дата поступления 28.11.2011.— Вход. номер № 071761, регистрационный № 2011147847.

УДК 519.21 (62–192)

В.П. Соколов

О ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(на примере Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга)

Проектные расчеты надежности сложных технических систем содержат многократные умножения надежностей элементов этих систем, а потому незначительные изменения исходных данных имеют непропорциональное по размеру влияние на результат — неожиданно большое или неожиданно маленькое.

Чем сложнее элемент системы, для которого имеются данные о его реальной надежности по результатам испытаний, тем меньше возможность ошибок и умышленных искажений при расчетах надежности технической системы, в которых эти данные используются.

Рассмотрим несколько важных примеров.

Расчет вероятности успешного завершения полета Ю.А. Гагарина

Непосредственно перед полетом Юрия Гагарина было выполнено 5 пробных запусков корабля «Восток» с манекеном и собаками.

Академик Б.Е. Черток, сподвижник С.П. Королева, в своих интервью в 2009–2011 годах неоднократно подтверждал, что перед запуском Гагарина «из 5 пробных запусков корабля «Восток» лишь 2 были удачными, а шестой старт — уже с человеком». То есть, по результатам испытаний вероятность благоприятного исхода была около 0,4. Б.Е. Черток утверждал также, что у американцев к моменту запуска их первого астронавта Джона Гленна реальная надежность по результатам испытаний была еще хуже [1].

Перед самым полетом Гагарина конструкторское бюро С.П. Королева представило на утверждение детальный расчет, в котором вероятность успешного завершения полета была определена в 0,94 при нормативе 0,95. Расчет был утвержден всеми уполномоченными лицами, включая С.П. Королева.

Трудно усомниться в том, что результат расчета был подогнан под норматив. Б.Е. Черток в своих интервью не раз подтверждал, что сейчас, с учетом последующего опыта, он бы расчет не подписал. [1].

Отказы затворов Комплекса защитных сооружений Лондона от наводнений

В 1984 году фирма «Бритиш Браун Бовери» сдала в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений Лондона от наводнений. В плотине КЗС на Темзе имеется только 10 сегментных водопропускных затворов. Однако на церемонии открытия КЗС произошел отказ одного затвора [2, с. 109].

Сразу после церемонии фирма выполнила тщательное расследование. В первую очередь проверялись расчеты надежности и системы управления затворами.

В монографии [2] нет данных о надежности КЗС Лондона, полученных при проектных расчетах, но «Бритиш Браун Бовери» признала, что КЗС Лондона от наводнений «вовсе не столь надежен, как утверждалось ранее» [2, с. 109, 110]. Фирмой была выполнена большая работа по повышению надежности устройств управления затворами. Но, несмотря на это, при одном из двух наводнений, случившихся после 1984 года, опять был отказ одного затвора [2, с. 110].

Отказ на церемонии открытия может быть отнесен к числу первоначальных отказов. Однако при двух последующих наводнениях произошел один отказ затвора. Таким образом, произошло 20 независимых испытаний затворов

в реальных форс-мажорных условиях. Отсюда следует, что надежность затвора равна 19/20 = = **0,95,** а вероятность отказа 1–0,95 = 0,05.

Отметим сразу, что количество испытаний недостаточно для того, чтобы считать надежность срабатывания затворов определенной с достаточной точностью. Поэтому в дальнейшем будет выполнено исследование устойчивости результатов расчетов.

Отметим также, что отказ затворов по одному доказывает независимость отказов затворов КЗС Лондона.

Прогноз наводнения на Темзе поступает за 12 часов до события; службы нашего КЗС будут располагать 9 часами после получения прогноза о возникновении нагонной волны в Финском заливе [2, с. 42]. Условия — близкие, однако время на закрытие отверстий у нас даже меньше.

Расчет надежности Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга

В этой задаче мы можем использовать данные об отказах затворов Лондонского КЗС и тем самым исключить неизбежные ошибки, связанные с многократным умножением надежностей элементов затвора при определении надежности затвора в целом по данным о надежности его элементов.

Простейший расчет может быть выполнен с учетом следующих соображений.

В плотине КЗС Санкт-Петербурга имеется 66 отверстий:

морской судоходный фарватер сечением 200×16 м, закрываемый двустворчатым батопортом;

канал для прохода речных судов, закрываемый подъемным затвором размерами 110×7 м;

64 водопропускных отверстия шириной по 24 м, закрываемые опускными сегментными затворами, подобными затворам КЗС Лондона.

Нормально затворы находятся в верхнем положении и удерживаются навесу гидроприводными задвижными подхватами. Выключение подхватов требует электропитания, а дальнейшее опускание-закрывание затворов возможно и при отсутствии энергообеспечения.

Для того чтобы оценить значимость главного различия между КЗС Лондона и Санкт-Петербурга — наличия в их дамбах соответственно 10 и 66 отверстий**,** рассмотрим эти КЗС как системы, содержащие соответственно 10 и 66 независимых последовательно соединенных элементов. В этих расчетах обеих КЗС используется одна и та же упрощенная схема системных связей между затворами и реальные данные о вероятности отказа затвора на одном из них.

Вычислим, каковы вероятности того, что соответственно 10 и все 66 отверстий удастся вовремя закрыть.

Примем, что надежность устройств для закрытия всех отверстий дамбы КЗС Санкт-Петербурга такая же, как у водопропускных затворов лондонского КЗС, и равна 0,950.

Вероятность совместного появления нескольких независимых событий равна произведению вероятностей этих событий [3, с. 45].

Вероятность того, что будут закрыты все 10 затворов лондонского КЗС — $0{,}95^{10} = 0{,}598$, т. е. около 60 %. Расчет подтвержден практикой: как было упомянуто выше, за два наводнения на Темзе был один отказ затвора.

Соответственно, вероятность того, что будут закрыты все 66 отверстий плотины КЗС Санкт-Петербурга — $0{,}95^{66} = 0{,}03387$, около 3 %. Один раз за 33 наводнения!

Проверим устойчивость решения. Предположим, что вероятность отказа затворов нашего КЗС в пять раз меньше, чем у лондонского КЗС, и составляет 0,01.

Даже при такой, крайне оптимистичной, оценке вероятность того, что будут закрыты все 66 отверстий плотины КЗС Санкт-Петербурга — $0{,}990^{66} = 0{,}515$, т. е. один раз за два наводнения.

Очевидна решающая роль количества отверстий. Их количество и расположение выбирались в 1978 году в проекте КЗС для Ленинграда только из экологических соображений. На крупномасштабной натурной модели было проверено, не будут ли образовываться застойные зоны, в которых возможно загнивание или цветение невской воды, особенно с учетом сброса вод из очистных сооружений на Белом острове. Расчетов надежности КЗС в составе первоначального проекта не было.

Известно, что КЗС Санкт-Петербурга безусловно не сработает, если не будет закрыто любое из двух огромных судопропускных сооружений. Но есть гидротехнические расчеты, доказывающие, что при закрытых судопропускных

сооружениях все же допустим отказ двух из 64 водопропускных затворов [2, с. 23, 128, 139].

Надежность P системы, состоящей из двух последовательных судопропускных затворов, надежность которых соответственно составляет P_1, P_2, и блока из 64 водопропускных затворов, надежность которого составляет P_3, равна произведению надежностей:

$$P = P_1 P_2 P_3.$$

Предположим, что $P_1 = P_2 = 1$.

Надежность того, что будут закрыты ровно 64, 63 и 62 водопропускных отверстия, определяется по формуле Бернулли:

надежность закрытия 64 из 64 отверстий — $0{,}95^{64} = 0{,}0375$;

надежность закрытия 63 из 64 отверстий — $C_{64}^{63} \cdot 0{,}95^{63} \cdot 0{,}050^{1} = 0{,}1264$;

надежность закрытия 62 из 64 отверстий — $C_{64}^{62} \cdot 0{,}95^{62} \cdot 0{,}050^{2} = 0{,}2096$;

итого суммарная надежность P_3 закрытия 62, 63 или 64 водопропускных отверстий равна 0,3735.

Тогда надежность системы $P = P_1 P_2 P_3 = 0{,}3735$ (даже в предположении, что судопропускные сооружения безотказны!).

Таким образом, КЗС не защитит Санкт-Петербург от серьезного наводнения в двух случаях из трех, что совершенно недостаточно.

Обычно назначается норматив безотказности около 0,95.

Расчеты [2, с. 23, 128, 139] объясняют, почему при небольших наводнениях, таких, как наводнение 27 декабря 2011 года, КЗС защитил Санкт-Петербург от наводнения: судопропускные сооружения были закрыты, а закрыть все 64 водопропускные отверстия не было необходимости. Уровень воды в Неве не поднялся выше 154 см выше ординара.

В принципе, возможно выполнение гораздо более детальных расчетов надежности КЗС [4, 5].

Весьма вероятно, что за счет многократного умножения надежностей элементов вновь может быть получен приемлемый показатель надежности для КЗС в целом (например, 0,94). Но объективный расчет с неизбежностью выявит низкую надежность КЗС Санкт-Петербурга из-за большого количества отверстий в его плотине.

Однако, положение отнюдь не безнадежно. Достаточно на каждое из водопропускных отверстий установить дублирующий затвор с независимым приводом, и надежность КЗС повысится до приемлемого уровня. Вот расчет:

надежность закрытия каждого из водопропускных отверстий двумя последовательными затворами повысится до $P_{\text{дубл}} = 1 - (1 - 0{,}95)^2 = 0{,}9975$, а вероятность отказа снизится до 0,00250;

надежность закрытия 64 из 64 отверстий — $0{,}9975^{64} = 0{,}851973$;

надежность закрытия 63 из 64 отверстий — $C_{64}^{63} \cdot 0{,}9975^{63} \cdot 0{,}00250^{1} = 0{,}113665$

надежность закрытия 62 из 64 отверстий — $C_{64}^{62} \cdot 0{,}9975^{62} \cdot 0{,}00250^{2} = 0{,}010789$

итого суммарная надежность P_3 закрытия 62,63 или 64 водопропускных отверстий — 0,999419.

Если принять надежность закрытия судопропускных затворов $P_1 = P_2 = 0{,}95$, то надежность системы возрастет до $P = P_1 P_2 P_3 = 0{,}90198$.

Из этой оценки очевидно, что после установки дублирующих затворов на водопропускных отверстиях надежность системы КЗС в целом существенно повысится и будет целиком определяться надежностью закрытия двух судопропускных сооружений.

Конструктивное исполнение аварийных дублирующих затворов водопропускных отверстий и решение проблемы их опускания при отказах энергообеспечения — это отдельные вопросы. Предложения по их решению уже имеются.

Так, кандадат технических наук В.С. Дорин в разговоре с автором предложил применить для выключения подхватов водопропускных затворов аварийные устройства, содержащие взрывпакеты.

При разработке решений по дублирующим затворам естественно учитывать, что дублирующие затворы будут использоваться только для тех отверстий, где произойдет отказ основного затвора, и что в условиях наводнения допустимо срабатывание дублирующего затвора любой ценой, в том числе с применением газорезки. Возможно, что в качестве дублирующих аварийных затворов удастся использовать уже имеющиеся ремонтные затворы водопропускных отверстий, в настоящее время не имеющие никаких штатных устройств для их закрывания в условиях наводнений.

Но ключевым условием обеспечения готовности КЗС должны стать хотя бы ежемесячные

(вне периода ледостава) учебные тревоги, с закрыванием всех отверстий КЗС в условиях, максимально приближенных к форс-мажорным

Возможно, что отказы, зафиксированные при учебных тревогах, подскажут решения и по повышению надежности судопропускных затворов.

Расчеты надежности технических систем предполагают многократные умножения надежностей элементов, а потому незначительные изменения исходных данных имеют непропорциональное по размеру влияние на результат.

Чем выше системный уровень элемента системы, для которого имеются данные о реальной надежности по результатам испытаний, тем меньше возможность ошибок и умышленных искажений при расчетах надежности технической системы, в которых эти данные используются.

Выполнен расчет надежности Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга. При этом использованы данные об отказах затворов Лондонского КЗС. Надежность КЗС Санкт-Петербурга оказалась существенно меньше. При этом стала очевидной решающая роль количества отверстий в дамбах двух КЗС — в них имеется соответственно 10 и 66 отверстий.

Однако, система затворов КЗС Санкт-Петербурга может быть доработана. Достаточно на каждое из водопропускных отверстий установить дублирующий затвор с независимым приводом, и надежность КЗС повысится до приемлемого уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К дню рождения академика Б.Е. Чертока [Текст] // Сайт Федерального космического агентства (Роскосмос) «Новости» 01.03.2009.— Режим доступа: http://www.federalspace.ru>?id = 2&nid = 5550, свободный.—Загл. с экрана.

2. **Селезнев, С.В.** Поверхностные затворы больших пролетов судопропускных сооружений, шлюзов и доков. [Текст] / С.В. Селезнев, Г.П. Лохматиков— СПб.: Энергоатомиздат, 1995.— 695 с.

3. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей [Текст]: Учеб. для вузов / Е.С. Венцель.—10-е изд. стер. М.: Высш. шк., 2006.

4. **Ащеулов, А.В.** Оценка функциональной надежности объемных гидроприводов механизмов подъемных сооружений методом деревьев отказов [Текст] / А.В. Ащеулов, Д.В. Стефанишин // Известия ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные механизмы и оборудование.— Вып. 7.— Тула: Изд-во ТулГУ, 2006.— С. 275–281.

5. **Василевский, А.Г.** Методы оценки надежности затворов гидротехнических сооружений (системный анализ) [Текст] / А.Г. Василевский, В.Б. Штильман, С.Г. Шульман.— СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2010. — 530 с.

УДК 621.039:621.311

А.Ю.Туманов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИЙ

При проведении прогнозирования для обеспечения безопасности эксперт, основываясь на собственном опыте, качественно оценивает факторы риска и тяжесть последствий от реализованного неблагоприятного события. В ситуациях с частичной неопределенностью очень важно количественно оценить величину ущерба и тяжесть последствий чрезвычайной ситуации (ЧС). Между тем универсальных методов количественной оценки риска пока не существует. Одна из наиболее важных проблем при обеспечении безопасности объектов — получение ко-

личественной оценки риска, т. е. характеристик, параметров состояния и степени возможности наступления предполагаемых неблагоприятных событий и их последствий на сложном опасном объекте энергетики. Сложность оценки состояния опасных объектов обусловлена большим количеством причин (факторов), различных для каждого объекта, и большой изменчивостью проявлений последствия чрезвычайных ситуаций. На практике состояние опасных объектов определяется качественно. При этом используются один-два, реже — пять-десять факторов риска, значения которых наиболее явно и ясно отражают наступление неблагоприятного события (пожар, взрыв, опасное природное явление), в то время как менее значимые причины не учитываются. Поэтому один из путей повышения эффективности оценки риска наступления ЧС связан с применением математических методов обработки данных и разработкой проблемно ориентированных систем анализа информации. Это позволит более точно оценивать степень тяжести предаварийного состояния опасного объекта при определенном внешнем воздействии или внутренних флуктуациях и своевременно проводить мероприятия по предотвращению ЧС. В силу этого актуальна задача разработки и реализации автоматизированной системы количественной оценки интегрального риска опасного объекта.

Исходные данные

Исследования по количественной автоматизированной оценке риска проводились на статистическом материале опасных объектов энергетики (ООЭ) в Санкт-Петербурге. За основу были взяты данные по ТЭЦ–21. Этот выбор обусловлен возможностью получения достоверной информации по данной теплоэлектроцентрали, где кафедрой УЗЧС ФКБ СПБГПУ проводились исследовательские работы в области техносферной безопасности.

Приведем краткую характеристику ТЭЦ–21 как потенциально опасного объекта энергетики. Северная теплоэлектроцентраль филиала «Невский» ОАО «ТГК–1» (далее ТЭЦ–21) является структурным подразделением филиала «Невский» ОАО «ТГК–1», расположена в северной части Санкт-Петербурга (ж/д платформа «Лаврики» Всеволожского района Ленинградской области) на производственной площадке 159 га.

ТЭЦ расположена на равнинной местности. Отметка над уровнем моря — 23–25 м. Почвы в основном торфяные. Как и весь Санкт-Петербургский регион, территория станции находится в зоне с морским климатом, с умеренно теплым, влажным летом и довольной продолжительной зимой.

Средняя годовая температура составляет +4,2 °С, положительная температурой воздуха наблюдается в среднем 222 дня за год. Средняя многолетняя температура января — –18°С, июня — +18°С.

В среднем за год ясных и безоблачных дней — 31, пасмурных — 172, туманных — 57, с переменной облачностью — 105. Среднегодовая норма осадков составляет 650–700 мм.

Преимущественное направление ветра — западное и юго-западное. Наибольшая вероятность ураганных ветров — в весеннее-летний период. Продолжительность снежного покрова составляет 143 дня. Относительная влажность воздуха в среднем за все месяцы года равна 70–90 %.

В то же время за последние несколько лет неоднократно наблюдались летние периоды с продолжительной солнечной, сухой погодой, которые характеризуются высокой вероятностью возникновения пожаров.

Характер производства — выработка электрической и тепловой энергии.

Количество работающих — 380 чел.

Установленная электрическая мощность — 500 мВт, тепловая — 1188 Гкал/час.

ТЭЦ–21 обеспечивает тепловой энергией промышленные предприятия, жилые и общественные здания северной части Выборгского и Калининского районов Санкт-Петербурга, деревень Новое Девяткино и Медвежий стан Всеволожского района Ленинградской области и завод «Турбоатомгаз».

ТЭЦ–21 передает выработанную электроэнергию в энергосистему ОАО «Ленэнерго».

ТЭЦ занимает здания площадью 17800 м^2.

Станция граничит на востоке — с шоссе Санкт-Петербург — Токсово, на западе — с редким лесом, на юге — с заводом «Турбоатомгаз», на севере — с редким лесом.

Общая характеристика коммунальных энергетических сетей станции

Теплосети — сети собственных нужд для отопления зданий и сооружений станции.

Электроснабжение осуществляется через распределительное устройство по сетям собственных нужд.

Основное топливо — природный газ, резервное — мазут.

Мазут доставляется на станцию железнодорожным транспортом и из цистерн через сливную эстакаду подается в мазутные резервуары.

Газоснабжение. Газ поступает на станцию от ГРС «Новосеверная» по двум газопроводам на газораспределительный пункт (ГРП) станции. От ГРП подается к топкам котлов.

Водоснабжение. На ТЭЦ–21 вода (питьевая и техническая) подается от Северной водопроводной станции (СВС) по трем водоводам (два — питьевой воды и один — технической) длиной 22 км. Вода используется для технологических нужд (охлаждение механизмов, приготовление пара, отопление, горячее водоснабжения населения) и бытовых нужд персонала.

Канализация на ТЭЦ–21 подразделяется на промливневую (ПЛК), хозфекальную (ХФК), замазученную (ЗМК). Воды, поступающие в ХФК и ЗМК, очищаются в соответствующих очистных сооружениях, а затем поступают в промливневую канализацию, смешиваются с водой в ПЛК и сбрасываются в реку Охту.

Вторых вводов на станции нет.

Противопожарное оборудование включает:

две автоматические системы пенопожаротушения — в топливном цехе (для тушения мазутных резервуаров и мазутонасосной) и главном корпусе (для тушения кабельных каналов, маслобаков турбины);

систему автоматического водяного тушения автотрансформаторов на электроподстанции 220 кВ;

автоматическую систему водяного пожаротушения кабельных каналов, маслобаков турбин и охлаждения ферм; противопожарный водопровод с 47 пожарными гидрантами в эксплуатации на блоке 5;

систему водяного пожаротушения с пожарными кранами в главном, инженерно-бытовом корпусах, на складе, мазутонасосной, очистных сооружениях, мастерской;

первичные средства пожаротушения (огнетушители, рукава, стволы) в соответствии с нормами «Правил пожарной безопасности для энергетических предприятий РД-153–34.0–03.201–00 (ВППБ 01–02–95*);

автоматическую систему пожарной сигнализации в главном, инженерно-бытовом корпусах, химводоочистке, котельной низкого давления, гараже, материальном складе.

Защитное сооружение гражданской обороны станции — отдельно стоящее, 2-го класса, вместимостью 300 чел., отвечающее требованиям ИТМ ГО. Обеспечивает укрытие НРС.

Как видно из краткого описания, ТЭЦ-21 с точки зрения системного подхода — это сложная открытая социо-техническая система (СОТС). Она является объектом исследования в рамках задачи предотвращения опасностей и уменьшения риска опасных природных процессов и техногенных катастроф.

Изучаемый мегаобъект — СОТС ТЭЦ-21 — потенциально опасен. Разработан перечень потенциально опасных объектов на ТЭЦ-21. Он включает:

1. Аварийно химические и химически опасные вещества (АХОВ). В частности, на площадке химводоочистки используются в техпроцессе и имеются в запасе аммиачная вода (25 %) — до 5 т, кислота серная (93 %) — до 90 т, гидразингидрат (15 %) — до 1 т.

2. Пожароопасные объекты:

резервуары № 1 и № 2 для хранения мазута, надземные металлические по 20000 м^3, обвалованные;

мазутонасосная для подачи мазута к топкам котлов;

железнодорожная эстакада для слива мазута из цистерн. Представляет собой забетонированную часть железнодорожного пути, оборудованную лотками для слива мазута из цистерн в приемные емкости (2 шт. по 1500 т) с выступами для исключения пролива мазута на грунт; одновременно может разгружаться 50 цистерн по 60 т с мазутом;

газораспределительный пункт (ГРП) и газопроводы длиной 1,1 км для подачи природного газа к топкам котлов;

маслохозяйство — 4 емкости (по 70 м^3) для хранения турбинного масла (до 214 т) и 4 емкости (по 70 м^3) для хранения трансформаторного масла (до 210 т);

масляные баки в машинном зале — 5 баков емкостью 26 т каждый, оборудованные системами аварийного слива масла в специальные емкости;

трансформаторы, в которых находится 782 т трансформаторного масла. Места их установки оборудованы железобетонными маслоприемными приямками с системой сбора масла в аварийную емкость (одна на два трансформатора);

склад водорода с ресиверами (6 ресиверов по 10 м^3; водород находится под давлением 10 кгс/см^2). При содержании водорода в воздухе от 3,3 до 81 % возникает зрывоопасная смесь.

На ТЭЦ–21 зарегистрированы в государственном реестре следующие опасные производственные объекты (21.12.2005 г. рег.№ А19–06219–113–119): площадка главного корпуса; площадка подсобного хозяйства; система газопотребления; топливное хозяйство; пиковые водогрейные котельные; шламонакопитель; участок транспортирования опасных веществ.

В ходе исследования и оценки возможной обстановки на территории ТЭЦ–21 (см. рисунок) в ЧС природного и техногенного характера было выявлено, что могут произойти следующие неблагоприятные события с тяжелыми последствиями:

1. *Аварии с АХОВ.*

2. *Возникновение пожара.* Пожар может возникнуть в топливном хозяйстве (на мазутонасосной, на мазутных баках, на сливной эстакаде при разгрузке мазута из железнодорожных цистерн), на масляных баках главного корпуса, маслохозяйстве, в трансформаторах, т. е. пожары связаны с горением нефтепродуктов. Горение нефтепродуктов может происходить в резервуарах, производственной аппаратуре, а также при разливе на открытых площадках.

3. *Взрыв.* Он может произойти в системе газоснабжения (газораспределительный пункт, газопроводы), в ресиверах с водородом, в системе водородного охлаждения генераторов. Природный газ — взрывопожароопасное вещество.

4. *Стихийные бедствия природного характера.* Сейсмические и природно-климатические условия территории определяют ее как зону, устойчивую к природным катаклизмам. В то же время различные аномальные явления природы возможны и могут оказать неблагоприятные воздействия.

5. *Радиоактивное загрязнение.* Угроза радиоактивного загрязнения может возникнуть в связи с аварией на ЛАЭС.

6. *Террористический акт.* В результате сложной общественно-политической обстановки существует вероятность осуществления террористических актов разного характера. Наибольшую опасность представляют: подрыв емкости с АХОВ на объекте; использование биологических средств; использование взрывных устройств; захват заложников.

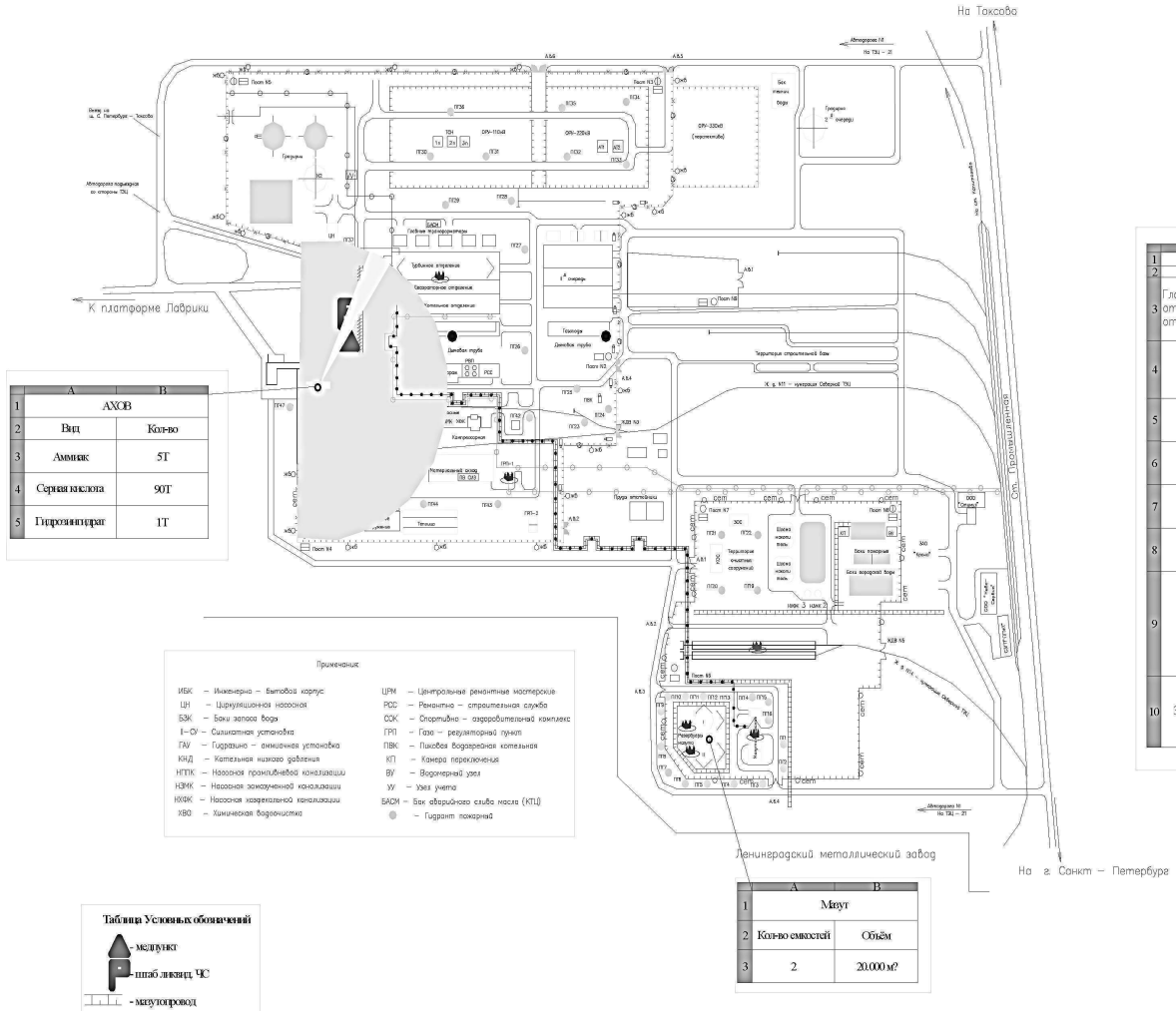
База исходных данных содержит характеристики, параметры и показатели нескольких таких мегаобъектов, как ТЭЦ–21, которые в свою очередь содержат данные нескольких десятков локальных объектов. Каждая запись в базе данных [1] содержит информацию, состоящую из логических блоков, включая качественную информацию о типе объекта, признаках внутренней опасности, границах объекта, общих сведениях, конструктивных особенностях, районе размещения, внешних воздействиях; количественные данные (параметры и показатели).

Таким образом, тяжесть разрушений и последствий после аварии оценивалась по данным предсобытийного состояния опасных объектов энергетики. При такой постановке задача оценка риска наступления ЧС может трактоваться как задача предвидения и прогнозирования состояния. То есть для количественной оценки степени риска возникновения ЧС применимы математические методы диагностики и прогнозирования.

Математические методы диагностики и прогнозирования

Анализ существующих и традиционно применяемых для диагностики и прогнозирования методов показал [2], что субъективно-вероятностные модели оценки риска ООЭ позволяют достаточно адекватно представлять и анализировать систему сложных взаимосвязей причин, приводящих к неблагоприятному событию.

Риск в этом случае численно равен произведению вероятности возникновения неблагоприятного события на причиненный ущерб. Исследования в этой области в основном направлены на достоверное определение прогноз-



	A	B
1	АХОВ	
2	Вид	Кол-во
3	Аммиак	5Т
4	Серная кислота	90Т
5	Гидразингидрат	1Т

	A	B	C	D
1	ИНЖЕНЕРНАЯ КАРТОЧКА ОБЪЕКТА			
2	Наименование здания	Конструкция	Размеры	Примечание
3	Главный корпус турбинное отделение котельное отделение	Ж/б	216x81x42 216x39x29 192x30x42	С торца здания имеются ворота (2)
4	КНД	Стальной каркас, керамзитовая плита	78x118x16,8	С торца здания имеются ворота
5	ПВК	–//–	5–этажное 84x18x21	
6	ГРП	Ж/б каркас, стены кирпичные	H=5,1 м	
7	Маслоаппаратная 8 емкостей по 70 м3	–//–	H=5,1 м	
8	Мазутонасосная	–//–	Одноэтажное	
9	Мазутные баки	Металлический каркас, утеплитель алюминиевая обшивка	H=14 м. Длина обваловки по периметру 144 м, расстояние между резервуарами 40 м, поверхность зеркала 1633 м2	
10	Эстакада мазутослива	Ж\б	Между 2 ж/д путей встает 25 ж/д цистерн. S под слив 840 м2	Предусмотрено паротушение сливных лотков

	A	B
1	Мазут	
2	Кол-во емкостей	Объём
3	2	20.000 м³

Рис. 1. Возможная обстановка на ТЭЦ–21 при возникновении ЧС

ных величин вероятностей и ущербов для различных сценариев развития аварии на ООЭ.

Основные методы, с помощью которых решают задачу диагностики в вероятностном пространстве причин возникновения риска, опираются на формулу общей вероятности Байеса. Более подробно с этими методами можно познакомиться в [3].

Обзор и анализ автоматизированных систем оценки риска

Автоматизация процессов идентификации и учета значительно повышает эффективность работы управляющего любым технологическим процессом. Говорить же о количественной оценке риска без использования современных информационных технологий просто не имеет смысла. Спектр методик количественного анализа достаточно широк: от PERT-анализа и анализа «что-если» до сложных вычислений Monte Carlo.

Существует большое число программных пакетов, поддерживающих те или иные процессы оценки риска. Однако довольно сложно подобрать систему оценки риска, которая могла бы обеспечить автоматизацию всего процесса оценки риска опасного объекта энергетики, начиная с классификации факторов риска и их идентификации и заканчивая контролем и регулированием параметров оценки.

В качестве основных требований к автоматизированной системе оценки риска ООЭ можно считать:

поддержку всего жизненного цикла существования ООЭ;

поддержку различных методик расчета и моделирования;

графические возможности показа ключевых факторов риска и построение рискограмм вероятностей;

генерация отчетов;

документирование и поддержку базы данных по факторам риска и вероятностям их проявления в ООЭ.

Существует несколько сотен систем, так или иначе реализующих функции оценки (управления) рисками. Некоторые из них представляют собой информационные системы поддержки принятия решений, в которых присутствует модуль оценки риска; другие являются приложениями и дополнениями систем календарного планирования либо самостоятельными программными продуктами по оценке риска.

Наиболее известными в России стали такие системы оценки риска: @Risk Professional for Project; Dekker TRAKKER; Enterprise project; ER Project 1000; Intelligent Planner; Mesa/Vista Risk Manager; Risk Track; Open Plan, Risk Watch, CRAMM (Великобритания), COBRA (Великобритания), «АванГард» (Россия), ТРИФ (Россия), КОНДОР + (Россия), Project expert (Россия). Эти программные продукты базируются на различных подходах к оценке риска и решению связанных с этим разнообразных задач. Можно выделить следующие подходы разработчиков программных средств оценки риска:

получение оценок рисков только на качественном уровне;

вывод количественных оценок рисков на базе качественных, полученных от экспертов;

получение точных количественных оценок для каждого из факторов риска;

получение оценок с помощью механизма нечеткой логики.

Ценность инструментального средства анализа риска определяется в первую очередь той методикой и математической моделью, которая положена в его основу.

Наибольшее распространение получила *методика, использующая «матрицы риска»*. Это достаточно простая методика анализа риска. В процессе оценки экспертами определяются вероятность возникновения риска и размер связанных с ним потерь (стоимость риска). Причем оценивание производится по шкале, имеющей три градации — «высокую», «среднюю», «низкую». На базе оценок для отдельных рисков выставляется оценка системе в целом (в виде клетки в такой же матрице), а сами риски ранжируются. Данная методика позволяет быстро и корректно произвести оценку. Но, к сожалению, дать интерпретацию полученных результатов не всегда возможно.

Разработан также механизм получения оценок рисков на основе нечеткой логики, который позволяет заменить приближенные табличные методы грубой оценки рисков современным математическим методом, адекватным рассматриваемой задаче.

Механизм оценивания рисков на основе нечеткой логики, по существу, является эксперт-

ной системой, в которой базу знаний составляют правила, отражающие логику взаимосвязи входных величин и риска. В простейшем случае это «табличная» логика, в общем случае более сложная, отражающая реальные взаимосвязи, которые могут быть формализованы с помощью продукционных правил вида «Если ... , то ...».

Кроме того, механизм нечеткой логики требует формирования оценок ключевых параметров и представления их в виде нечетких переменных. При этом необходимо учитывать множество источников информации и качество самой информации. В целом это достаточно сложная задача. Однако в каждом конкретном случае могут быть найдены и формально обоснованы ее решения.

Кратко остановимся на анализе ряда программных продуктов, применяемых для оценки риска в области информационной безопасности.

Программное обеспечение RiskWatch является мощным средством анализа и управления рисками, ориентированным прежде всего на точную количественную оценку соотношения потерь от угроз безопасности и затрат на создание системы защиты. В основу продукта RiskWatch положена методика анализа рисков, которая состоит из четырех этапов:

первый этап предполагает определение предмета исследования. Здесь описываются такие параметры, как тип организации, состав исследуемой системы, базовые требования в области безопасности;

второй этап включает ввод данных, характеризующих основные параметры системы. При этом подробно описываются ресурсы, потери и классы инцидентов. Последние выводятся путем сопоставления категории потерь и категории ресурсов. Кроме того, задаются частота возникновения каждой из выделенных угроз, степень уязвимости и ценность ресурсов. Все это используется в дальнейшем для расчета эффекта от внедрения средств защиты;

третий этап включает количественную оценку. Рассчитывается профиль риска и выбираются меры обеспечения безопасности. Фактически риск оценивается с помощью математического ожидания потерь за год. Эффект от внедрения средств защиты количественно описывается с помощью показателя ROI (Return on Investment — отдача от инвестиций), который показывает отдачу от сделанных инвестиций за определенный период времени;

четвертый этап сводится к генерации отчетов.

CRAMM — инструментальное средство, реализующее методику, которая была разработана компанией BIS Applied Systems Limited по заказу британского правительства. Метод CRAMM позволяет производить анализ риска. Данная методика опирается на оценки качественного характера, получаемые от экспертов, но на их базе строит уже количественную оценку. Метод — универсальный и подходит для больших и для мелких организаций как государственного, так и коммерческого сектора. CRAMM предполагает разделение всей процедуры на три последовательных этапа.

Задача первого этапа заключается в определении достаточности для защиты системы применения средств базового уровня, реализующих традиционные функции безопасности, или необходимости проведения более детального анализа.

На втором этапе производится идентификация риска и оценивается его величина.

На третьем этапе решается вопрос о выборе адекватных контрмер. Для каждого этапа определяются набор исходных данных, последовательность мероприятий, анкеты для проведения интервью, списки проверки и набор отчетных документов.

Достоинство метода CRAMM — хорошо структурированный и широко опробованный метод анализа риска.

К недостаткам метода CRAMM можно отнести следующее: для его использования требуется высококвалифицированный аудитор; аудит по данному методу — процесс достаточно трудоемкий и может потребовать месяцы непрерывной работы; генерирует большое количество бумажной документации, которая не всегда оказывается полезной на практике; невозможно внести дополнения в базу знаний CRAMM, что вызывает определенные трудности при адаптации этого метода к потребностям конкретной организации.

Система COBRA — средство анализа риска, реализующее методы количественной оценки риска. В нее заложены принцип построения экспертных систем, обширная база знаний по угро-

зам и уязвимостям, большое количество вопросников, с успехом применяющихся на практике.

Программный продукт КОНДОР+ позволяет специалистам (ИТ-менеджеры, инженеры по безопасности) проверить безопасность компании и оценить риск. КОНДОР+ включает в себя более 200 вопросов, ответив на которые специалист получает подробный отчет о состоянии безопасности и риска, а также модуль оценки уровня риска. В отчете отражаются все положения политики безопасности, которые соответствуют или не соответствуют стандарту, а также существующий уровень риска невыполнения требований политики безопасности в соответствии со стандартом. Все варианты отчетов для большей наглядности сопровождаются диаграммами. КОНДОР+ дает возможность специалисту отслеживать вносимые на основе выданных рекомендаций изменения в политику безопасности, постепенно приводя ее в полное соответствие с требованиями стандарта. Данная система реализует метод качественной оценки рисков по трехуровневой шкале рисков: высокий, средний, низкий.

Продукт ГРИФ — это программный комплекс анализа и контроля риска информационных систем компаний. В нем разработан алгоритм, учитывающий более 100 параметров. Здесь максимально простое в использовании программное решение, основная задача которого — дать возможность управляющему самостоятельно (без привлечения сторонних экспертов) оценить уровень риска в информационной системе и эффективность существующей практики по обеспечению безопасности компании. Данный комплекс оценивает риск по различным информационным ресурсам, подсчитывает суммарный риск по ресурсам компании, а также ведет подсчет потенциального ущерба и выдает недостатки существующей политики безопасности.

В основе продукта ГРИФ — методика анализа риска, которая состоит из пяти этапов:

на первом определяется полный список информационных ресурсов, представляющих ценность в исследуемой автоматизированной системе; эти риски объединяются в сетевые группы;

на втором осуществляется ввод в систему всех видов информации, представляющей ценность для информационной системы. Введенные группы ценной информации должны быть размещены пользователем на указанных на предыдущем этапе объектах хранения информации (серверы, рабочие станции и т. д.). Указывается ущерб по каждой группе ценной информации, расположенной на соответствующих ресурсах, по всем видам угроз (конфиденциальность, целостность, отказ обслуживания);

на третьем этапе вначале происходит определение всех видов пользовательских групп, затем — то, к каким группам информации на ресурсах имеет доступ каждая из групп пользователей. В заключение определяются виды (локальный и удаленный) и права (чтение, запись, удаление) доступа пользователей ко всем ресурсам, содержащим ценную информацию;

на четвертом этапе указывается, какими средствами защищены ценная информация на ресурсах и рабочие места групп пользователей. Вводится информация о затратах на приобретение всех применяющихся средств защиты информации и ежегодных затратах на их техническую поддержку, а также на сопровождение системы информационной безопасности;

на завершающем этапе необходимо ответить на список вопросов по реализованной системе, что позволяет оценить реальный уровень защищенности системы и детализировать оценку риска. Этот этап необходим для получения достоверных оценок существующего в системе риска.

Отчетная система программного комплекса ГРИФ содержит три части: «Информационный риск ресурсов», «Соотношение ущерба и риска», «Общий вывод о существующих рисках информационной системы».

Комплексная экспертная система управления информационной безопасностью «АванГард» — это программный продукт, предназначенный для решения задач управления безопасностью в больших территориально-распределенных автоматизированных информационных системах и призванный облегчать задачи контроля за центральными структурами обеспечения информационной безопасности на местах. Данный комплекс — один из инструментов анализа и контроля риска.

Основные возможности комплекса: гибкая система ввода и редактирования модели предприятия; возможность построения модели риска; система оценки и сравнения рисков; оценка мер

противодействия; построение вариантов комплексов мер защиты и оценка остаточного риска.

Несмотря на многочисленность рассмотренных программных средств, применение их для оценки риска ООЭ ограничено из-за невозможности адекватного детализированного описания в них предметной области и неразработанности достоверных методов оценки риска ООЭ в условиях частичной определенности.

Особенности оценки риска опасных объектов энергетики

Имеющиеся программные средства по оценке риска дают оценку, не учитывающую основные особенности ООЭ — колебания риска на различных этапах его жизненного цикла, существенное влияние социофактора на протекание процессов в ООЭ, сложность ООЭ как открытой социо-технической системы.

Рассмотрим жизненный цикл ООЭ. Предварительно можно выделить следующие этапы:

производственный, включающий окончательную сборку, комплектование, испытание, проверку, транспортирование и хранение;

эксплуатацию, транспортирование, хранение, техническое обслуживание, подготовку к применению;

снятие с эксплуатации и ликвидацию (включая техническое обслуживание, хранение, транспортирование, разборку).

Назначение, функции, состав и структура автоматизированной системы оценки риска

АСОР предназначена для обеспечения эффективного функционирования объекта оценки путем автоматизированного выполнения заданных функций. Степень автоматизации функций оценки определяется производственной необходимостью и возможностями формализации процесса управления.

Функции АСОР устанавливают в техническом задании на ее создание исходя из целей управления, заданных ресурсов для их достижения и ожидаемого эффекта от автоматизации. Необходимый набор элементов выбирают в зависимости от вида конкретной АСОР.

В состав АСОР входят следующие виды обеспечений:

информационное — классификаторы технико-экономической информации, нормативно-справочная информация, форма представления и организация данных в системе, в том числе формы документов, массивов и логические интерфейсы (протоколы обмена данными);

программное — программы, необходимые для реализации всех функций АСОР в объеме, предусмотренном техническим заданием;

техническое — технические средства, необходимые для реализаций функций АСОР — средства получения, ввода, подготовки, обработки, хранения (накопления), регистрации, вывода, отображения, использования, передачи информации и средства реализации управляющих воздействий;

организационное — документы, определяющие функции подразделений управления, действия и взаимодействие персонала АСОР;

метрологическое — метрологические средства и инструкции по их применению;

правовое — нормативные документы, определяющие правовой статус АСОР и персонала, правила функционирования АСОР и нормативы на автоматически формируемые документы, в том числе на машинных носителях информации;

лингвистическое — языки описания и манипулирования данными.

В процессе создания АСОР используют также математическое обеспечение, в состав которого входят методы решения задач управления, модели и алгоритмы. В функционирующей системе математическое обеспечение реализовано в составе программного обеспечения.

Структуры АСОР характеризуют внутреннее строение системы и описывают устойчивые связи между ее элементами. При описании АСОР пользуются структуры следующих видов, которые отличаются типами элементов и связями между ними:

функциональная (элементы — функции, задачи, операции; связи — информационные);

техническая (элементы — устройства ввода, хранения, обработки информации и другие; связи — линии связи между устройствами);

организационная (элементы — коллективы людей и отдельные исполнители; связи — информационные, соподчинения и взаимодействия);

алгоритмическая (элементы — алгоритмы; связи — информационные);

программная (элементы — программные модули; связи — информационные и управляющие);

информационная (элементы — формы существования и представления информации в системе (файлы, таблицы, массивы, базы данных и т. п.); связи — операции преобразования информации).

Все изложенное позволяет говорить о необходимости разработки и постоянного совершенствования автоматизированной системы оценки риска, удовлетворяющей всем требованиям и особенностям ООЭ. В одной даже очень подробной, статье невозможно дать всеобъемлющее описание создаваемой АСОР опасных объектов энергетики. Исследования продолжаются в лаборатории имитационного моделирования опасных процессов в чрезвычайных ситуациях кафедры УЗЧС ФКБ СПбГПУ в ходе отладки алгоритмов и вычислительных экспериментов исследовательского прототипа АСОР ООЭ при выполнении четвертого этапа НИР по теме «Научные основы прогнозирования опасностей, снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концептуальные модели базы данных опасных объектов, источников опасности и факторов риска информационно-управленческой системы прогнозирования техногенных и природных катастроф в энергетике [Текст] // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: матер. междунар. конф. 17–18 февраля 2011 года.— СПб, Т. 3 — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 139–146.

2. **Туманов, А.Ю.** Экономика и финансовое обеспечение инновационной деятельности. Количественная оценка риска инновационного проекта [Текст]: Учеб. пособие / А.Ю. Туманов.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 195 с.

3. **Туманов, А.Ю.** Автоматизированная система количественной оценки риска инновационного проекта [Текст]: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.Ю. Туманов // СПбГПУ.— СПб., 2006.— 25 с.

4. **Туманов, А.Ю.** Техногенные факторы воздействия и требования к защите энергетических народнохозяйственных объектов / А.Ю. Туманов, В.В. Домаков, В.Г. Кондратьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ Сер.: Наука и образование.— 2011.— № 4(110).— С. 245–250.

5. **Туманов, А.Ю.** Модели и алгоритмы для прогнозирования опасностей объектов техносферы и защиты от угроз в энергетике [Текст] / А.Ю. Туманов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2011.— № 4(135). С. 263–272.

6. **Туманов, А.Ю.** Обоснование адекватности математической модели оценки риска социо-технических систем [Текст] / А.Ю. Туманов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— Сер.: Инноватика.— 2008.— №3 (56).— С. 66–75.

УДК 621.039.566

В.И. Гуменюк ,Б.С. Доброборский, М.Е. Федосовский

О ПРОБЛЕМЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Управление энергетическими объектами представляет собой исключительно сложный и ответственный процесс. Особенно сложно управлять этим процессом при различных чрезвычайных ситуациях. В таких случаях для обеспечения безопасности и надежности функционирования энергосистемы необходимы исключительно согласованные действия технологической и противоаварийной автоматики и оперативно-диспетчерского управления.

Для этого в Российской Федерации был разработан ряд законов и нормативных документов, в частности Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании», от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», Постановление Правительства РФ от 27.12.2004

№ 854 «Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике».

В 2005 году в дополнение к этим документам был введен стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС России» «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем» СТО 17330282.29.240.001–2005. Этот стандарт содержит основные правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части Единой энергетической системы (ЕЭС) России, а также технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем.

По основным понятиям и технологии он согласован с правилами работы объединения европейских энергосистем UCTE (The Union for the Coordination of Transmission of Electricity), представленными в UCTE Operation Handbook.

Назначение этого стандарта — регламентация порядка действий оперативно-диспетчерского и дежурного персонала в электроэнергетике по предотвращению развития и ликвидации наиболее характерных аварийных нарушений нормального режима электрической части Единой энергетической системы России, а также технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем, расположенных на территории Российской Федерации.

Содержанием стандарта является перечень предписаний о действиях оперативно-диспетчерского и дежурного персонала в различных случаях наступления чрезвычайных ситуаций.

Поскольку управление энергетическими объектами, особенно в чрезвычайных ситуациях, представляет собой исключительно сложный процесс, введение стандарта призвано обеспечить единообразие и управляемость действий оперативного персонала.

При этом стандартом предусматриваются не только конкретные и однозначные действия оперативного персонала, но и возможность выбора при принятии тех или иных решений.

Например, при выполнении работ по ликвидации перегрузки оборудования, внешних и внутренних сечений зоны в соответствии с п. 5.3.3. отключение энергопринимающих установок потребителей дистанционно по каналам противоаварийной автоматики (ПА) осуществляется согласно утвержденному перечню в следующих случаях:

а) если мероприятия по п. 5.3.2 из-за низкой эффективности не привели к снижению перетока мощности ниже аварийно допустимого значения;

б) при отказе автоматики разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) в условиях, когда она действует на отключение энергопринимающих установок потребителей (САОН);

в) после срабатывания АРПМ, когда переток активной мощности вновь приближается к уставке срабатывания.

Можно привести достаточно много и других примеров.

Из этого примера видно, что содержание действий персонала представляет собой управление сложными технологическими процессами, которое необходимо осуществлять в обстановке чрезвычайной, иногда стрессовой ситуации, что требует значительных физических и психологических нагрузок.

Однако хорошо известно, что решения, принимаемые в такой обстановке, часто бывают ошибочными и даже абсурдными.

Это объясняется тем, что, в отличие от машин, имеющих, как правило, весьма ограниченное количество степеней свободы (обычно 1–2), организм человека в соответствии с законами термодинамики биологических систем представляет собой систему с большим количеством степеней свободы. Поэтому человек в стрессовой ситуации может принимать самые неожиданные и разнообразные решения и совершать самые неожиданные действия, несмотря на предписания и инструкции.

Таким образом, поставленные в стандарте и других аналогичных документах задачи по согласованию действий технологической и противоаварийной автоматики и оперативно-диспетчерского управления в полной мере не решаются, ибо они не учитывают физиологические свойства организма человека.

Для определения путей повышения надежности действий персонала в чрезвычайной обстановке нами был проведен анализ действующих нормативных гигиенических документов, регламентирующих условия труда, в частности «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» (Руководство Р.2.2.2006–5).

Анализ этого документа показал, что для оценки труда по фактору напряженности трудового процесса в нем содержится ряд таблиц, в которых оценка напряженности дается в баллах в зависимости от сложности решаемых задач.

В таблице «Классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса» приведен пример такой оценки.

Как видно из таблицы, количественная оценка напряженности труда, предусмотренная Руководством Р.2.2.2006–5, весьма условна в связи с отсутствием конкретных показателей.

Кроме того, оценка напряженности труда в условиях чрезвычайной ситуации, например при угрозе жизни, в данном документе вообще не рассматривается.

Таким образом, проблема количественной оценки напряженности труда персонала в условиях чрезвычайной ситуации нормативными документами до настоящего времени не рассматривается и не анализируется.

Для решения этой проблемы нами был проведен общий термодинамический анализ функционирования человека как термодинамической системы при психологических нагрузках в сравнении с нагрузками физическими и свойств его фенотипической адаптации.

Проведенными исследованиями было установлено, что адаптация организма человека к психологическим нагрузкам по сравнению с физическими нагрузками достаточно ограничена, что связано с конституцией организма человека и особенностью функционирования его органов.

Основная причина ограничения фенотипической адаптации организма человека к психологическим нагрузкам связана с ограничением объема ткани мозга костной тканью и, соответственно, ограничением количества ингредиентов, участвующих в биохимических реакциях, что отсутствует у мышечной ткани.

Мышечная ткань, не связанная ограничениями по объему, при достаточных сочетаниях нагрузки и отдыха в результате фенотипической адаптации может значительно увеличиваться по массе и объему, иногда достигая значительных параметров, например у культуристов.

Классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса

Показатели напряженности трудового процесса	Интеллектуальные нагрузки для разных классов условий труда			
	Оптимальный	Допустимый	Вредный	
	Напряженность труда легкой степени	Напряженность труда средней степени	Напряженный труд	
			1 степени	2 степени
	1	2	3.1	3.2
Содержание работы	Отсутствует необходимость принятия решения	Решение простых задач по инструкции	Решение сложных задач с выбором по известным алгоритмам (работа по серии инструкций)	Эвристическая (творческая) деятельность, требующая решения алгоритма, единоличное руководство в сложных ситуациях
Восприятие сигналов (информации и их оценка)	Восприятие сигналов, но без необходимости коррекции действий	Восприятие сигналов с последующей коррекцией действий и операций	Восприятие сигналов с последующим сопоставлением фактических значений параметров с их номинальными значениями. Заключительная оценка фактических значений параметров	Восприятие сигналов с последующей комплексной оценкой связанных параметров. Комплексная оценка всей производственной деятельности

В связи с этим организм человека нельзя приучить длительное время не спать, длительное время выполнять умственную работу и т. д., а потому тренировки, направленные на их увеличение, не имеют смысла.

Отсюда следует, что для обеспечения успешной работы оперативного персонала с минимальным количеством ошибок необходимо в максимальной степени количественно и качественно учитывать эти свойства организма.

Количественный учет этого свойства может быть осуществлен путем использования способа количественной оценки воздействия на организм человека различных нагрузок, в котором в качестве критерия используется время восстановления функциональных сдвигов, вызванных воздействием нагрузок [2].

В соответствии с законами термодинамики биологических систем реакция организма человека на внезапные психологические нагрузки при наступлении чрезвычайной ситуации имеет вид, представленный на рисунке [1].

Как видно из рисунка, график изменения функциональных сдвигов при воздействии внезапной чрезвычайной обстановки содержит три фазы:

1 — функциональные сдвиги как реакция на внезапную психологическую нагрузку;

2 — частичное восстановление функциональных сдвигов;

3 — функциональные сдвиги, вызванные длительностью воздействия психологической нагрузки.

Рассматривая работоспособность мозга как некоторый объем биохимических ингредиентов, обеспечивающих соответствующие реакции, рассмотрим его функциональные возможности в течение суток.

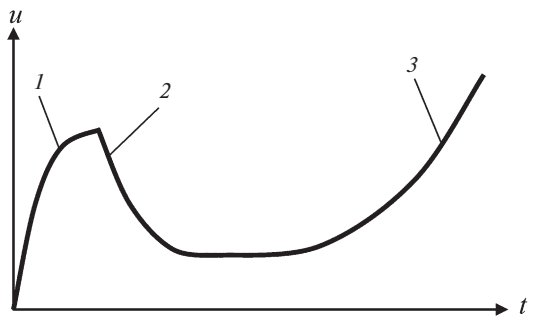


График изменения функциональных сдвигов при воздействии внезапной чрезвычайной обстановки

В течение суток мозг обеспечивает два основных функциональных состояния организма человека: сон и бодрствование.

За время сна посредством соответствующих биохимических реакций клетки мозга насыщаются определенным количеством биохимических ингредиентов, необходимых ему для обеспечения состояния бодрствования.

При достижении за время сна максимального количества ингредиентов для состояния бодрствования происходит бифуркация термодинамического состояния клеток мозга, при которой синтез ингредиентов для обеспечения состояния бодрствования прекращается, человек просыпается и начинает активный образ жизни.

Длительность нахождения человека в состоянии бодрствования определяется скоростью биохимических реакций, использующих накопленные за время сна запасы. При нормальных условиях функционирование организма человека в состоянии бодрствования до периода сильного утомления может продолжаться до 24 часов и более. При наступлении чрезвычайной ситуации биохимические реакции, происходящие в мозге человека, идут со значительной скоростью. В результате этого утомление человека наступает значительно раньше, чем при нормальной работе.

Причем здесь имеет большое значение время наступления чрезвычайной ситуации. При ее наступлении в начале смены организм человека способен активно действовать на протяжении достаточно длительного времени. При ее наступлении в конце смены организм человека быстро теряет работоспособность, что приводит к высокой вероятности ошибочных действий и решений.

Таким образом, для обеспечения высокого уровня готовности оперативного персонала к наступлению чрезвычайной ситуации необходим такой график работы, при котором в течение всей смены у оперативного персонала сохранялась бы высокая работоспособность.

В зависимости от степени готовности организма человека к наступлению чрезвычайной ситуации в том или ином состоянии находятся его ферментативные системы регуляции.

Организм человека реагирует не только на абсолютную величину воздействия, но и на скорость нарастания этого воздействия. Поэтому

при абсолютно неожиданном получении информации о чрезвычайной ситуации вызванные этим сообщением интенсивные биохимические реакции могут привести его к стрессу — полной потере работоспособности и даже потере сознания.

В случае же, когда проведена соответствующая подготовка к получению информации о чрезвычайной ситуации, в результате фенотипической адаптации реакция и необходимые действия человека проходят с минимальным количеством ошибок.

Поэтому программы специального обучения и тренингов [3] должны учитывать указанные физиологические особенности организма человека.

Необходимая длительность работоспособности персонала при наступлении чрезвычайной ситуации в значительной степени зависит от конкретных обстоятельств.

Поэтому, имитируя наступление таких обстоятельств при обучении и тренировках, необходимо производить измерения физиологического состояния персонала по наиболее показательным параметрам и с использованием указанного выше способа по критерию времени восстановления функциональных сдвигов производить расчет ресурса его работоспособности.

Указанный критерий позволяет находить в программе подготовки «слабое звено», вызванное не недостаточным обучением тех или иных элементов их действий, а физиологическими особенностями организма человека, и максимально адаптировать эти программы к возможностям человека.

По результатам расчета возможно определить наиболее оптимальную схему организации работ.

Применение способа количественной оценки воздействия нагрузок показало также возможность определения оптимальных по содержанию тренировочных программ, где конечным результатом являются максимально слаженные действия личного состава с минимальной вероятностью ошибок.

Применение указанного способа оценки позволит количественно определить эффективность тех или иных конструкций тренажеров и тренингов, степень фенотипической адаптации оперативного персонала, периодичность повторения тренингов и установить тот уровень адаптации, при котором подготовленность оперативного персонала можно будет считать достаточной для осуществления оперативных мер при наступлении чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доброборский, Б.С.** Безопасность машин и человеческий фактор [Текст]: Монография / Б.С. Доброборский; под ред. проф. С.А. Волкова.— СПб., 2011.—115 с.

2. **Патент РФ №2519576.** Способ оценки величины воздействия на организм человека различных нагрузок [Текст] / Б.С. Доброборский, Е.Н. Кадыскина.—2000. Бюлл. № 33.

3. **Магид, С.И.** Научная методология в тренажерной подготовке персонала электроэнергетики РФ [Текст] / С.И. .Магид, Е.Н. Архипова, В.И. Беляев, Л.П. Музыка.— Сб. «Человеческий потенциал и надежность электроэнергетики» / Под ред. д.т.н., проф. С.И. Магида.— Краснодар-Москва. 2007.

УДК 551.594.6

С.В. Авакян, Н.А. Воронин, К.А. Дубаренко

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА АВАРИЙНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ И СВЯЗИ

Изучение воздействия космических факторов на техносферу показывает, что главный негативный эффект создают не сами солнечные вспышки и не наиболее энергичные частицы космоса (галактические и солнечные космические лучи), проникающие сквозь атмосферу под-

час до земной поверхности, а геомагнитные бури. Это связано с энергетикой: энергия, выделяющаяся в околоземном космическом пространстве (ионосфера) в период магнитных бурь, многократно превышает и мгновенную и полную (для мощной бури — за сутки и более) долю всех остальных обусловленых вспышкой эффектов.

Гелиогеомагнитная (то есть совокупная солнечная и геомагнитная) активность воздействует практически на все объекты техносферы: электрические сети, трубопроводы нефтегазового комплекса и водоводы, системы теле-, радио- и спутниковой связи и космического позиционирования GPS и ГЛОНАСС. Максимальной величины эта опасность достигает в северных широтах — в авроральной зоне (область полярных сияний), однако ущерб от нее может быть столь велик, что ею занимаются и более южные страны, в частности Китай и Япония. В предлагаемой статье представлены результаты исследования роли космических факторов в нарушениях техносферной безопасности как при функционировании больших электрических систем, так и линий коммуникаций (связи и автоматики на железнодорожном транспорте). Это исследование актуально при анализе и прогнозе чрезвычайных ситуаций не только на объектах техносферы, но и на объектах экономики и социальной сферы [1, 2]. Обсуждается сценарий возможного влияния на техносферу северных территорий перемещения магнитного полюса северного полушария из Канады к арктическому побережью России, предсказываемого геомагнитологами.

Геомагнитноиндуцированные токи и большие электроэнергетические системы

В статье [4] исследовано влияние геомагнитных бурь на большие проводные (кабельные) системы, в первую очередь — на электрические сети. Показано, что основной причиной аварийности на линиях электропередач и связи являются геомагнитноиндуцированные токи, генерируемые в проводящих материалах во время магнитных бурь переменными магнитными полями. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Стратегия национальной безопасности страны включает совершенствование и развитие системы предупреждения чрезвычайных ситуаций, в том числе в энергетике и экологии. Это особенно актуально в наше время, когда, с одной стороны, небывалыми темпами разрастается техносфера и растет ее давление на природу, а с другой стороны, уменьшается (из-за появления все более совершенных и утонченных технических разработок) уровень порога того воздействия, которое может привести к аварии. Повышению риска способствует и резко возрастающая компьютеризация процессов управления техническими системами. При этом во многих случаях не уменьшается роль человека-оператора. Интенсификация труда, увеличение психологических нагрузок при постоянном усложнении проводимой работы делают человеческий фактор одним из уязвимых моментов в цепи возможного возникновения аварийных ситуаций, поскольку одновременно усиливается и давление негативных экологических процессов.

Действительно, текущее развитие цивилизации — рост народонаселения и технический прогресс — отражаются в глобальных изменениях окружающей среды. Меняются и устоявшиеся, вызываемые вариабельностью активности Солнца природные циклы атмосферных и биосферных процессов, которые ответственны за погодно-климатические и биологические условия жизни человечества [4, 5]. Современная высокоразвитая техносфера оказалась уже способной влиять, например излучением мощных радиостанций, на ближнее околоземное космическое пространство — ионосферу и радиационные пояса Земли [6]. Такое влияние может осуществляться как непосредственно, так и по механизмам обратной связи, при этом многофакторность, многоканальность, многокомпонентность отрицательных воздействий на технические системы непрерывно возрастает вместе с увеличением масштаба этих систем и их усложнением.

Вклад Солнца в земные явления и процессы — предмет изучения в физике солнечно-земных связей [5]. Прежде всего представляют интерес результаты исследования трех проблем — «Солнце — техносфера», «Солнце — погода и климат» и «Солнце — биосфера, включая человека», хотя известно влияние солнечной активности на литосферу (землетрясения и вулканизм), а также на крупномасштабные процессы в океане и даже на скорость вращения Земли.

Главная проблема солнечно-земных связей до последнего времени — определение физических механизмов непосредственного воздействия факторов солнечной активности на различные земные объекты, включая техносферу. Дело в том, что основные последствия вспышечной деятельности Солнца вызваны двумя эффектами [7]: всплесками электромагнитного излучения в периоды солнечных вспышек и явлениями, которые связаны с последующим возникновением геомагнитных бурь. Во время вспышек наблюдается резкое усиление потоков ионизирующего — жесткого (крайнего) ультрафиолетового и особенно мягкого рентгеновского излучения Солнца, а в периоды геомагнитных бурь возникают корпускулярные высыпания (в основном электронов, а также протонов) из радиационных поясов Земли. Вспышечная деятельность Солнца сопровождается также усилением потоков корпускул из внешней части его атмосферы — короны. Это — так называемые солнечный ветер и выбросы корональной массы, имеющие высокие скорости направленного движения в сторону планет, включая Землю, и энергичные частицы — протоны солнечных космических лучей с энергией в десятки и сотни МэВ. Но ионизирующее излучение и корпускулярные потоки солнечного и геомагнитосферного происхождения полностью поглощаются в ионосфере, не доходя до земной поверхности несколько десятков километров [8]. И поэтому всегда стоял вопрос, каким образом основные факторы солнечно-геомагнитной активности могут влиять на атмосферные и биосферные явления, а также на техносферу. Нами при решении этой проблемы для пояснения солнечно-погодно-климатических и биосферных связей предложено использовать соответственно триггерные и резонансные физические механизмы [4–6]. Воздействие космоса непосредственно на техносферу обусловлено, как было описано, например в нашей статье [9], а более подробно — в [10], генерацией во время магнитных бурь особых геомагнитноиндуцированных токов — ГИТов, индуцированных по закону Фарадея переменными магнитными полями в проводящих системах, в том числе в стальных трубопроводах, линиях электропередач и связи (рис. 1) [11, 12]. Эти токи слабо изменяются во времени (их называют квазистационарными). Установлено, что наибольшую опасность они представляют для трансформаторов, понижающих напряжение при переходе от линий электропередачи к потребителям. Их рабочая частота — частота сети переменного тока (50–60 Гц), т. е. сильно превышает частоты паразитного воздействия ГИТов (типичные значения для периодов таких токов согласно [13] составляют от 0,01 до 1 ч).

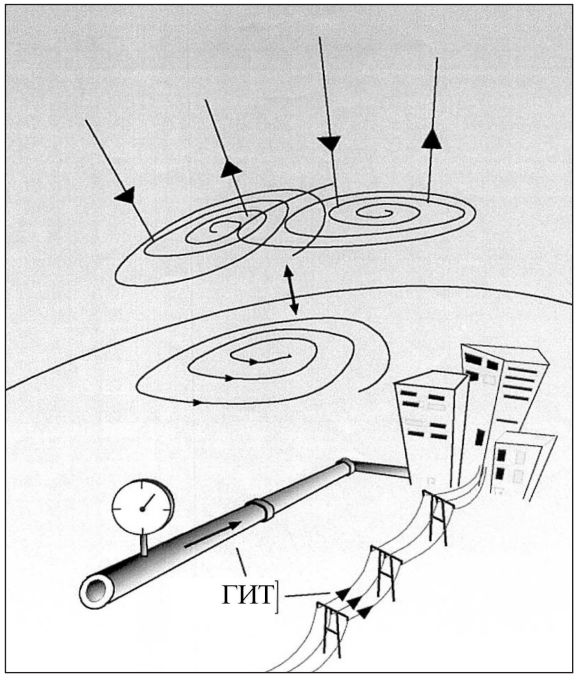


Рис. 1. Геомагнитноиндуцированные токи (ГИТ): вариации ионосферных токов $I(t)$, генерирующих электрическое поле $E(t)$, вызывают ГИТ [11]

Любые магнитные поля создаются электрическими токами, которые можно называть первичными, а ГИТ имеет смысл называть вторичными токами, поскольку они возникают, когда первичные токи являются переменными. Первичные переменные электрические токи, индуцирующие ГИТ, существуют в следующих областях:

в магнитосфере — кольцевые токи, ответственные за главную фазу магнитной бури, и токи в хвостовой части магнитосферы;

в ионосфере — наиболее интенсивные в авроральной зоне, а также экваториальный электроджет;

между ионосферой и магнитосферой — продольные токи, текущие по геомагнитным силовым линиям;

в земной коре — «теллурические токи»;

в атмосфере между Землей и ионосферой — токи, связанные с грозовой активностью, тайфунами и землетрясениями; часть этих токов течет в ионосфере [8].

Высыпания энергичных заряженных частиц из магнитосферы и радиационных поясов могут составлять часть продольных токов, но основной вклад высыпаний в ГИТ осуществляется по следующей схеме. Высыпающиеся в ионосферу частицы килоэлектронвольтных энергий создают дополнительную ионизацию на высотах 90–120 км от земли и увеличивают проводимость в областях высыпаний, что по закону Ома ведет к усилению горизонтальных ионосферных токов и создаваемых ими магнитных полей. Изменения этих полей во времени (наиболее интенсивные при бурях и суббурях) по закону Фарадея индуцируют ГИТ в трубопроводах и электросистемах. Следует полагать, что вклад в ГИТы высыпаний электронов из радиационных поясов является наибольшим по сравнению с другими источниками магнитосферно-ионосферно-литосферной природы. Итак, воздействие корпускул, высыпающихся из радиационных поясов и из геомагнитосферы во время мощных геомагнитных бурь, создает в ионосфере добавочные токовые системы, которые через электрические поля генерируют ГИТы земной поверхности. Величина ГИТ больше в меридионально расположенных трубопроводах и линиях электропередач, поскольку в этом случае вариации магнитных полей на концах — наибольшие, а значит максимальных значений достигает и электродвижущая сила, вызывающая такие токи [12]. Такие токи постоянно рассматриваются как угроза работоспособности больших энергосистем, включая ускорение коррозии магистральных трубопроводов [14].

Ежегодно наблюдается до 20–70 (в зависимости от активности Солнца) сильных геомагнитных бурь с величиной планетарного индекса геомагнитной активности K_p, равным 6 и более [15], т. е. в среднем происходит каждую неделю одна, а то и две больших бури. При этом уровне активности эффекты бури проявляются уже на геомагнитных широтах 50°, что соответствует линии, проходящей южнее Братска, Новосибирска, Тулы. Вся территория к северу от этой линии охвачена бурей, включая зону полярных сияний. Примерно одна, еще более сильная геомагнитная буря (с K_p, равным 7 и выше) происходит раз в 10–15 дней, и тогда уже практически вся Россия подвержена ее влиянию. Одно из главных проявлений мощных магнитных бурь — вторжение потоков энергичных корпускул (в основном электронов) в ионосферу на средних и высоких широтах.

В период типовой мировой магнитной бури наиболее сильные возрастания потоков электронов кэВ-энергий на умеренных и высоких геомагнитных широтах происходят в главную фазу бури (в течение двух-четырех часов) и на фазе восстановления, когда фиксируется рекуррентное возрастание, иногда до наивысших уровней, в течение десятков часов [7] (рис. 2). Усиления высыпающихся в ионосферу электронных потоков и, следовательно, ГИТ-ов в главную фазу и в фазу восстановления магнитной бури происходят до 300 раз и более, при этом в главную фазу такие изменения идут очень быстро. Такие экспериментальные данные получены радиометрами ГОИ им. С.И. Вавилова на спутнике «Космос-381» [7, 17] (рис. 2).

Действительно, при вариациях величины геомагнитного поля во время бури (с максимумом в центре главной фазы) сопровождающие эти изменения высыпания электронов из радиационных поясов испытывают в начале и в конце главной фазы резкие ослабления (до порога регистрации на период в течение 1,5–3 часов). Только в центре главной фазы они в средних широтах на 2–4 часа достигают максимальных значений — до уровня авроральных вторжений. Быстрые вариации интенсивных высыпаний хорошо проявляются в картинах мощных сияний в верхней атмосфере, причем внезапные их затухания, а затем всплески интенсивных свечений в главную фазу магнитной бури неоднократно наблюдались и космонавтами [17]. Подобные всплески ведут к мгновенным изменениям потенциалов на трубопроводах, что особенно опасно влияет на электрохимическую коррозию. Поскольку возрастания над уровнями добуревых эффектов (см. рис. 2) до 300 раз и более для высыпающихся потоков, а значит и в интенсивности ГИТ-ов, происходят чуть ли не целые сутки, то следует констатировать, что отключение катодной защиты во время сильной магнитной бури даже на одни сутки способно увеличить почти вдвое годовой эффект электрохимической коррозии трубопровода.

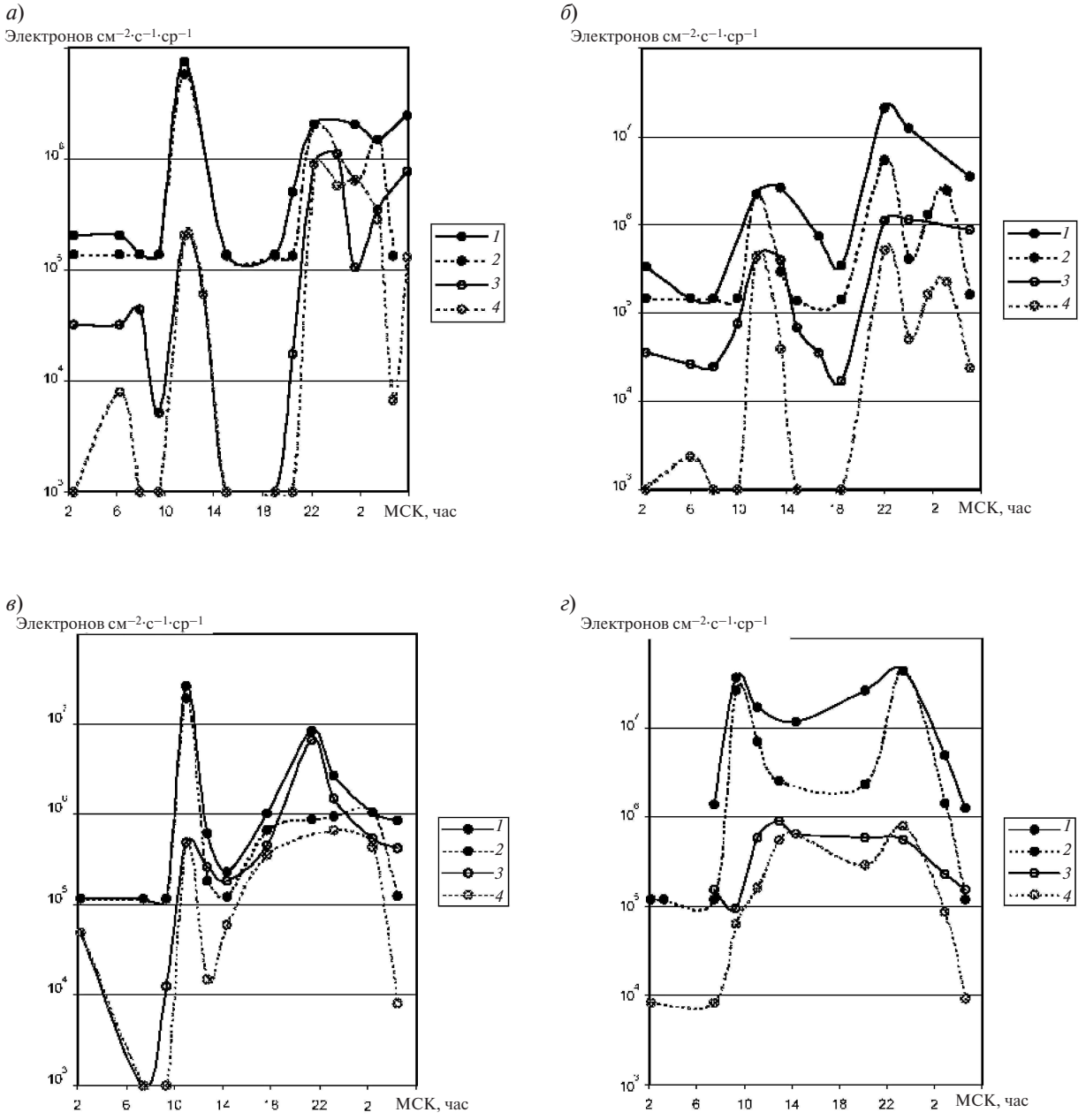


Рис. 2. Вариации интенсивности потоков электронов с энергиями в единицы и десятки кэВ в период сильной геомагнитной бури, которые высыпаются из радиационных поясов на средних широтах в Северном полушарии (отдельно для дневной (*а*, *б*) и ночной (*в*, *г*) ионосферы и для двух областей геомагнитных широт — 45–55 ° (*а*, *в*) и 55–60 ° (*б*, *г*): начало геомагнитной бури — 04 ч. 45 мин., главная фаза бури — с 10 до 12 ч. московского времени. Обозначено: *1* — потоки захваченных электронов с энергией более 2,5 кэВ; *2* — потоки высыпающихся электронов с энергией более 2,5 кэВ; *3* — потоки захваченных электронов с энергией более 25 кэВ; *4* — потоки высыпающихся электронов с энергией более 25 кэВ

Интенсивность потока высыпающихся электронов сильно меняется с широтой, увеличиваясь от средних к высоким широтам зоны полярных сияний (см. рис. 2, *а*, *б*); поэтому величины электрического поля и индуцированных токов наиболее значительно меняются именно для трубопроводов меридионального направления [12].

Техносферные аварии в периоды магнитных бурь

Примеров воздействия геомагнитноиндуцированных токов на объекты техносферы можно привести множество, но в первую очередь заслуживают внимания воздействия геомагнитных бурь на электрические сети.

На подстанциях линий электропередач, обеспечивающих объекты народного хозяйства электроэнергией, геомагнитноиндуцированные токи текут в земле через трансформаторные обмотки и по заземлению, т. е. там, где никаких защитных релейных устройств нет (не предусмотрены проектными решениями), и в этом состоит опасность. В энергетических системах эти токи приводят к таким опасным эффектам:

насыщению трансформаторов, их перегреву и разрушению;

генерации паразитных гармоник переменного тока;

нарушению работы стандартных защитных реле и, как следствие, отключению линий электропередач;

колебания активной и реактивной мощности в энергосистеме и, как следствие, к ложной работе или несрабатыванию автоматики и релейной защиты, массовым нарушениям электроснабжения в узлах нагрузок [18, 19].

Первые зафиксированные воздействия магнитных бурь относятся к XIX веку. Так, во время сильнейшей бури в августе-сентябре 1859 года перестали работать телеграфные системы в Европе и Северной Америке. Перечислим наиболее обсуждаемые в научной литературе геомагнитные бури, вызвавшие поврежденные электросетей:

24 марта 1940 года геомагнитная буря вывела из строя 80 % всех магистральных телефонных сетей в Миннеаполисе, а на нескольких электрических подстанциях северо-востока США вышли из строя силовые трансформаторы. В это же время частично прекратилась подача электроэнергии в штатах Новая Англия, Нью-Йорк, Миннесота, Пенсильвания;

буря в феврале 1958 года привела к тому, что временно прекратилась подача электроэнергии в город Торонто (Канада) из-за выхода из строя реле на трансформаторной подстанции Онтарио. В результате ГИТ-ов, связанных с бурей в августе 1972 года, полностью вышел из строя силовой трансформатор на 230 кВ (а цена такого трансформатора — до миллиона долларов) в энергосистеме провинции Британская Колумбия (Канада).

2 августа 1972 года в результате аварии на трансформаторе, расположенном в Британской Колумбии, было нарушено гидро- и энергоснабжение;

19 декабря 1980 вышел из строя очень дорогостоящмй трансформатор через 8 дней после мощного красного полярного сияния в Санкт-Джеймс-Бей, Канада;

13 апреля 1981 пришлось заменять трансформатор в Сент-Джеймс-Бей, Канада, поврежденный во время очередной геомагнитной бури;

30 октября 2003 в энергосистемах на юге Швеции в Мальме на 20–50 минут отключалась электроэнергия из-за сильной геомагнитной бури. Эта же буря нанесла значительный ущерб трансформаторам в Южной Африке — более 15 трансформаторов были повреждены;

во время геомагнитной бури 25 марта 1940 года стационарные телефоны, рассчитанные на напряжение 48 В, были испорчены в результате скачков напряжения в 600 В, на нескольких электрических подстанциях северо-востока США вышли из строя силовые трансформаторы и частично прекратилась подача электроэнергии в штатах Новая Англия, Нью-Йорк, Миннесота и Пенсильвания. На подводном телефонном кабеле между Ньюфаундлендом и Шотландией было зарегистрировано повышение напряжения до 2600 вольт;

1 сентября 2005 года. Почти 50-часовое возмущение магнитного поля, пик которого тогда пришелся на Северную Америку, привело к отключению высокочастотной связи во многих районах континента, а также резкому снижению точности спутниковой навигации;

13 марта 1989 года в 7 ч 45 мин мирового времени (московское время опережает его на три часа) на высоковольтных линиях электро-

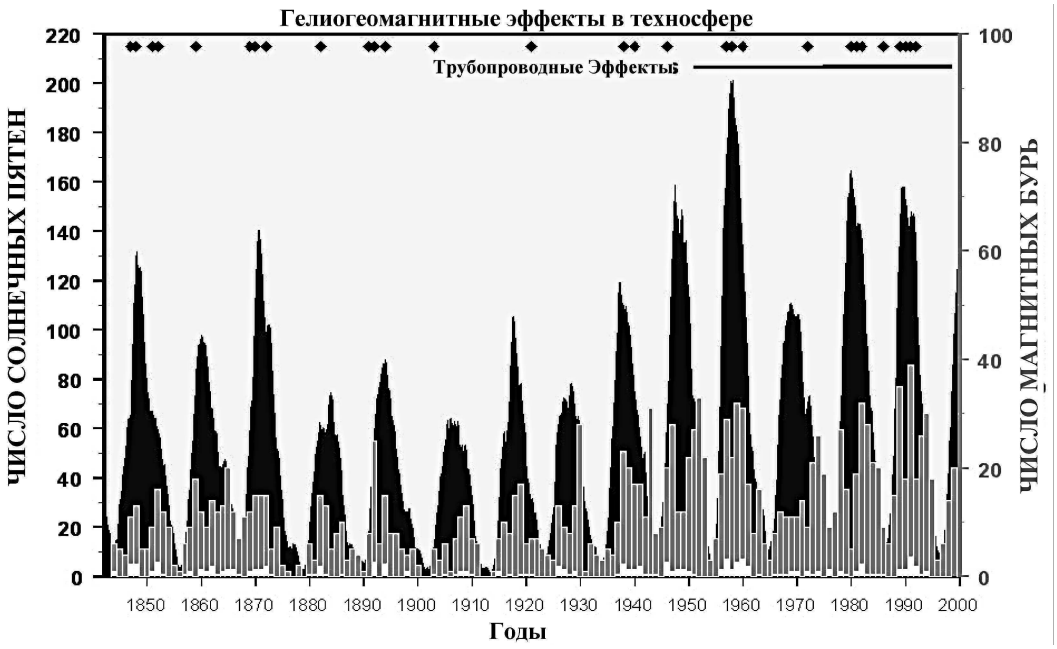


Рис. 3. Гелиогеомагнитные эффекты в техносфере, число солнечных пятен и магнитных бурь за период с 1847-го по 2000 год. Ромбы отражают возникновение эффектов в техносфере (телеграф, кабели связи, системы электроснабжения). Сплошной горизонтальной линией показана имеющая кумулятивный эффект нарастающая наружная коррозия на магистральных газонефтепроводах, обусловленная геомагнитноиндуцированными токами [20]

передачи, ведущих из Джеймс Бэй (север провинции Квебек, Канада) в южные районы провинции Квебек, а также в северные области США и входящих в энергосистему Гидро-Квебек, возникли сильные ГИТ-ы. Эти токи создали дополнительную нагрузку на систему в размере 9450 МВт, что стало слишком большой добавкой к существовавшей в тот момент полезной нагрузке в 21350 МВт. Система вышла из строя, оставив шесть миллионов жителей без электроэнергии. На восстановление нормальной работы системы потребовалось 9 часов. Потребители в северных районах США в это время недополучали 1325 МВт [12].

На высоковольтных линиях других энергосистем 13–14 марта также наблюдались неприятные эффекты, связанные с ГИТ-ами: срабатывание защитных реле, выход из строя силовых трансформаторов, падение напряжения, появление паразитных токов. Наибольшие величины индуцированного тока 13 марта были зарегистрированы в системе Гидро-Онтарио (80 ампер) и Лабрадор-Гидро (150 ампер). Поскольку магнитная буря действует на трансформаторы всего региона, происходящее может быстро перерасти в коллапс всей национальной сети трансформаторов. Сеть работает так близко к границе сбоя, что вывести ее из строя оказалось бы совсем не сложно. Все это затронуло не только регион Северной Америки. В ряде стран Северной Европы наблюдались аналогичные явления. Однако их эффект был значительно слабее из-за того, что север Европы находится дальше от магнитного полюса, чем север Америки. Тем не менее в 8 ч 24 мин среднеевропейского времени на шести линиях 130 кВ в средней и южной Швеции был одновременно зарегистрирован вызванный ГИТ скачок напряжения, однако до выхода систем из строя дело не дошло. Во время геомагнитной бури ГИТ величиной до 184 ампер были зарегистрированы в США в нейтральной фазе трансформатора. Крупнейший ГИТ был измерен во время геомагнитной бури на юге Швеции 6 апреля 2000 года — 270 ампер.

Но, если еще во время сильных магнитных бурь в 1958 и 1972 годах из-за появления ГИТ возникли серьезные нарушения в работе трансатлантического телекоммуникационного кабе-

ля, то в марте 1989 года уже действовал новый оптиковолоконный кабель, поэтому нарушений в передаче информации не было. Однако наблюдались три сильных скачка напряжения (в 300, 450 и 700 В) в системе энергообеспечения этого кабеля, которые по времени совпадали с сильными изменениями магнитного поля 13 и 14 марта. Хотя такие скачки и не вызвали выхода системы из строя, они были достаточно велики, чтобы представлять собой серьезную угрозу ее нормальному функционированию.

В числе наиболее важных параметров влияния самой геомагнитной бури — импульсные характеристики магнитного поля Земли — dH/dt, что вытекает из закона электромагнитной индукции Фарадея. Существенные воздействия на электрические сети могут наблюдаться при относительно низких значениях интенсивности; так Квебекская авария 13–14 марта 1989 года произошла при пиковой интенсивности dH/dt порядка 500 нТ/мин. Исторический анализ данных показывает, что после 1972 года по крайней мере в трех случаях наблюдались всплески более 2000 нТ/мин, а уровень в 5000 нТ/мин, возможно, был достигнут во время бури в мае 1921 года, что в 10 раз выше наблюдавшегося в 1989 году. Произойди событие 1921 года сейчас, оно могло бы оставить без электричества почти все США. С учетом уменьшения за это время напряженности полной величины магнитного поля Земли эффект можно ожидать более значительным, а время его воздействия — раньше запланированного. Что касается 24-го одиннадцатилетнего цикла солнечной активности, идущего сейчас к максимуму, то предположительно он не будет самым мощным, но может достигнуть уровня цикла, вызвавшего экстрабурю 1859 года. В [18] показано, что если подобной силы магнитная буря произошла бы сейчас, то следовало бы ожидать массового нарушения электроснабжения на всей планете на неопределенное время.

С ноября 2003 года для изучения влияния геомагнитных возмущений на энергетические системы Кольского полуострова Центром физико-технических проблем энергетики Севера совместно с Полярным геофизическим институтом Кольского научного центра РАН реализуется программа мониторинга ГИТ в сетях «Колэнерго». Создана система цифровой регистрации ГИТ посредством непрерывного измерения постоянного тока в глухозаземленной нейтрали силовых автотрансформаторов на подстанциях энергосистемы класса 110–330 кВ. Контроль за развитием магнитосферных возмущений осуществляется по данным сети наземных магнито-вариационных станций ПГИ и скандинавских стран. По результатам этого мониторинга величины геоиндуктированных токов в электрических сетях 330 кВ для таких широт лежат в интервале 2–7 А, а их редкие кратковременные всплески могут достигать 15–25 А [21, 22].

Наш анализ данных [20], представленных на рис. 3 (в верхней его части — ромбиками), показал [3], что уровень геомагнитной возмущенности в дни аварий был очень высок:

усредненное значение среднесуточного *aa*-индекса (антиподального, получаемого по измерениям на 2-х магнитных обсерваториях, расположенных в северном и южном полушариях) составляло величину 168 нТ, а среднее значение максимального среднесуточного *aa*-индекса — 409 нТ, при этом обычные значения этого индекса всего лишь единицы — десятки нТ;

в среднем по числу событий в день аварии максимальный трехчасовой (планетарный) индекс K_p был 8 (по 9-ти бальной квазилогарифмической шкале), тогда как обычный его уровень в спокойные дни — от 2 до 3. Из всех зафиксированных случаев аварий после 1932 года, когда K_p-индекс был введен в обращение, в половине этих событий регистрировалось трехчасовое значение, равное максимально возможному — 9. Но и усредненное значение — 8 — характеризуется в [15] как геомагнитная возмущенность (мировая магнитная буря), приводящая к дестабилизации напряжения в электросетях, частичному разрушению энергетических систем и отключению их защиты. Среднее значение числа таких мощных бурь — 100 за одиннадцатилетний цикл солнечной активности.

Анализ [23] данных в дни с экстремально мощными геомагнитными бурями, в благоприятные в геомагнитном аспекте дни и в дни с умеренными и средней силы геомагнитными бурями показал, что число серьезных аварий, обрывов в системах электроснабжения и скачков напряжения в высоковольтных воздушных линиях электропередач значительно увеличилось преимущественно в дни очень сильных магнитных бурь, когда геомагнитное поле показало резкие флуктуации. По сравнению с относительно спо-

койными днями с «обычными» техническими проблемами было зарегистрировано значительное увеличение числа аварий такого типа, как срабатывание дифференциальной (фазовой) защиты, авария в защитном заземлении и т. д. Осциллограммы в моменты аварий ясно показывают возросшее число гармонических колебаний тока и напряжения, которые ощутимо меняют волновую форму сигнала в насыщенных трансформаторах. Исследование показало, что те трансформаторы, которые расположены на углах (в точках поворота) системы электропередач, в большей степени подвержены негативному влиянию геомагнитных бурь. В местах с плохой проводимостью грунта системы электропередач больше подвержены риску повреждения из-за ГИТ (токи, встречая сопротивление грунта с низкой проводимостью, предпочитают проводники с минимальным сопротивлением, оказавшимся поблизости, протекая как раз по самим трансформаторам и линиям электропередач через их точки заземления).

Возможные последствия перемещения магнитного полюса к арктическому побережью России

Фактором, усиливающим негативные последствия геомагнитных бурь именно в нашей стране, в настоящее время является дрейф магнитного полюса в Северном полушарии в сторону арктического побережья России по направлению к нынешнему положению Восточно-Сибирской положительной магнитной аномалии. С 1970-х годов скорость и ускорение движения этого магнитного полюса начали резко расти — более чем в два раза за последние 30 лет (до 46 км/год [24]), а к настоящему времени и до 64 км/год. Многолетнее «блуждание» магнитного полюса по территории Северной Канады сменилось устойчивым, практически прямолинейным движением в направлении российского сектора Арктики с нарастающим ускорением. Экстраполяция координат этого полюса при сохранении существующего тренда предсказывает, что к 2050 году магнитный полюс будет располагаться в районе между архипелагом Северная Земля и Новосибирскими островами, что приведет к протеканию мощнейших токов во время геомагнитных бурь вплоть до 40° с.ш., т. е. практически на территории всей России (рис. 4). Это будет создавать опасные ГИТ-ы в электрических сетях Сибири и может поставить их на грань отключения.

Таким образом, в целом следует констатировать, что мы имеем дело с совершенно реальными угрозами нарушения работы электрических сетей не только в далеком будущем, но уже в ближайшие годы (во время максимума 24-го солнечного цикла), а учитывая возрастающую «непредсказуемость» Солнца, — в любой момент.

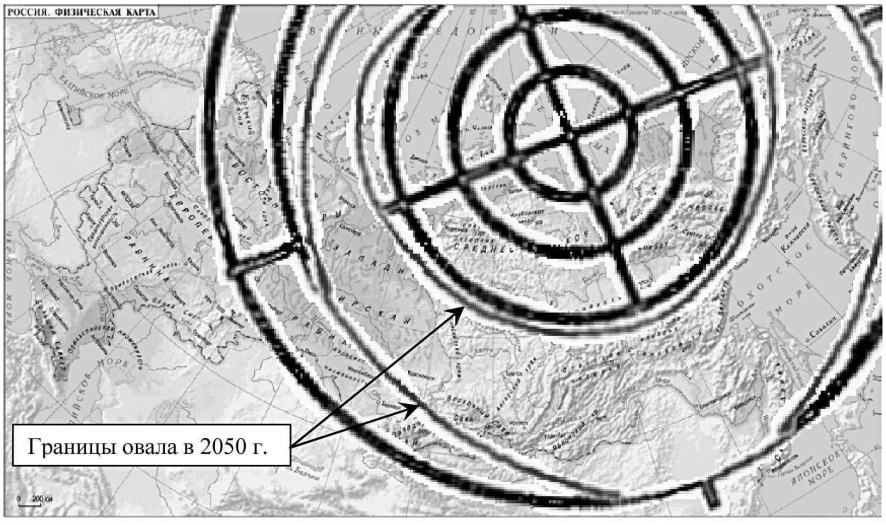


Рис. 4. Схематическое положение овала полярных сияний в 2050 году с учетом прогноза [3, 25, 26] перемещения магнитного полюса Северного полушария на территорию России

Потери при передаче электроэнергии в целом по стране за 20 лет выросли в два раза, до 112 млрд кВт/час. Это более 10 % всей вырабатываемой в России электроэнергии. При этом [27] магистральные электросети дают меньше в тариф, чем распределительные (из-за завышенной рентабельности последних). Сейчас тариф на электроэнергию централизованного энергоснабжения достиг опасной величины (до 4,0 руб./кВт·ч.), и может произойти переход к собственным малым электростанциям (в рамках перехода к распределенной энергетике), в том числе с использованием мини-ТЭЦ на основе газопоршневых энергоустановок. В этом плане интересен факт, что в 2010 году в Россию ввезено более 200 тысяч малых газовых и дизельных электростанций только из Китая общей мощностью около 4 ГВт. В РФ — более 50 тысяч частных электростанций, их общая мощность — почти десятая часть от мощности всех электростанций РФ. Цена их кВт/ч (в 1,4 рубля) почти в 3 раза меньше, чем обычные тарифы для малых предприятий от централизованных систем электроснабжения. С другой стороны, именно северные территории (прежде всего Сибирь) — основные зоны добычи нефти и особенно газа, так что топливных ресурсов для реализации распределенной, свободной от влияния магнитных бурь, электроэнергетики на Севере достаточно. Конечно тогда, особенно в перспективе, с учетом перехода всех сибирских территорий к 2050 году в зону полярных (авроральных) геомагнитных широт, роль учета магнитных бурь при эксплуатации газонефтепроводов резко возрастает.

Влияние магнитных бурь на отказы железнодорожной автоматики

К системам, подверженным влиянию ГИТ, следует также отнести системы автоматики железных дорог, в которых происходят немотивированные переключения сигнальных светофоров, поскольку наведенные токи способны вызывать ложное срабатывание систем световой сигнализации. Когда участок железнодорожного полотна свободен, между рельсами поддерживается определенная разность потенциалов. При появлении же поезда между ними начинает протекать электрический ток. Электрический ток, индуцированный вариациями магнитного поля Земли, может «замкнуть» рельсы, что для системы равносильно появлению поезда. В итоге зеленый сигнал светофора может смениться красным. Особенно чувствительны к космической погоде северные участки российских железных дорог, где геоэффекты от активности Солнца наиболее значительны.

Рассмотрим конкретные данные о воздействии магнитных бурь на железнодорожную сигнализацию. Так, чрезвычайно мощные бури в октябре 2003 года, вызвавшие аварийные ситуации в системах электроснабжения в Швеции, отметились сбоями в работе автоматики на северных железных дорогах России. За период с 1989-го по 2005 год отмечено более 15 случаев аномального поведения телеметрических систем железных дорог, вызванных повышенной геомагнитной активностью. Нарушения в работе систем сигнализации железных дорог могут приводить к существенным потерям в случае простоев подвижного состава, а также в большой степени чреваты развитием аварийных ситуаций.

В [29, 30] изучалось воздействие семнадцати магнитных бурь на поведение систем световой сигнализации на некоторых северных участках РЖД (примерно от 58° до 64° с.ш.). Было установлено, что ложные световые сигналы на железнодорожных светофорах появлялись именно во время наиболее сильных по интенсивности фаз геомагнитных бурь, а длительность сбоев сигнализации совпадала с продолжительностью наиболее сильных геомагнитных возмущений. По мнению авторов статьи, причина обнаруженных аномалий — в индуцированных геомагнитных токах. Всего исследовательская группа проанализировала 16 сбоев в системах световой сигнализации, и все они совпали во времени с магнитными бурями.

В [31] проанализированы сбои и отказы (аномалии) в работе этих систем автоматики и телемеханики, зарегистрированные в 2004–2005 годах на среднеширотной Восточно-Сибирской железной дороге (51–56° с. ш. и 96–114° в. д.) совместно с вариациями геомагнитной активности. Анализ аномалий и их причин, указанных в оригинальных рапортах и журналах соответствующих железнодорожных служб, показал, что примерно 45 % аномалий были связаны с обрывами, ударами и механическими разры-

вами кабелей, жил, а также с метеорологическими причинами (попадание снега, льда и песка в стрелки), с вмешательством посторонних лиц (грабеж и т. д.), т. е. заведомо не были вызваны геомагнитными факторами. Эти случаи были отброшены, а оставшиеся аномалии были использованы для поиска возможных связей с геомагнитной активностью. Получено, что суммарная суточная длительность T аномалий на всех участках дороги меняется в согласии с развитием геомагнитной бури. При достижении пика геомагнитной активности T увеличивается — в три раза. Наблюдается корреляция между длительностью аномалий T и локальным индексом геомагнитной активности A. В частности, для двух супербурь 2004 года, 17 июля — 2 августа и 5–12 ноября, коэффициент корреляции K равен соответственно 0,83 и 0,71.

Проявление эффектов ионосферных возмущений в нарушениях радиосвязи. Проект «Космический солнечный патруль»

Из возможных техногенных последствий смещения магнитного полюса Земли укажем также следующие: полное изменение условий КВ-радиосвязи над территорией России; нарушение работы спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС и др.), так как они используют алгоритмы ионосферной коррекции, построенные на полуэмпирических моделях, применимость которых станет невозможной.

В [32] отмечено, что качество функционирования современных спутниковых радионавигационных систем ограничено влиянием ионосферной среды околоземного космического пространства. В условиях геомагнитных возмущений существенно проявляется нерегулярная составляющая полного электронного содержания в ионосфере и возникают пропорциональные флуктуации группового (фазового) запаздывания, которые могут вызывать появление дополнительных погрешностей позиционирования в одночастотном режиме. Кроме того, активизируется процесс генерации неоднородностей электронной концентрации разных масштабов, которые могут вызвать флуктуации амплитуды и фазы сигналов навигационных спутников (НС) в точке приема. В результате возможен срыв сопровождения сигнала одного или нескольких НС навигационного созвездия по фазе (коду) на одной из рабочих частот и, как следствие, снижение точности определения координат.

При анализе данных по нескольким сильным магнитным бурям (2000–2004 гг.) установлено, что на ряде GPS-станций североамериканского региона и Восточной Сибири наблюдалось резкое возрастание ошибки позиционирования (до 120–280 м). Кроме того, для станций, расположенных на высоких ($\varphi>50°$) и низких ($\varphi<20°$) широтах, в среднем имеют место более высокие значения ошибок позиционирования, чем на умеренных широтах. Было обнаружено также, что области, в пределах которых наблюдаются повышенные значения ошибок позиционирования, перемещаются с течением времени.

В настоящее время ведется подготовка инновационного инвестиционного проекта, в плане которого — получение нового продукта: прогноза степени воздействия космических факторов на магистральные трубопроводы и большие электросистемы с учетом данных по гелиогеофизической активности, а в перспективе — с использованием результатов мониторинга под названием «Постоянный космический солнечно-магнитосферный патруль». Цель такого космического эксперимента с использованием созданной в ГОИ имени С.И. Вавилова новейшей оптико-электронной аппаратуры [33, 34] — осуществление (впервые) постоянного контроля за ионизирующим излучением Солнца и электронными высыпаниями из радиационных поясов Земли. В числе областей, где крайне необходимы данные «Постоянного космического солнечно-магнитосферного патруля» (особенно мониторинг роста ионизирующих потоков во время солнечных вспышек и в периоды геомагнитных бурь), не только прогноз аварийности на системах электросетей и трубопроводов, но также прогнозы в интересах радиосвязи, радиолокации и радионавигации, пилотируемой космонавтики, космической техники (включая страхование запусков космических аппаратов), глобальных погодных и климатических изменений [3], медицины (кризисные явления) [5].

Ионосферные токи на дневной стороне Земли определяются скоростью фотоионизации атмосферных газов под действием ионизирующего крайнего ультрафиолетового (КУФ) и мягкого рентгеновского излучения Солнца. Солнечные вспышки, наиболее сильные именно

в этой области спектра, практически полностью контролируют степень ионизации дневной среднеширотной верхней атмосферы. Главное, что вспышечная деятельность Солнца — это и основная причина начала примерно через двоетрое суток магнитных бурь на Земле, при этом от силы вспышки зависит и мощность геомагнитной бури. Однако до настоящего времени эта связь хорошо не изучена, т.к. в мире так и не создан постоянный мониторинг спектра и потоков коротковолнового (ионизирующего) солнечного излучения.

Мониторинг окружающей среды и соответствующие прогнозы ее состояния осуществляет Гидрометеорологическая служба России. В «Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областей на период до 2030 года» указан приоритетный проект «Развитие систем обработки данных и прогнозирования», где имеется направление «Методы, модели и технологии гелиогеофизических расчетов и прогнозов». Однако нет пока планов внедрения таких прогнозов в системы поддержки принятия решений в сфере генерации, передачи и сбыта электроэнергии, а также при эксплуатации магистральных трубопроводов в рамках задач «Энергетической стратегии России на период до 2020 года». Учитывая результаты представленного анализа роли космофизических факторов в техносферных авариях, назрела необходимость создания единого «Центра гелиогеофизических проблем и прогноза воздействий на окружающую среду и техносферу». К этому в наибольшей мере готова именно наука Санкт-Петербурга, учитывая те фундаментальные заделы, которые имеются в ВНЦ «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт Петербургском отделении Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, СПбГУ и СПбГПУ. Возможно совмещение этого Центра с планируемым Правительством РФ новым межведомственным «Центром климатических исследований» в Санкт-Петербурге. Административное решение данного предложения осуществимо в рамках Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. В рамках обеспечения глобальной энергетической безопасности следует использовать подписанный в конце 2009 года между Россией и Европейским Союзом Меморандум о механизме раннего предупреждения в сфере энергетики, включающий вопросы устойчивого функционирования технических систем поставок газа, нефти и электроэнергии.

Социальная опасность современного развития топливно-энергетического комплекса заключается, в том числе, в потенциальном ущербе вследствие отказов или аварий производственной и транспортной систем [35]. При оценках такого экономического и социального ущерба следует учитывать вклад воздействия на техносферу от космофизических факторов, который становится все более ощутимым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глухов, В.В.** Превентивный менеджмент в чрезвычайных ситуациях [Текст]: Монография / В.В. Глухов, В.Ю. Агатипов, К.А. Дубаренко.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.— 350 с.

2. **Добровольский, В.С.** Гражданская оборона и защита в чрезвычайных ситуациях на объектах экономики и социальной сферы [Текст]: Монография / В.С. Добровольский, К.А. Дубаренко.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012.

3. **Авакян, С.В.** Роль космических факторов в энергетической и экологической безопасности. Ч. 2: Вклад магнитных бурь в аварийность на больших электросетях и линиях связи [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Академия энергетики.— 2011, № 6 (44).— С. 32–35.

4. **Авакян, С.В.** Роль космических и ионосферных возмущений в глобальных климатических изменениях и коррозии трубопроводов [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Исслед. Земли из космоса.— 2011. № 3.— С. 14–29.

5. **Авакян, С.В.** Физика солнечно-земных связей: результаты, проблемы и новые подходы [Текст] / С.В. Авакян // Геомагнетизм и аэрономия.— 2008.— Т. 48. № 4.— С. 1–8.

6. **Авакян, С.В.** Ридберговское микроволновое излучение ионосферы при высыпаниях электронов из радиационных поясов, вызванных радиопередатчиками [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Оптический журнал.— 2008, № 10.— С. 95–97.

7. **Авакян, С.В.** Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве [Текст]: Справочник / С.В. Авакян, А.И. Вдовин,

В.Ф. Пустарнаков.— Л.: Гидрометеоиздат, 1994.— 501 с.

8. **Брюнелли, Б.Е.** Физика ионосферы [Текст] / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе.— М.: Наука, 1988.— 710 с.

9. **Авакян, С.В.** Влияние магнитных бурь в аварийность на магистральных газонефтепроводах [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Академия энергетики.— 2011, № 3 (41).— С. 78–82.

10. **Авакян, С.В.** Некоторые техносферные проявления гелиогеофизических возмущений [Текст] / С.В. Авакян, А.А. Намгаладзе // Вестник РАН.— 2012.— Т. 82, № 1.— С. 43–49.

11. **Pirjola, R.** Space Weather Risk [Текст] / R. Pirjola, K. Kauristie, H. Lappalainen [ety all.].— EUROEM'2004.— Magdeburg, Germany.— July 12–16, 2004.

12. **Авдюшин, С.И.** Рассказ о космической погоде [Текст] / С.И. Авдюшин, А.Д. Данилов // СПб.: Гидрометеоиздат, 1993.— 160 с.

13. **Gummow, R.A.** GIC effects on pipeline corrosion and corrosion-control systems [Текст] / R.A. Gummow, P. Eng // J. Atmos. Sol. Terr. Phys.— 2002. Vol. 64, № 16.— P. 1755–1764.

14. **Патент РФ № 2447425.** Способ уменьшения скорости коррозии металла стальной трубы трубопроводного транспорта [Текст] / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Бюллетень ФСИС «Изобретения и полезные модели».— № 10, 10 апреля 2012 г.

15. S.E.C. User Notes. 2000. №28. 7 p.

16. **Авакян, С.В.** Потоки электронов во время магнитной бури 14–15 декабря 1970 г. по данным ИСЗ «Космос-381» [Текст] / С.В. Авакян, М.П. Болгарцева, А.И. Ефремов [и др.] // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.— 1974. Вып. 32.— С. 158–161.

17. **Лазарев, А.И.** Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей [Текст] / А.И. Лазарев, В.В. Коваленок, С.В. Авакян.— Л.: Гидрометеоиздат, 1987.— 399 с.

18. **Кузнецов, В.Д.** Солнечно-земная физика и ее приложения [Текст] / В.Д. Кузнецов // УФН, 2012.— Т. 182, № 3.— С. 327–336.

19. **Осипов, В.И.** Безопасность электрических сетей России от гелиогеомагнитной опасности — необходимый элемент обеспечения энергетической и геоэкологической безопасности [Текст] / В.И. Осипов, Н.А. Махутов, А.Н. Данилин [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.— 2010. № 5.— С. 42–53.

20. **Boteler, D.H.** The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. Advances in Space Research [Текст] / D.H. Boteler, R.J. Pirjola, H. Nevanlinna // 1998. Vol. 22, Iss. 1.— P. 17–27.

21. **Баранник, М.Б.** Разработка систем мониторинга геоиндуктированных токов в магистральных линиях 330 кВ «Колэнерго» [Текст] / М.Б. Баранник, А.Н. Данилин, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов // Электромагнитная совместимость и перенапряжения в высоковольтных сетях / Под ред. В.Н. Селиванова.— Апатиты: Изд во КНЦ РАН, 2004.— С. 7–18.

22. **Чистяков, Г.Н.** Экспериментальное исследование тока в нейтрали трансформатора в период геомагнитных бурь [Текст] / Г.Н. Чистяков, С.Н. Сигаев // Известия Томского политехнического университета.— 2011. Т. 318, № 4.— С. 122–127.

23. **Бабаев, Э.С.** Исследование влияния космической погоды на системы электропередачи для средних широт [Текст] / Э.С. Бабаев, А.Б. Аскеров // Тезисы докладов VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околоземного космического пространства».— Байкальская школа по фундаментальной физике.— 2005.— С. 4–5.

24. **Mandea, M.** Asymmetric behavior of magnetic dip poles [Текст] / M. Mandea, E. Dormy // Earth, Planets and Space.— 2003.— Vol. 55, № 3.— P. 153–157.

25. **Ляхов, А.Н.** Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли [Текст] / А.Н. Ляхов, Ю.И. Зецер, Т. Фуллер-Роуелл // Доклады Академии наук.— 2006.— Т. 409, № 5.— С. 1–3.

26. **Ляхов, А.Н.** Влияние движения магнитных полюсов Земли на структуру и динамику ионосферы и термосферы [Текст] / А.Н. Ляхов, Ю.И. Зецер, Т. Фуллер-Рокелл // Лекции БШФФ-2007.— С. 50–55.

27. **Непомнящий, В.А.** Современные тарифы на электроэнергию и возможные пути их снижения [Текст] / В.А. Непомнящий // Академия энергетики.— №3 (41).— С. 6–18.

28. **Елисеева, О.А.** Территориальные сдвиги в добыче нефти и газа [Текст] / О.А. Елисеева // Академия энергетики.— №3 (41).— С. 20–27.

29. **Belov, A.V.** Effects of Strong Geomagnetic Storms on Northern Railways in Russia [Текст] / A.V. Belov, S.P. Gaidash, E.A. Eroshenko [и др.] // This paper appears in: Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology.— 2007 7th International Symposium, 26–29 June 2007.— P. 280–282.

30. **Eroshenko, E.A.** Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia [Текст] / E.A. Eroshenko, A.V. Belov, D. Botelerd [и др.] // Advances in Space Research.— 2010. Vol. 46, Iss. 9.— P. 1102–1110.

31. **Касинский, В.В.** Влияние геомагнитных возмущений на работу систем железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / В.В. Касинский, Н.Г. Птицына, Н.Н. Ляхов, М.И. Тясто, Дж. Виллорези // Геомагнетизм и аэрономия.— 2007.— Т. 47, № 5.— С. 714–718.

32. **Гамаюнов, И.Ф.** Пространственно-временная динамика ошибок позиционирования наземных приемников GPS во время возмущений околоземного космического пространства [Текст] / И.Ф. Гамаюнов,

В.В. Демьянов // Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околоземного космического пространства».— Байкальская школа фундаментальной физики-2005.— С. 63–65

33. **Avakyan, S.V.** Creating of the permanent Space Patrol of ionizing solar radiation [Текст] / S.V. Avakyan, E.P. Andreev, I.M. Afanas'ev [et all.] // In: «Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics».— USA.— Editors: S.L. Keil (NSO, USA) and S.V. Avakyan (SOI, Russia).— Proc. SPIE. 2002. Vol. 4853.— P. 600–611.

34. **Авакян, С.В.** Исследования в ГОИ рентгеновского и крайнего УФ излучения Солнца [Текст] / С.В. Авакян, И.М. Афанасьев, В.Г. Богданов [и др.] // Оптический журнал.— 2008. Т. 75, № 12.— С. 31–39.

35. **Окороков, В.Р.** Современные энергетические технологии и социально-экономические последствия их использования [Текст] / В.Р. Окороков, Р.В. Окороков // Академия Энергетики.— 2008. № 5 (25).— С. 16–24.

УДК 661.491.1

В.Б. Улыбин, С.В. Ефремов, О.В. Романцова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА

Пероксид водорода (ПВ) — один из важнейших химических продуктов, имеющих широкое промышленное применение в самых различных отраслях народного хозяйства и специальной техники. Больше всего продукт используется на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности для отбеливания целлюлозы и бумаги (до 56 %). Помимо этого, его используют в химической, текстильной, фармацевтической, кожевенной, металлургической промышленностях и специальной техники, в производстве электронной техники, а также в качестве дезинфицирующего и обезвреживающего средств (рис. 1). Только применение пероксида водорода с его уникальными свойствами сделало возможным внедрение в промышленность ряда новых прогрессивных процессов, характеризующихся высокой интенсивностью и безотходностью.

Спрос на пероксид водорода растет по разным данным от 2 до 10 % в год при текущих мировых мощностях около 3,7 млн т в год (в пересчете на 100 %-ную H_2O_2). Такой рост обеспечили три основных фактора:

применение пероксида водорода в производстве оксида пропилена (полупродукта для полиуретанов), которое растет быстрыми темпами;

ужесточение законодательства по охране окружающей среды, стимулирующее замену токсичных химических продуктов на экологически безопасный ПВ в большинстве отраслей его применения;

рост сектора электронной промышленности.

По всему миру функционирует около сотни крупных производств по получению данного продукта. В промышленных масштабах пероксид водорода получают электрохимическим, антрахинонным и изопропиловым методами. Выбор того или иного метода зависит от его уровня разработки в рассматриваемой стране, экономическими соображениями и требованиями к качеству получаемого продукта. Особые перспективы в научном плане имеет технология каталитического синтеза пероксида водорода из исходных элементов. Ее уникальность заключается в возможности осуществления процесса в одну стадию, что позволяет упростить произ-



Рис. 1. Применение пероксида водорода (данные ChemSystems, США 2008 г.)

водство, и в высокой степени чистоты получаемого продукта. Однако эта технология требует очень высоких энергетических затрат при сравнительно низком выходе пероксида водорода (в наиболее разработанном методе конечная концентрация продукта может быть доведена до 15масс. % H_2O_2) [1]. В связи с этим прямое получение пероксида водорода широкого распространения в производстве пока не получило, несмотря, как уже отмечалось, на очень высокое качество получаемого продукта и другие достоинства технологии. Сейчас во всем мире продолжаются многочисленные исследования в целях повышения экономической эффективности данного метода.

Вернемся к существующим промышленным способам получения пероксида водорода. Электрохимический способ является наиболее энергозатратным и в то же время дающим наиболее высокие показатели качества продукта. Потому этот метод, как правило, применяют в специальных целях для получения растворов пероксида водорода высокой степени чистоты.

Суммарная химическая реакция выглядит следующим образом:

$$2H_2O - 2e^- \xrightarrow{\text{к-р}} H_2O_2 + 2H^+. \qquad (1)$$

Для получения пероксида водорода электрохимическим методом гидролизу подвергают растворы серной кислоты (1), которая фактически является катализатором реакции. Эта реакция идет в несколько этапов через образование пероксодисерной (надсерной) кислоты и кислоты Каро (пероксомоносерной):

$$2H_2SO_4 - 2e^- \rightarrow H_2S_2O_8 + 2H^+; \qquad (2)$$

$$H_2S_2O_8 + H_2O \rightarrow H_2SO_5 + H_2SO_4; \qquad (3)$$

$$H_2SO_5 + H_2O \rightarrow H_2O_2 + H_2SO_4. \qquad (4)$$

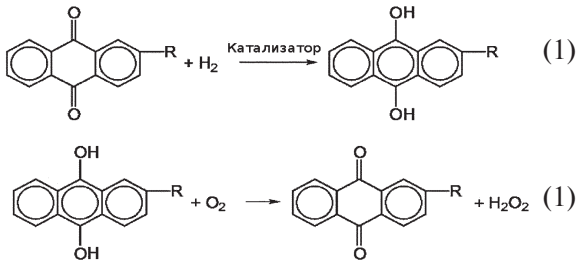
Гидролиз растворов пероксодисерной кислоты проводят при пониженном давлении — 10^4 Па, чтобы уменьшить потери H_2O_2 от разложения в растворах с повышенной температурой: на выходе из гидролизера 90–115 °С. Суммарный выход при гидролизе составляет 80–87 % [2].

Выделение пероксида водорода осуществляют путем дистилляции из его смеси с водой и серной кислотой.

Электрохимический метод получения пероксида водорода — очень энергоемкий. Затраты на электроэнергию составляют не менее 40 % себестоимости продукта. Специфическая особенность технологии электрохимического метода — отсутствие каких-либо органических примесей, что позволяет получать сорта пероксида водорода высокой степени чистоты в диапазоне концентраций от 30 до 98 %.

Антрахинонный метод в настоящее время наиболее распространен во всем мире. Согласно этому методу замещенные антрахиноны и/или тетрагидроантрахиноны, растворенные в смеси специально подобранных органических растворителей (в так называемом рабочем растворе), подвергают гидрированию водородом в присутствии катализатора, в качестве которого может выступать, например, палладиевая чернь, с образованием соответствующих гидроантрахинонов [3].

Соответственно реакции каталитического восстановления 2-алкилантрахинонов (4) и окисления 2-алкилгидроантрахинонов (5) выглядят так:



При гидрировании антрахинонов образуются побочные продукты, причем при температурах выше 60 °С и давлении более 0,4 МПа скорость их образования растет. Поэтому процесс ведут, как правило, при 35–55 °С и 0,3 МПа [2].

Полученные гидроантрахиноны окисляют кислородом обратно в антрахиноны с одновременным образованием пероксида водорода. Технологические параметры процесса имеют следующие величины: температура 35–75 °С, давление 0,1–0,5 МПа [2]. Антрахиноны возвращают с рабочим раствором на стадию гидрирования, завершая тем самым технологический цикл.

Технологический цикл включает шесть основных стадии: гидрирование рабочего раствора, его фильтрацию, последующее окисление, экстракцию пероксида водорода, регенерацию рабочего раствора и очистку водного раствора

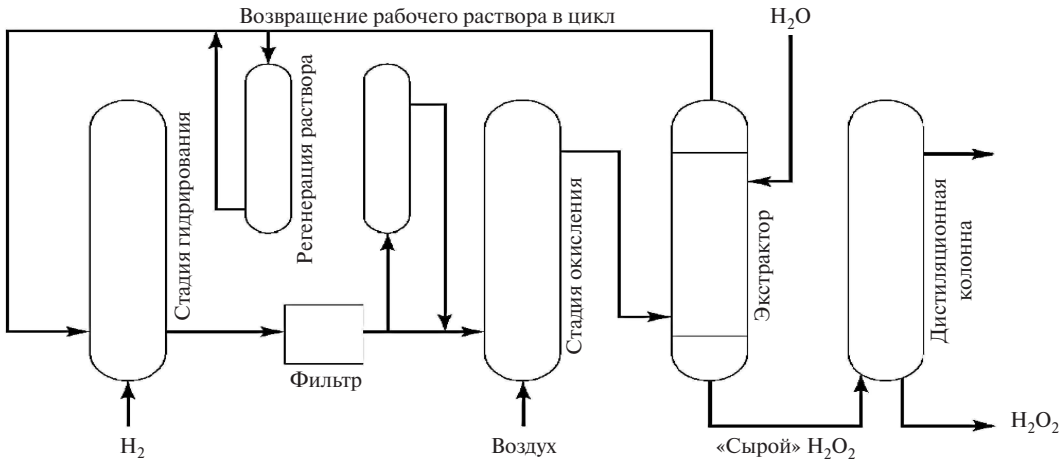


Рис. 2. Принципиальная схема процесса получения пероксида водорода антрахинонным методом

пероксида водорода (рис. 2) [3]. Помимо этого, в состав производства также входят вспомогательные узлы (процесс включает 13 рабочих узлов). Это создает сложную задачу технологического оснащения процесса.

Образующийся на стадии окисления пероксид водорода экстрагируют водой, получая водные растворы, содержащие до 20–45 масс. % пероксида водорода, которые подвергают очистке и выпускают в виде товарного продукта с массовой долей пероксида водорода 20–50 % или осуществляют его концентрирование. Обычно средняя удельная производительность реакционного объема аппарата окисления (в пересчете на 100 %-ный пероксид водорода) составляет 15 кг/(м^3·час) [2].

На стадиях гидрирования и окисления неизбежно образование некоторых побочных продуктов, которые плохо подвергаются регенерации, а потому требуют утилизации. Основное вещество (антрахинон) после стадии регенерации вновь возвращается в рабочий цикл.

Описанный технологический процесс присущ всем вариантам практического осуществления антрахинонного метода производства пероксида водорода. Все существенные различия заключаются в аппаратурном оформлении, применяемых катализаторах гидрирования и композициях растворителей для рабочего раствора.

Основные недостатки этого процесса — трудно утилизируемые отходы, высокая взрывоопасность процесса и невысокая рентабельность при мелкомасштабном производстве.

Разработанная в РФ технология производства пероксида водорода основана на использовании реакции жидкофазного окисления изопропилового спирта кислородом воздуха (изопропиловый метод). Технологическая схема включает три главных стадии: стадию окисления спирта и две стадии ректификации для разделения реакционной смеси; на первой из них происходит выделение пероксида водорода в виде его водного раствора (может содержать от 27,5 до 50 масс. % H_2O_2). Часто в технологическую схему вводится еще один технологический узел — узел гидрирования ацетона. Таким путем схема производства замыкается (рис. 3): исходный спирт — его окисление — разделение конечных продуктов — гидрирование ацетона — окисление спирта.

Технологический процесс получения пероксида водорода изопропиловым методом начинается с подготовки основного сырья — изопропилового спирта (ИПС). С целью отделения тяжелокипящих примесей в техническом продукте проводят дистилляцию спирта на колонне *3*.

Процесс окисления спирта осуществляют в системе, состоящей из реактора-окислителя *7* и соответствующей теплообменной аппаратуры: подогревателей спирта и воздуха, конденсаторов, холодильников. Процесс ведут под давлением 1,1 МПа и при температуре 105–150 °С в реакторе-окислителе колонного типа с барбо-

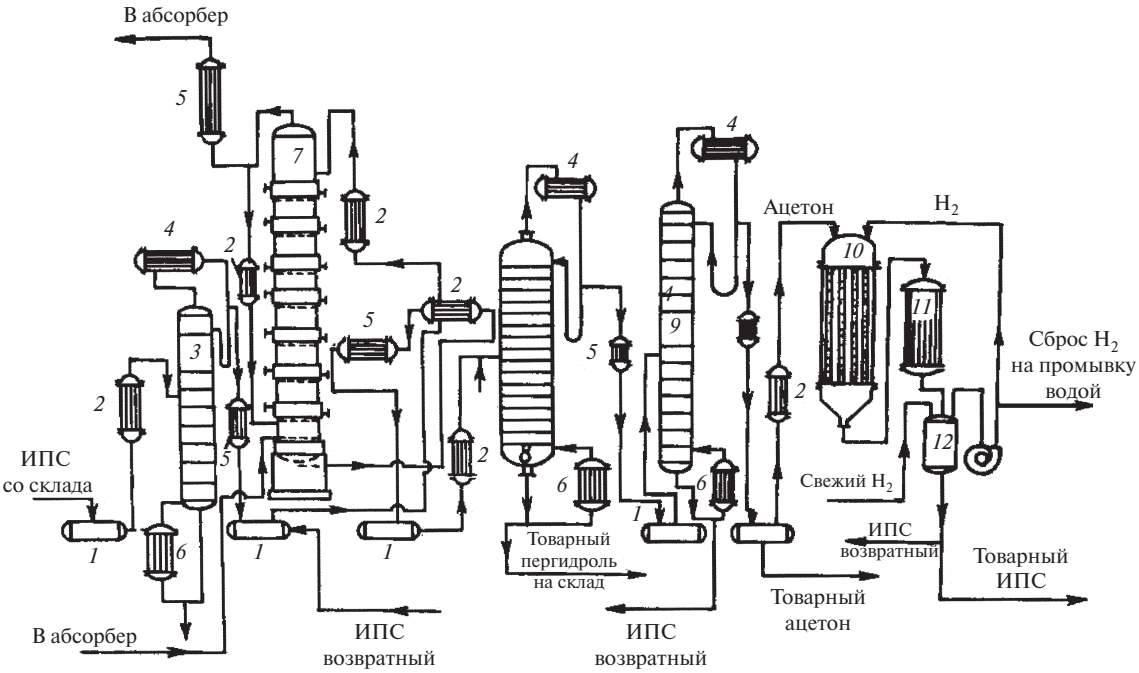


Рис. 3. Технологическая схема производства пероксида водорода изопропиловым методом:
1 — емкости; *2* — подогреватели; *3* — колонна подготовки спирта; *4* — дефлегматоров; *5* — холодильники; *6* — кипятильники; *7* — реактор окисления спирта (реактор-окислитель); *8* — ректификационная колонна для выделения пероксида водорода; *9* — ректификационная колонна для выделения ацетона; *10* — раствор гидрирования ацетона; *11* — конденсатор; *12* — фазоразделитель

тером, разделенным внутри на восемь секций барботажными колпачковыми тарелками. С помощью колпачков осуществляется эффективное диспергирование газа в жидкой реакционной смеси в каждой секции. На этой стадии происходит окисление ИПС до пероксида водорода и ацетона:

$$CH_3CHOHCH_3 + O_2 \rightarrow H_2O_2 + $$
$$+ CH_3COCH_3 + 115{,}225 \text{ кДж/моль}. \quad (6)$$

Пероксид водорода выделяют из реакционных смесей в ректификационной колонне *8*. Процесс осуществляют под вакуумом (остаточное давление 24–35 кПа) при температуре в кубе колонны до 88 °С. Температура верха колонны, куда уходят пары ИПС, ацетона, воды, в зависимости от применяемого давления и состава паров может колебаться в пределах 55–60 °С.

Процесс гидрирования ацетона осуществляется в системе с рециклом водорода в трубчатом контактом аппарате *10*. Пары ацетона и водорода поступают в аппарат сверху и при прохождении через слой катализатора взаимодействуют по уравнению

$$CH_3COCH_3 + H_2 \xrightarrow{\text{к-р}} CH_3CHOHCH_3. \quad (7)$$

Парогазовая смесь, прошедшая катализатор и состоящая после завершения реакции гидрирования из водорода и ИПС с примесью ацетона (массовая доля до 3 %), проходит конденсационную систему *11*, фазоразделитель *12*, после чего сконденсированный спирт возвращается в систему окисления, а водород остается в рецикле, куда через фазоразделитель вводят свежий водород на восполнение затраченного. Данная стадия замыкает технологический процесс, позволяя достигать безотходного производства.

В связи с неуклонным ростом спроса на пероксид водорода происходит наращивание производственных мощностей уже существующих заводов и возникает потребность в строительстве новых предприятий. Выбор метода, кото-

Сравнительная характеристика промышленных методов получения пероксида водорода

Метод получения пероксида водорода	Показатели (характеристики)											
	Используемые вещества			Технологические процессы						Конечный продукт			
	Токсичность (класс опасности)	Пожаровзрывоопасность	Содержание O_2 на стадии окисления	Гидролиз		Окисление		идрирование		Качество и марка пероксида водорода	Основные примеси	Отношение стоимостей конечного и исходного продуктов	Наличие отходов
				Температура, °С	Давление, 10^5 Па	Температура, °С	Давление, 10^5 Па	Температура, °С	Давление, 10^5 Па				
Электрохимический	–	–	–	90–115	1	–	–	–	–	Высокая чистота всех марок	Серная кислота	Высокая	–
Антрахинонный	3 класс	ГЖ	до J %	–	–	35–37	1–5	35–55	3	Техническая чистота всех марок	Органич. соединения	Средняя	Жидкие и твердые
Изопропиловый	2 класс	ЛВЖ	до 38 %	–	–	105–155	9–11	70–130	2–3	Техническая чистота всех марок	Органич. соединения	Низкая	Отсутствуют

Природопользование

рый войдет в основу производства пероксида водорода на новом предприятии, зависит от ряда факторов, таких, как разработанность метода, себестоимость продукта, требуемое качество и безопасность производства.

Из существующих четырех способов получения пероксида водорода (электрохимический, антрахинонный, изопропиловый и высокотемпературное окисление водорода в кислороде) только первые три используются в промышленных масштабах. Первая технология обеспечивает наиболее качественный продукт, но с очень высоким энергопотреблением. Поэтому ее используют только для получения высококонцентрированного продукта, преимущественно в специальной технике (см. табл.).

Качество продукта, получаемого по двум другим технологиям, примерно одно и то же, также как и его себестоимость. При этом антрахинонный метод получил преимущественное распространение в большинстве стран мира, а в нашей стране более распространен изопропиловый способ.

По первой технологии наблюдаются большее количество отходов, они более токсичны, а по второй — токсичные отходы можно свести практически к нулю, особенно если применить технологию по замкнутому циклу. В то же время вторая технология существенно более пожаровзрывоопасна, так как в ней в качестве рабочих жидкостей используются смеси жидкого окислителя (пероксида водорода) с легковоспламеняющимися жидкостями — ИПС, ацетоном (в то время как в первой технологии — смеси того же окислителя с горючими жидкостями растворителями). При этом в процессе окисления образуются органические пероксиды (которые, как известно, относятся к классу инициирующих взрывчатых веществ), и их число может возрастать при отклонении технологического процесса от регламентного режима. На стадии выделения пероксида водорода из реакционного раствора они полностью разлагаются.

Из вышесказанного следует, что вопросу обеспечения пожаровзрывобезопасности при получении пероксида водорода методом жидкофазного окисления спиртов должно быть уделено самое пристальное внимание как на стадиях его получения и выделения из рабочей смеси, так и при его концентрировании, поскольку пероксид водорода является лабильным продуктом и в присутствии ионов тяжелых металлов может спонтанно распадаться на кислород и воду со взрывом. Для повышения экологической безопасности и снижения себестоимости продукта технологический процесс осуществляют по замкнутому циклу, т. е. вводят дополнительный узел — узел гидрирования. Однако работа с водородом, особенно при высоких значениях давления и температуры, представляет повышенную опасность. Таким образом, широкомасштабное внедрение изопропиловой технологии, которая, на наш взгляд, в настоящее время наиболее перспективна в РФ, с точки зрения безопасности представляет собой серьезную задачу, требующую самого тщательного исследования.

В заключении считаем необходимым выразить благодарность Т.А. Нагнибеде и В.И. Островскому за активное содействие и помощь в рассмотрении изучаемых вопросов и предоставление материалов по действующим производствам пероксида водорода в нашей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артемов, А.В.** Каталитический синтез пероксида водорода из элементов. Часть II [Текст] / А.В. Артемов, Е.Г. Ипполитов, Т.А. Трипольская, И.В. Похабова [Электр. ресурс]— Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН // http://www.textileclub.ru/index.php?option = articles&task = viewarticle&artid = 87&Itemid = 3

2. **Серышев, Г.А.** Химия и технология перекиси водорода [Текст] / Г.А. Серышев.— Л.: Химия, 1984.— С. 200

3. **Wayne, T. Hess.** Hydrogen Peroxide [Текст] / T. Hess Wayne // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Hellium group to hypnotics, sedatives, anticonvulsants, and anxiolytics.— New York: John Wiley & Sons, Inc.— 1994, Vol. 13, Is. 4— P. 470–498

УДК 621.039.586

В.И. Гуменюк, М.Н. Тихонов, М.Е. Федосовский

ПОСТФУКУСИМСКИЙ СИНДРОМ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Природа не признает шуток,
она всегда серьезна, строга и права;
ошибки и заблуждения исходят от людей.

И.-В.Гете

Над природой не властвуют,
если ей не подчиняются

Френсис Бекон

Ядерная энергетика Японии

Япония — густонаселенная островная страна, в которой на 372 тыс. км^2 проживают почти 117 млн человек, из них 75 % — в городах, высокоразвитое государство по объему ВНП, занимающее второе место в капиталистическом мире.

Ядерная энергетика в Японии стала приоритетной с 1973 года. В 2010 году в стране эксплуатировалось 54 блока атомных станций электрической мощностью 46823 МВт, строились еще 2 блока мощностью 2650 МВт, всего планировалось построить 14 блоков. За счет действующих станций покрывалось 30 % энергетических потребностей. По установленной мощности Япония занимала третье место после США (104 реактора) и Франции (58) в ядерной мировой энергетике. К 2017 году планировалось довести уровень ядерной энергетики в стране до 40 %, к 2030 году — до 50 % и обеспечить замкнутый ядерный цикл.

По плотности размещения АЭС (в кВт на 1 км^2) Япония (86,1) занимает пятое место после Бельгии — 194,1, Южной Кореи — 188,5, Тайваня — 138,3 и Франции — 116,0.

В трех северных префектурах — Мияги, Фукусима, Ибараки — находится 14 ядерных энергоблоков. В результате мартовского землетрясения 2011 года 11 блоков были остановлены автоматически. Все ректоры на северо-востоке Японии относятся к типу кипящих водо-водяных реакторов BWR (вторая по распространенности конструкция ядерных ректоров в мире).

Атомная электростанция «Фукусима-1» входила в число 25 крупнейших АЭС мира (6 энергоблоков мощностью 4,7 ГВт). Это первая АЭС, построенная и эксплуатирующаяся японской компанией ТЕРСО. В 11,5 км южнее расположена АЭС «Фукусима-2», также находящаяся в эксплуатации этой компании.

Реакторные установки для I, II и VI энергоблоков были сооружены американской корпорацией General Electric, для III и V — Toshiba, для IV — Hitachi. Все шесть реакторов спроектированы корпорацией General Electric. Архитектурное проектирование энергоблоков выполняла компания Ebasco. Строительные конструкции возводила японская фирма Kajima.

26 марта 2011 года I блоку «Фукусимы-1» исполнилось 40 лет. За месяц до аварии было получено разрешение на продление лицензии на его эксплуатацию.

Природные предпосылки катастрофы

Регион Тихого океана характеризуется повышенной энергонасыщенностью. Над поверхностью Тихого океана находится атмосферная область с высокой электропроводностью между ионосферой и поверхностью воды. Вулканическая деятельность наиболее активна по периферии океана. Землетрясения в Японии происходят довольно часто, эта страна расположена на двух тектонических плитах — Азиатской и Тихоокеанской, которые «трутся» друг о друга. По мнению сторонников теории дрейфа материков, в этом месте литосферные плиты подходят одна под другую, являясь основной причиной сейсмодинамики этого региона. За последнее столетие Япония пережила сотни сильнейших толчков. Очаги землетрясений за-

легают на глубине 10–30 и даже 100 км, причем глубинные разломы, по которым действуют вулканы, направлены под углом к земной коре, уходя в сторону материка. Вдоль восточного склона острова Хонсю тянется Японский желоб протяженностью 1000 км и глубиной до 8412 м.

За подводными толчками очень часто следует цунами — от эпицентра расходятся гигантские волны, скорость которых может достигать 1000 км/ч. Вблизи побережья скорость волны снижается до 500 км/ч, ее высота растет, а сила становится еще более разрушительной. На сей раз высота волн цунами составила 23 м. По мнению специалистов, нынешнее землетрясение на северо-востоке Японии по мощности превосходит самые крупные землетрясения в 1923 и 1995 годах.

Воздействие стихии ощутили на себе и российские территории, в частности Южные Курилы и Сахалин. Вблизи острова Шикотан волны вздымались на высоту до трех метров, возле Итурупа — до двух метров. Стоявшие в портах корабли отправили в открытое море, жителям предписали покинуть район побережья. После оповещения МЧС 11 тысяч человек покинули опасную зону. Серьезных разрушений в этом районе не было, но специалисты призывают не расслабляться, цунами обладает эффектом афтершока — остаточных толчков, которые могут докатиться до наших территорий спустя несколько месяцев. По словам ученых, на Камчатке могут происходить землетрясения магнитудой до 7 баллов. Вероятность этого на сегодняшний день составляет 30 %.

Авария на АЭС «Фукусима-1» продемонстрировала, насколько высока вероятность реализации самого мрачного сценария в ядерной энергетике. Атомная станция подверглась практически одновременному воздействию двух природных факторов: рекордного по мощности землетрясения (магнитудой 8,9 баллов по шкале Рихтера) и рекордной по высоте волны цунами. Эпицентр землетрясения находился в океане в 70 км от острова Хонсю на глубине 24 км в 80 км восточнее территории, где расположена АЭС «Онагава», и в 150 км северо-восточнее от обеих АЭС «Фукусима-1, 2». Волна цунами превысила высоту 7 м.

Землетрясение и цунами вызвали пожары в шести префектурах, в том числе на крупнейших нефтеперерабатывающих заводах Сендай и Итихара. Были полностью разрушены ряд автострад, железнодорожные пути, закрылись морские порты, затоплено 4 больших города. Сендайский аэропорт был смыт водой. Пять аэропортов, в том числе в Токио и Саппоро, прекратили работу. Более миллиона домов лишились водоснабжения и электропитания. Число погибших в 12 префектурах Японии составило 15467 человек, 7482 — числятся пропавшими без вести, ранены 5388 человек. Экономический ущерб от цунами превысил 300 млрд долл.

Хронология событий на АЭС «Фукусима-1»

11 марта в 14:46 у побережья острова Хонсю на глубине 24 км произошло 9-балльное землетрясение. Из-за подземных толчков автоматически останавливаются I, II и III энергоблоки «Фукусимы-1», а IV, V и VI энергоблоки не работали из-за прохождения планового технического обслуживания. Топливо из IV реактора было изъято в ноябре 2010 г. Подземные толчки спровоцировали отключение атомной станции от японской электросети, но подключились резервные дизельные генераторы, которые продолжили охлаждение. Оператор станции — Токийская электроэнергетическая компания (TEPCO) — уведомила соответствующих должностных лиц о происшедшем событии на АЭС.

В 15:27 первая волна цунами ударила по атомной электростанции. Поврежден аварийный конденсатор I энергоблока, предназначенный для охлаждения пара внутри резервуара под давлением. В 15:46 14-тиметровая волна цунами превысила заграждающую дамбу, затопив сооружения АЭС «Фукусима-1», вывела из строя резервные дизельные генераторы, кроме одного, расположенного под землей, и смыла топливные баки. Генераторы предназначались для аварийного расхолаживания реакторов. Система начала использовать паровые насосы с батарейным питанием клапанов. В 18:00 уровень воды в первом реакторе понизился до вершин топливных стержней. В 19:03 премьер-министр Наото Кан объявляет 4-й аварийный ядерный статус по Международной шкале ядерных событий INES (авария с локальными последствиями).

В 19:30 топливные стержни I реактора полностью показываются над поверхностью воды.

В 21:00 правительство Японии издает распоряжение об эвакуации людей в радиусе 3 км вокруг АЭС «Фукусима-1».

Продолжительная недостача электричества на Фукусиме Даичи истощает батареи резервных модулей постоянного тока, которые неспособны длительно поддерживать работу систем, поврежденных во время катастрофы. Давление в ядерных реакторах возрастает из-за снижения уровня теплоносителя. TEPCO объявила, что уровень давления в I реакторе вдвое превышает нормальный.

Пар отводился и конденсировался в тороидальном бассейне, в нижней части реакторного помещения. Когда несколько метров воды над активной зоной испарились (в I блоке это произошло через 8 часов), ТВЭЛы начали обнажаться и перегреваться. При температуре 1200 °C водяной пар вступил в реакцию с циркониевыми оболочками ТВЭЛов. Скорость этой экзотермической реакции зависит не только от температуры, но и от давления пара. Давление в контайнменте и тороидальном конденсаторе быстро росло.

Руководство TEPCO оказалось перед выбором: сбросить давление для уменьшения угрозы взрыва или ждать, когда расплавится активная зона. Слабым местом оказался тор, он взорвался. Водород попал в помещение реакторного блока. Первая искра привела к взрыву гремучей смеси. Этого можно было избежать, если бы руководство станции своевременно приняло решение о подаче в реакторы морской воды. Но морская вода делала реакторы непригодными для дальнейшей эксплуатации. Из-за интересов коммерции решение об использовании морской воды на тот момент было отложено.

Закачка свежей воды в I реактор началась в 05:50 12 марта. В 06:50 ядро I реактора расплавилось и ушло на дно корпуса реактора (в тот момент это было неизвестно). В 10:09 небольшое количество пара было сброшено в атмосферу для снижения давления в реакторе I блока «Фукусимы-1». Снижение давления было необходимо также для того, чтобы позволить пожарным закачать морскую воду непосредственно в реактор. В 20:00 в реактор I блока начинается закачка морской воды непосредственно в гермооболочку реактора с помощью пожарных машин. Давление во II реакторе «Фукусима-1» остается высоким. Для его снижения принимается решение еще раз сбросить радиоактивный пар в атмосферу. В 14:50 закачка воды в I реактор останавливается.

12 марта TEPCO признала отказы систем расхолаживания трех из четырех блоков АЭС. В 02:40 батареи резервного питания компенсатора давления III реактора вышли из строя. В 04:15 обнажились топливные стержни III реактора. В 05:30, несмотря на высокий риск воспламенения водорода вследствие реакции с кислородом, принимается решение сбросить пар, содержащий небольшое количество радиоактивных материалов, в гермооболочку, чтобы ослабить давление внутри I реактора «Фукусимы-1».

Из-за отсутствия охлаждения температура в активной зоне ректоров превысила 1800 °C. В результате термической диссоциации оставшаяся в активной зоне вода стала разлагаться на кислород и водород. По достижении предельного давления газов и взрывоопасной концентрации водородно-кислородной смеси произошел взрыв, вызвавший разрушение конструкций, включая оболочку и защитный корпус III реактора. Вследствие этого произошел выброс в атмосферу радиоактивных нуклидов и значительное тепловое, газовое и химическое загрязнение окружающей среды.

Интенсивное тепловое загрязнение привело к возникновению высокотемпературных пожаров. Дальнейшее выделение тепловой энергии в активной зоне реакторов при отсутствии отвода тепла привело к расплаву ТВЭЛов и образованию кориума, который под действием высоких температур начал испаряться. Топливные стержни I блока стали видны над водой через 4 ч после аварийного отключения станции и полностью расплавились через 16 ч. На расплавление ТВЭЛов блоков понадобилось 60 ч, на расплавление ректора — 100 ч.

В 15:30 объявляется эвакуация жителей трехкилометровой зоны в радиусе станции «Фукусима-2», а также жителей десятикилометровой зоны вокруг АЭС «Фукусима-1». В 15:36 происходит мощный взрыв водорода во внешней оболочке I блока, что приводит к ее разрушению. Ранено четверо рабочих.

В 21:40 зона эвакуации вокруг «Фукусимы-1» расширяется до радиуса 20 км, вокруг «Фукусимы-2» — до 10 км.

13 марта объявлено о возможном частичном расплавлении III реактора. К 13:00 в I и III реакторах снижено давление и они заново заполнены водой и борной кислотой для охлаждения и сдерживания ядерных реакций. Началась массовая эвакуация населения из 20-тикилометровой зоны вокруг «Фукусимы-1» (эвакуировано около 170 тыс. человек) и 10-тикилометровой зоны вокруг «Фукусимы-2» (около 30 тыс. человек).

14 марта взорвалось здание III энергоблока, ранено 11 человек. Реактор и его защитная оболочка не повреждены. Взрыв нарушил водоснабжение второго блока. II реактор содержал воды меньше нормального уровня (считалось, что он стабилен, несмотря на то, что давление внутри реактора было высоким). По заявлениям TEPCO, выбросов радиоактивных веществ не произошло, кроме того, что было выброшено при сбросе пара. Но взрыв повредил временные охлаждающие системы, возникли проблемы с вентиляционными системами, в результате чего II реактор оказался в самом тяжелом состоянии. Взрыв в компенсаторе давления 15 марта вызвал повреждение оболочки II блока. В IV энергоблоке вспыхнул пожар, затронувший отработавшие топливные стержни. Уровень радиации на станции значительно возрос. Радиационная эквивалентная доза в помещении в непосредственной близости от III энергоблока составила 400 мЗв/ч.

16 марта в 14–30 TEPCO объявила, что вода в хранилище топливных стержней IV энергоблока может закипеть, увеличивая вероятность достижения критического уровня уязвимости топливных стержней. Над станцией «Фукусима-1» появился белый дым, предположительно исходящий от III энергоблока. Из-за опасно возросшего уровня радиации (до 1 Зв/ч) TEPCO приостановила работы на станции и эвакуировала персонал. В V и VI энергоблоки стали заливать воду.

17 марта вертолеты гражданской обороны четырежды сбрасывали воду на реакторы III и IV энергоблоков. Во второй половине дня было объявлено, что IV реактор заполнен водой и ни один из топливных стержней не остается открытым. Начаты восстановительные работы внешнего электрического снабжения всех шести энергоблоков «Фукусимы-1». Для тушения пожаров и охлаждения поврежденных реакторов ликвидаторы использовали уцелевшие стационарные средства, переносные приспособления, плавсредства и летательные аппараты, способные подавать к очагу аварии морскую воду. Но их производительность была недостаточной для устранения интенсивного тепловыделения в поврежденных реакторах.

С 19 ч полицейские и пожарные при помощи пожарных рукавов с высоким давлением воды пытались распылить воду над III энергоблоком. Вода подавалась в верхнюю часть разрушенного защитного корпуса реактора, попадала в зону высоких температур не на источник теплового выделения и мгновенно превращалась в пар, разлагавшийся на кислород и водород, который приводил к новым взрывам. Для распыления воды непосредственно в реакторы президент компании Chio Construction предложил использовать два установленных на грузовиках бетононасоса.

Разрушение зданий I, III и IV блоков сыграло и положительную роль: улучшилось охлаждение контайнментов реакторов, а значит, и самих реакторов. Съемка тепловизором показала, что температура крышного покрытия II блока, здание которого было слабо повреждено, поднималась выше 150 °С. Можно представить, какой была температура в самом здании и, тем более, внутри реактора. Такая же картина характерна для блоков I и III.

18 марта токийский пожарный департамент направил тридцать пожарных машин со 139-ю пожарными и командой спасателей, включая пожарный грузовик с 22-х метровым водонапорным насосом для распыления охлаждающей воды. 19 марта их сменила команда из 100 токийских и 53 осакских пожарных. Вода распылялась в течение 7 ч, что позволило снизить температуру на III блоке до 100 °С, а уровень радиации понизить с 351,4 до 265 мЗв/ч. Высокий уровень радиации (150 мЗв/ч) был обнаружен и на расстоянии тридцати километров на северо-запад от станции «Фукусима-1». Японские власти присвоили ситуации уровень «5». Потеря охлаждения активной зоны IV энергоблока была классифицирована как уровень «3». Компания TEPCO сообщила, что все четыре энергоблока «Фукусимы-1» перешли в режим «холодного останова», т. е. температура охладителя в них стала ниже 100 °С, и все системы

охлаждения полностью работоспособны. Налажена их стабильная работа.

20 марта ко II энергоблоку было подключено внешнее электричество, продолжились работы по восстановлению оборудования. Отремонтированные дизельные генераторы VI энергоблока позволили запустить охлаждение V и VI энергоблоков, что снизило температуру воды в их бассейнах до нормальной. Генеральный секретарь японского кабинета министров Эдано объявил, что ядерный комплекс «Фукусима-1» будет закрыт, как только минует кризис.

В 15:55 21 марта над III энергоблоком появился серый дым. Работы по восстановлению энергоснабжения приостановились из-за вероятного возникновения пожара. В 18:22 белый дым, сопровождавшийся временным повышением уровня радиации, был замечен над II энергоблоком. 21 марта было сделано заявление TEPCO, что с восстановлением энергоснабжения кризис не закончится, так как поврежденные системы охлаждения ремонту не подлежат, их нужно менять. 22 марта дым над II и III энергоблоком сохраняется. Возобновились ремонтные работы, так как повышения уровня радиации нет. Продолжилась закачка морской воды в I, II и III энергоблоки. Ко всем шести энергоблокам подведены кабели резервного энергоснабжения.

Из-за черно-серого дыма, вновь появившегося над III реактором 23 марта, сотрудников снова эвакуировали. Внутри поврежденного здания реактора возник небольшой пожар. За счет восстановленной системы водоснабжения I энергоблока увеличено количество воды внутри реактора. В токийской питьевой воде выявлен уровень радиации, вдвое превышающий норму.

К 24 марта уровень радиации вблизи станции снизился до 200 мЗв/ч. Трое рабочих подверглись радиоактивному облучению из-за просочившейся в защитные костюмы радиоактивной воды, двоим понадобилась срочная госпитализация. Инфракрасное обследование зданий реакторов показало, что температура I, II, III и IV энергоблоков снизилась до 11–17 °С, температура в контуре реактора — 30 °С.

25 марта в турбинах I и II энергоблоков была также обнаружена радиоактивная вода. По-видимому, в гермооболочке реактора появилась пробоина. Содержание йода-131 в морской воде составило 50 Бк/мл, что в 1250 раз превышало норму. 26 марта уровень радиации около станции еще высок — 170 мЗв/ч. Появилась возможность заполнения реакторов до необходимого уровня пресной водой, доставленной на двух баржах ВМС США, вместо морской. 27 марта уровень радиационного загрязнения воды на II и III энергоблоках был выше соответственно 1000 мЗв/ч и 750 мЗв/ч. Технические работы по восстановлению системы охлаждения поврежденных энергоблоков отложены. Видеозапись вертолетами сил гражданской обороны позволила получить более точную картину повреждений:

белый дым-пар над зданиями II, III и IV энергоблоков;

крыша здания II энергоблока сильно повреждена, но еще цела;

на здании III энергоблока отсутствует крыша, разрушенная взрывом водорода, произошедшего через две недели после катастрофы;

стены здания IV энергоблока также разрушены.

28 марта, по-видимому, радиоактивная субстанция из расплавленных топливных стержней II энергоблока попала в воду, используемую для охлаждения, которая просочилась в подвал здания, где расположены турбины II энергоблока. Количество закачиваемой воды во II энергоблок было уменьшено с 16 до 7 т, что могло вызвать повышение температуры реактора. Из-за высокорадиоактивной воды приостановлены работы по восстановлению насосов охлаждения и других мощностей с I по IV энергоблок. Небольшое количество плутония обнаружено в пяти образцах, найденных с 21 по 22 марта в двух местах на станции: в области твердых отходов и в поле.

29 марта продолжилось распыление воды над I–III реакторами. Радиоактивная вода начала поступать в каналы технического назначения за пределами зданий трех энергоблоков. Это не позволяло продолжить восстановление охлаждающих и других автоматизированных систем.

30 марта Председатель Совета директоров TEPCO Ц. Катсумата объявил на пресс-конференции, что не ясно, как могли бы быть решены проблемы на станции. Безотлагательными проблемами стало удаление радиоактивной воды из подвалов зданий и удаление из реакторов

соли, образовавшейся из-за использования морской воды.

31 марта выкачана радиоактивная вода из канала технического назначения около I реактора в спецёмкость рядом с IV реактором. Вода из конденсаторов II и III энергоблоков выкачана во внешние резервуары. Самый большой в мире бетононасос направлен в Фукусиму из США. 62-метровый насос пожертвовал китайский производитель SANY.

2 апреля обнаружено, что через 20-тисантиметровую трещину в бетонном канале для кабеля энергоснабжения насосов, соединяющем море и II энергоблок, загрязненная вода со II энергоблока сливается в море.

3 апреля, несмотря на введение водопоглощающей смеси из полимеров, опилок и измельченной бумаги, утечка радиоактивной воды в море продолжается. Уровень радиационного загрязнения воды составлял 1 Зв/ч.

4 апреля TEPCO начала сбрасывать низкорадиоактивную воду в Тихий океан. Это позволило использовать станционное хранилище РАО для хранения более опасной радиоактивной воды. Планировалось слить 11 500 т радиоактивной воды в море.

6 апреля МАГАТЭ настояло на введении в отверстие силиката натрия (жидкое стекло) для предотвращения утечки радиоактивной воды.

7 апреля в 01:31 начат ввод азота в гермооболочку I реактора для того, чтобы разбавить накопленный водород и исключить атмосферный кислород для предотвращения взрыва.

Повторились толчки силой до 7,4 баллов. Большинство рабочих были эвакуированы со станции. Новых повреждений после землетрясения нет, но температура I реактора увеличилась и сопровождалась выбросом радионуклидов (100 Зв/ч) в колодец. Приборы показывали рост давления в реакторе.

9 апреля Япония все еще борется за сохранение воды в реакторах для их охлаждения, чтобы предотвратить дальнейшее расплавление ядерных топливных элементов. TEPCO приобрела два 95-тонных автобетононасоса, доставленных из России самолетами АН-124. Ими можно управлять дистанционно на расстоянии 2 миль, и воду можно направлять непосредственно в поврежденные реакторы.

11 апреля прервана подача охлаждающей жидкости в I и III энергоблоки из-за потери энергоснабжения вследствие землетрясения.

12 апреля Япония официально повысила уровень аварии до 7-го по Международной шкале ядерных событий (аналогично аварии на Чернобыльской АЭС). Вследствие взрыва водорода на I энергоблоке 12 марта и выбросов с III энергоблока сумма выбросов радиоактивного йода достигла 190000 трлн Бк.

Во время чернобыльской аварии в атмосферу было выброшено в 10 раз больше радиоактивных нуклидов, чем при аварии на «Фукусиме-1» до 12 апреля. Общее количество радиоактивных материалов, хранящихся на «Фукусиме», в 8 раз больше, чем хранилось в Чернобыле. Выбросы на «Фукусиме» продолжались. После приостановки действий по охлаждению бассейна выдержки IV блока (из-за ложного предупреждения о наполненности бассейна) температура воды в бассейне выросла да 90 °C. Уровень радиации от поверхности бассейна достиг 84 мЗв/ч.

Шестая неделя: в I, II, III реакторах ТВЭЛы расплавились, топливо ушло в нижние секции реакторов. Предполагалось, что топливо равномерно рассредоточилось по нижним частям реакторов, что делало «маловероятным» дальнейшее возобновление процесса деления.

18 апреля два робота вошли в I и III энергоблоки «Фукусимы-1» и измерили температуру, давление и уровень излучения (49 мЗв/ч в I энергоблоке и 57 мЗв/ч внутри III энергоблока). Роботы также вошли в здание II энергоблока, однако высокая влажность (более 90 %) внутри здания препятствовала обследованию (объектив камеры запотел).

Проводятся пробные распыления химических реагентов для осаждения радиоактивной пыли на территории 1200 м^2.

19 апреля начали выкачивать радиоактивную воду из подвала II энергоблока и тоннелей в приспособление для переработки отходов.

22 апреля Президент TEPCO М. Шимуцу официально извинился перед губернатором префектуры Фукусима Ю. Сато за ядерный кризис, последовавший за землетрясением и цунами 11 марта 2011 г.

26 апреля проводится распыление химических реагентов для осаждения радиоактивной пыли.

27 апреля уровень радиации, измеренный роботами внутри I энергоблока, достиг самого высокого показателя — 1120 мЗв/ч.

В мае для предотвращения распространения радиоактивной пыли над зданиями аварийной АЭС произведено распыление склеивающего вещества. Уровень радиации у границ территории станции достиг нормы (менее 1 мЗв/год). Несмотря на достижение «холодного останова» АЭС «Фукусима-1», по-прежнему происходила утечка радиоактивной воды, в результате чего в Тихий океан попало большое количество радиоактивных веществ. Из-за пробоины в одном из каналов системы очистки из нее вылилось 120 т высокорадиоактивной воды. Уровень радиации на участке разлива в сотни раз превысил норму — 140 тыс. Бк/см^3. Уровень радиоактивного цезия в рыбе, выловленной в близлежащей префектуре Мияги, превысил 360 Бк/кг при норме 100 Бк/кг, что заставило местных рыбаков остановить промысел морского окуня.

С помощью компьютерного моделирования Японское агентство по изучению Земли и океана JAMSTEC создало карту распространения в океане цезия-137 в период с марта 2011 года по 27.01.2012 г. Ученые рассчитали движение радиоактивных частиц, обусловленное океанскими течениями, с учетом периода полураспада радионуклидов.

5 мая рабочие вошли в здание I реактора, чтобы подключить системы вентиляции для поглощения радионуклидов внутри здания, что позволит начать замену охлаждающих систем.

11 мая уровень цезия-134, -136, -137, йода -131 повысился.

12 мая инженеры TEPCO подтвердили, что произошло расплавление ядерных топливных элементов реактора и топливные элементы упали на днище реактора. Топливные стержни I реактора полностью покрыты водой. Подтверждено существование отверстий в основании гермооболочки реактора, которые, по-видимому, были прожжены расплавленной активной частью. Ядерное топливо просочилось в гермооболочку, поврежденную взрывом во время аварии. Активная часть была повреждена в I, II, и III реакторах.

15 мая уровень радиации на первом этаже I энергоблока 2000 мЗв/ч. Рабочим разрешено находиться там не более 8 мин. Из гермооболочки реактора в подвал вытекает большое количество воды. 11-метровый по высоте подвал наполовину заполнен водой.

По данным TEPCO, топливные стержни I реактора стали видны над водой через 4 ч после землетрясения и аварийного отключения станции и полностью расплавились через 16 ч.

18 мая четверо рабочих вошли в здание II реактора, чтобы измерить уровень радиации. Они получили дозу облучения в 3 и 4 мЗв/ч.

С 10 по 22 мая 2011 года в Тихий океан из III реактора вытекло не менее 250 т радиоактивной воды.

24 мая TEPCO признала факт расплавления активных зон II и III энергоблоков. На расплавление топливных стержней ушло 60 ч, на расплавление реактора — 100 ч (после 9-ти бального землетрясения).

В настоящее время ситуация на АЭС «Фукусима-1» полностью стабилизирована. Над I, III и IV блоками должны появиться защитные бетонные саркофаги. Сейчас они накрыты защитными колпаками из полиэстерных панелей. Началась подготовка к извлечению отработавших стержней из расположенных над реакторами бассейнов выдержки.

Последствия радиационного воздействия аварии

По данным радиологического анализа можно выделить два периода интенсивного выброса радиоизотопов: первый соответствовал взрывам на реакторах с 12 по 15 марта, когда в атмосферу были выброшены короткоживущие радионуклиды, второй период — с 20 по 24 марта во время сильного разогрева и разгерметизации реакторов.

Если на первом этапе уровень радиоактивности снижался весьма быстро почти до естественных природных значений, то на втором этапе, когда территории вокруг АЭС были загрязнены радиоизотопами йода и цезия, спад активности стал менее динамичен. 30–31 марта наблюдался существенный подъем радиоактивности вследствие взрыва водорода на I энергоблоке 12 марта и выбросов с III блока. Сумма выбросов йода-131 достигла 190 тыс. ТБк (1 ТБк эквивалентен 1 трлн Бк). К 15 марта уровень аварии на АЭС «Фукусима-1» был повышен до 7-го, достигнув оценки аварии на ЧАЭС.

Наличие радиоактивных изотопов было выявлено за тысячи километров от места аварии.

Основные радионуклиды, выброшенные из реакторов — йод-131 и цезий-137. На момент аварии правительство Японии имело запас в 250 тыс. доз йодистого калия; 200 тыс. доз было выделено населению для профилактики в самый первый период. Правительство Японии считает, что переоблучение щитовидной железы у населения маловероятно. Население отселено в радиусе 20 км от «Фукусимы-1». Живущим в радиусе 20–30 км от АЭС рекомендовано отселиться добровольно. Для некоторых пунктов принято решение об обязательной эвакуации. Уровень облучения, вызванного присутствием «японских» радионуклидов, обнаруженных в ряде стран мира, намного ниже фоновых значений.

На расстоянии 30 км от АЭС уровень радиоактивного излучения — 0,2–26 мкЗв/ч (фоновые значения — 0,05–0,1); в самолете на высоте 9 тыс. м — 4–7 мкЗв/ч, в горной местности — около 0,5 мкЗв/ч.

На территории АЭС есть участки с весьма высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Но правильная организация работ позволяет работающему персоналу не превышать предельной дозы, при которой вредное воздействие на организм человека исключено. Но АЭС находится в сейсмоопасной зоне. Могут возникнуть различные проблемы, поскольку оболочки ТВЭЛов разрушены. Каждый скачок давления, очередные землетрясения будут уплотнять ядерное топливо, изменять его распределение в реакторе и создавать зоны локального перегрева.

В течение 10 месяцев ТЕРСО могла лишь предполагать, что происходит внутри реакторов после расплавления топлива. В январе 2012 года удалось получить первые кадры при помощи оптоволоконной камеры. Эндоскоп был введен через отверстие в II реакторе на высоте 7 м от дна гермооболочки. Получено подтверждение, что топливо остается относительно холодным.

Из IV блока АЭС «Фукусима-1» продолжается утечка высокоактивной воды. Точно места протечек установить пока не удалось. Вытекшая вода поступает в цокольный этаж здания IV реактора.

Ветеринары провели дезинфекцию погибших близ АЭС «Фукусима-1» животных, забили скот в зоне отчуждения с согласия его владельцев.

Суммарный выброс радионуклидов йода и цезия на «Фукусиме-1» пока соответствует 10 %-ному объему того, что было выброшено во время Чернобыльской аварии (без учета урана и плутония, которые были подняты при пожаре из активной зоны реактора ЧАЭС). Суммарная мощность разрушенных реакторов «Фукусимы-1» почти в 4 раза превосходит мощность IV энергоблока ЧАЭС. К этому необходимо добавить накопившиеся за 40 лет эксплуатации «Фукусимы-1» отработавшие ТВС, также сыгравшие негативную роль в развитии аварии.

На «Фукусиме-1» безвозвратно утрачены 4 энергоблока, на ЧАЭС — 1. Уже через полгода после чернобыльской аварии I, II и III блоки ЧАЭС были запущены в работу.

Авария на АЭС «Фукусима-1» принципиально отличается от чернобыльской, где произошел одномоментный выброс радиоактивных веществ. На «Фукусиме-1» не было взрыва ядерного реактора, не произошло массированного разлета радионуклидов по воздуху. Объем радиоактивных выбросов на «Фукусиме-1» оказался в 7 раз меньше, чем на ЧАЭС, и был направлен в основном в сторону океана. Утечка радиоактивно зараженной воды со станции продолжается, устранить ее значительно труднее. Продукты питания требуют контроля, так как из-за накопления по пищевой цепочке в овощах, молоке, мясе могут содержать больше радионуклидов. Также необходим строгий контроль воды из-за миграции радиоизотопов в водоносных слоях.

За время аварии на АЭС «Фукусима-1» погибло 3 человека, ранено 20 человек. По заключению врачей, болезненное состояние 149 пациентов из 610 человек, поступивших в 27 больниц префектуры Фукусима в первые два месяца после аварии, связано с радиофобией. Правительство Японии выделило 1,24 млрд долл. на мониторинг здоровья жителей префектуры Фукусима в течение 30 лет. Одобрен план создания Агентства по атомной безопасности, отвечающего за мониторинг уровня радиации, которым ранее занималось Министерство по делам науки и техники. На шестой неделе после начала аварии началась масштабная проверка влияния аварии на здоровье населения и окружающую среду.

Энергетическая трагедия Японии

Экономический ущерб, нанесенный компании ТЕРСО — владельцу АЭС «Фукусима-1», достиг 32 млрд долл., что составляет 80 % ее

стоимости до аварии. Размер компенсаций пострадавшим может достигать 130 млрд долл. Ущерб от остановки АЭС «Фукусима-1» и других атомных станций оценивается в 90 млрд долл. ежегодно. Экономический ущерб от цунами — 300 млрд долл. (без учета падения объемов торговли и промышленного производства). TEPCO намерена избавиться от активов на сумму более 6 млрд долл. 9 мая 2011 года компания запросила финансовую помощь у правительства для осуществления выплат населению, эвакуированному из зоны отчуждения.

TEPCO планирует построить морскую дамбу на северо-западе острова Хонсю для защиты крупнейшей в мире (по установленной мощности) АЭС «Касивадзаки-Карива» от мощных цунами. Правительственная комиссия по вопросам ядерной энергетики подготовила план поэтапной ликвидации АЭС «Фукусима-1». Извлечение ОЯТ из бассейнов начнется в 2014 году и закончится через 6 лет.

Недавно обнаруженное на глубине 7 м на дне бассейна выдержки III блока упавшее тяжелое оборудование (перегрузочный узел весом 35 т, сорвавшийся в результате взрыва водорода на III блоке) может серьезно осложнить операцию извлечения топлива из бассейна этого блока.

Начало наиболее сложного этапа ликвидации последствий аварии — извлечение расплавленного ядерного топлива из реакторов — планируется не раньше, чем через 10 лет — в 2021 году. Этот процесс займет примерно 25 лет, после чего еще 5 лет специалисты TEPCO будут демонтировать здания реакторов и другие строения на территории станции. Демонтаж АЭС «Фукусима-1» в общей сложности продлится 40 лет.

Объем выбывших мощностей «Фукусимы» составил 4,7 ГВт, остальных пострадавших АЭС — 7,5 ГВт. Пострадавшие мощности составляют около 8 % суммарного производства энергии в Японии. Эти генерирующие мощности вряд ли могут быть восстановлены в ближайшие годы. На авансцену выходят нефть и газ. Спрос на нефть с момента фукусимской катастрофы вырос более чем на 230 тыс. баррелей в сутки, на газ — приблизительно на 13 млн м^3. До аварии на Японию приходилось 32 % мирового импорта сжиженного природного газа. В последнее время этот показатель возрос на 30 %. Япония потребляет около 20 % экспортируемой восточно-сибирской нефти. Россию последствия японской катастрофы коснулись в наименьшей степени. Из сложившейся ситуации российские компании извлекают косвенную прибыль.

Замещение выбывших энергетических мощностей в Японии будет компенсироваться дополнительной генерацией на природном газе. Терминалы приема сжиженного природного газа и суда-газовозы от землетрясения не пострадали. Ущерб от стихии электростанциям, работающим на газе, относительно невелик. В качестве дополнительной помощи концерн General Electric обещал изготовить к лету текущего года 20 газотурбинных установок. Десять японских генерирующих компаний в эту зиму утроили расход нефтепродуктов. Потребление сжиженного газа возросло на 34 %. Незначительное снижение наблюдалось только по углю — на 1,8 %.

Несмотря на призывы к экономии и энергосбережению, максимальные показатели по потреблению в зимний период слабо отличаются от аналогичных показателей прошлой зимы. Рекорд зимы 2010–2011 годов был зафиксирован 31.01.2011, пиковая нагрузка составила 157,260 ГВт, рекорд нынешней зимы (2.02.2012) — 155,190 ГВт.

Компания TEPCO сообщила об увеличении на 28,5 % топливной составляющей расходов на эксплуатацию генерирующих мощностей. О значительном росте расходов на топливо сообщают и другие генерирующие компании.

Из 50 оставшихся блоков в строю остается только один. Но может сложиться ситуация, при которой работающих атомных станций не останется из-за того, что прошедшие профилактику два реактора АЭС «Оои» не успеют вступить в строй до 5 мая, когда будет остановлен последний работающий в стране реактор АЭС «Томари» на Хоккайдо.

Правительство вынесло решение о необходимости запуска реакторов, так как возникла угроза нехватки электроэнергии в промышленном районе Кансай, к которому относятся крупные промышленные центры Осака и Киото. При неблагоприятном стечении обстоятельств нехватка электричества может составить до 18,6 %. Если по крайней мере этим летом не начнут работать атомные электростанции, то ситуация в некоторых местах может стать напряженной.

В Токио не хотели бы допустить такой ситуации, когда в стране не будет работать ни один атомный блок. Это важно с точки зрения психологии, так как в этом случае общественность будет труднее убедить в жизненной необходимости АЭС для островного государства. Япония ставит целью не допустить распространение радиофобии.

Уроки Фукусимы

1. Вероятность тяжелых аварий на АЭС существует, что неоднократно было доказано практикой (Three Mile Island, ЧАЭС, «Фукусима-1»). С одной стороны, уроки аварии на японской АЭС обнадеживают, поскольку большинство станций островного государства после сильнейших ударов природной стихии остановились штатно. Это подтвердило устойчивость атомной энергетики к различным природным и техногенным воздействиям. На АЭС «Фукусима-1» не произошло ядерного взрыва реактора. С другой стороны, вызывают тревогу просчеты конструкторов и неготовность руководства и персонала быстро принимать решения (сказался недостаток фундаментальных знаний у специалистов).

Реакторные установки имеют многобарьерные системы защиты, но они не взаимоувязаны с точки зрения ликвидации реальной нештатной аварии. Отсутствуют надежные технологии работы с облученным топливом внутри реактора после аварии с повреждением штатных подъемных механизмов.

2. Ситуация на Фукусиме продемонстрировала неготовность японских операторов к нештатным ситуациям. В атомной энергетике не бывает мелочей. Инструкции на случай аварии отсутствовали. Счет времени шел на минуты. Последствия небрежения подготовкой к возможным неприятностям оказались катастрофическими. Можно иметь очень надежный реактор, но споткнуться на источниках резервного энергоснабжения и системах забора охлаждающей воды, на высокой уязвимости бассейнов выдержки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), на недостаточной подготовленности персонала и администрации для обеспечения работы АЭС в экстремальных условиях. Руководство компании TEPCO, не оценив и не осознав своевременно масштаб катастрофы, и в целях сохранения лица компании пыталось самостоятельно разрешить возникшую экстремальную проблему, что только усугубило масштабы бедствия.

3. АЭС является объектом сверхвысокой опасности, рассчитанным на долгие годы эксплуатации, больше чем жизнь одного поколения. Поэтому конструкторы должны закладывать в проекты решения с учетом обеспечения безопасности будущих поколений. АЭС должны иметь максимальные запасы прочности, надежности и живучести. При их сооружении должны использоваться только высококачественные материалы.

4. Аварии на атомных объектах, как правило, возникают внезапно и имеют тяжелейшие последствия планетарного масштаба. Ни одно государство в одиночку не в состоянии в полной мере и в короткие сроки ликвидировать последствия аварии на АЭС. Необходимо объединение сил и средств различных стран для решения вопросов безаварийной эксплуатации объектов ядерной энергетики. Для этого требуется своевременное предоставление достоверной информации в полном объеме, а также разработка единой концепции ликвидации последствий аварии. Объективно прогнозировать протекание аварий и противостоять разрушительным действиям очень сложно. Полностью исключить вероятность аварий на технических объектах пока не удается. По мнению специалистов, действия операторов АЭС «Фукусима-1» после землетрясения спровоцировали взрывы на атомной станции.

5. Масштабность и периодичность происходящих в мире техногенных катастроф свидетельствуют о значительно возросшей роли специалистов технического профиля. Сложные технологические системы требуют строгого соблюдения технологий и регламентов. Качество подготовки кадров для обслуживания таких систем, а также ликвидации последствий аварий должно быть поднято на уровень, соответствующий сложности объектов, создаваемых в XXI веке.

6. Причиной многих крупных аварий последних десятилетий является порочная практика назначения на руководящие инженерные должности «универсальных» управленцев-менеджеров, не способных в силу отсутствия соответствующих знаний и опыта адекватно оценивать сложившуюся ситуацию и принимать на

себя ответственность за действия по выводу из нештатной ситуации. Ликвидировать аварии приходится в чрезвычайных ситуациях, требующих быстрого принятия решений, к чему такие «управленцы» не готовы.

7. Для обеспечения технической безопасности АЭС необходимо введение резервных систем охлаждения реакторов и их защитных корпусов, функционирование которых возможно в автономном режиме при полном отсутствии основного и аварийного электропитания. Использование одного вида энергии при обслуживании АЭС недопустимо. В качестве независимого источника энергии может быть использована энергия струйных генераторов, в том числе применение струйных насосов для подачи воды в активную зону реакторов.

8. Неадекватное отражение событий, происходящих в результате аварии и последующей ее ликвидации, официальными органами и средствами массовой информации не позволяют специалистам проанализировать ситуацию и оказать своевременную поддержку для быстрейшей ликвидации последствий аварии. По данным средств массовой информации (СМИ), авария на АЭС «Фукусима-1» перевешивает ужасы, которые натворила океанская волна, хотя на самом деле все наоборот. Совершенно непонятны объяснения, представленные официальными органами по поводу причин несрабатывания системы аварийного расхолаживания реакторов (ссылки на цунами, превысившую запроектную высоту).

Согласно официальным данным, 13 дизель-генераторов с топливными баками были смыты волной. Но по проекту дизель-генераторы располагаются в здании реакторов. Волна цунами до них не дошла. Если и были смыты, то не основные, а дополнительные передвижные дизель-генераторы. Прошло сообщение, что незадолго до аварии дизель-генераторы на АЭС «Фукусима-1» были заменены газогенераторами, снабжение которых газом осуществлялось централизованно.

Судя по фотографиям и видеоматериалам в интернете, волна цунами почти не затронула территорию станции. Она обрушилась на объекты, расположенные вдоль береговой линии.

Первые дни аварии проявили все недостатки проекта реакторной установки и ошибки, допущенные эксплуатирующей организацией. Но главной ошибкой оказалась высокая уязвимость систем аварийного энергоснабжения и системы забора морской воды.

Был ли шанс у персонала станции предотвратить взрывы водорода на АЭС? По проекту при превышении предельного давления срабатывает предохранительный клапан, и пар из корпуса реактора стравливается во внешний корпус — контайнмент. Прочность контайнмента была недостаточной, поэтому потребовалось сбросить водородно-паровую смесь в здание реактора. После модернизации 1992 года реакторы этого типа должны были иметь вентиляционную магистраль для сброса давления из тора за пределы здания. Но во время аварии в результате такой вентиляции водород почему-то оказался не снаружи, а в помещениях реакторных зданий.

Мировая ядерная энергетика: постфукусимский синдром

Почему Япония, страна высочайшей технологической культуры, допустила возникновение и наихудший вариант развития нештатной ситуации на АЭС вплоть до превращения ее в катастрофу? Две предыдущие аварии на АЭС в США и СССР должны были научить человечество взвешенному, осторожному отношению к атомным технологиям. Но... ничему не научили. Мощное землетрясение и цунами, обрушившееся на побережье Японии, нанесли сильнейший удар по всей мировой ядерной энергетике. Избежать жертв и материальных потерь на пути научно-технического прогресса человечеству пока не удается. Радиофобии после аварий на Three Mile Island и ЧАЭС, для преодоления которых потребовались колоссальные усилия США и СССР, вновь завладели планетой. Авария на АЭС «Фукусима» изменила отношение людей к атомной энергетике во всем мире. 21 из 24 государств, в которых проживает 60 % населения Земли, высказалось за закрытие атомных станций. Численность противников атомной энергетики в Китае, Японии, Южной Корее возросла вдвое.

Германия до конца года планирует вывести из эксплуатации 7 реакторов. К 2022 году будут остановлены все 17 реакторов, которые обеспечивают 26 % электроэнергии. Из экспортера электрической энергии Германия уже в марте

2012 года превратилась в ее импортера. Швейцарские АЭС прекратят работу к 2034 году. От использования атомной энергии отказались Италия и Испания. Франция, где три четверти энергии вырабатывают АЭС, не отказывается от своих программ развития атомной энергетики. Для малых европейских стран атомная энергетика станет менее доступной. Еврокомиссия не позволит им строить новые реакторы. Поэтому Европе придется больше экономить, вкладывать немалые средства в развитие возобновляемой энергетики, увеличивать импорт природного газа, заниматься добычей сланцевого газа. Большие средства инвестируются в генерирующие мощности, технологии энергопередачи, энергосбережения и энергонакопления.

В США, где проходит стадия неторопливого «атомного ренессанса», после фукусимской аварии можно ожидать некоторого спада интереса к атомным проектам внутри страны. Пока США продлевают сроки эксплуатации действующих АЭС, планируют строительство нескольких реакторов нового поколения, пытаются решать проблему обращения с облученным ядерным топливом и радиоактивными отходами, работают над реактором на быстрых нейтронах.

По числу работающих реакторов (104 блока) США занимают первое место в мире. Реакторы АЭС «Фукусима-1» были разработаны американской корпорацией General Electric. В 2007 году был образован Глобальный ядерный альянс General Electric и Hitachi. 23 реактора в США, подобных фукусимским, вырабатывают 4 % общего объема электроэнергии США, 20 блоков из 23 получили лицензию на продление эксплуатации еще на 20 лет. 12 ректоров относятся к водяным кипящим реакторам нового поколения.

Авария на «Фукусиме-1» инициировала проверку безопасности действующих АЭС, разработку законопроектов, повышающих требования к системам аварийного расхолаживания реакторов. Набирает силу общественная кампания по закрытию всех 23 реакторов типа Mark-1. США рассчитывают на увеличение добычи собственного природного газа, возобновляемые источники энергии и энергосбережение. Электроэнергетика США в большей степени угольная, а по запасам каменного угля США находятся на первом месте в мире. Рывок в развитии атомной энергетики США может произойти, скорее всего, в 2030–2040 годах. По прогнозам экспертов, структура топливного баланса электроэнергетики США до 2035 года заметно не изменится.

По мнению обозревателей «Нью-Йорк Таймс», ренессанс атомной энергетики в США закончился. Перспективы развития атомной отрасли в стране выглядят весьма скромно. Призывы сенатора-республиканца Ламара Александера построить 100 новых атомных блоков перешли в раздел мечтаний.

Но и без ренессанса атомная отрасль Америки может зачесть себе в плюс неплохие контракты. В феврале комиссия по ядерному регулированию (NRC) выдала комбинированную (строительство и эксплуатация) лицензию для двух новых блоков на АЭС «Вогл». В марте аналогичную лицензию получили два новых блока на АЭС «В.С.Саммер». Развитие отрасли в Америке сдерживают три фактора — авария на Фукусиме, исключительная дешевизна природного газа и экономическая рецессия. Они не позволяют всерьез говорить о строительстве десятков новых блоков.

Авария на Фукусиме не пошла на пользу имиджу атомной отрасли. Но и преувеличивать ее значимость не стоит. Она осложнила политическое обсуждение атомных проектов, в частности создала определенные трудности для проекта по строительству новых блоков на АЭС «South Texas». К нему собиралась присоединиться японская компания TEPCO, но теперь у нее хватает проблем на родине. На сегодняшний день четыре блока получили «зеленый свет» на строительство. Две пары блоков с AP-1000 на АЭС «Вогл» и «В.С. Саммер» могут создать хороший задел на будущее.

С другой стороны, авария на Фукусиме превратилась в хороший аргумент для тех, кто говорит о необходимости строить новые блоки. Представитель компании «Westinghouse» заявил, что «если бы на TMI-2 (Three Mile Island Unit 2) стоял реактор AP-1000, у США не было бы повода вспоминать об аварии на этом блоке. Он бы до сих пор прекрасно работал». Абсолютное большинство из 104 американских реакторов было построено в прошлом веке. Если все они будут заменены новыми проектами, безопасность атомной энергетики существенно увеличится. Но сделать это трудно, так как конкурен-

ция с другими видами производства энергии велика. В США принят подход «ограниченной диверсификации» энергетики. Наряду с выдачами госгарантий под строительство новых атомных блоков, будет поддерживаться развитие солнечной и ветряной энергетики, нефтяных и газовых станций. Сверхдешевый природный газ делает с точки зрения экономики малопривлекательными любые другие энергоисточники, будь-то атом, солнце или ветер.

Китай и Индия, где потребность в энергии быстро растет, сворачивать свои ядерные программы не собираются. Возможно, будут пересмотрены схемы размещения новых атомных объектов. Индия планирует построить 23, Китай — 77 АЭС .

В Южной Корее функционирует 21 реактор, обеспечивающий треть всей электроэнергии страны. Запланировано строительство еще 11 реакторов.

Что касается стран, входивших в СЭВ, то от строительства АЭС они не отказались. У России (32 действующих энергоблоков, 9 — строится, 5 — за границей) также нет оснований отказываться от своей энергетической стратегии. Продолжится строительство запланированных АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Они заменят старые реакторные блоки. Ускоряются темпы работ по развитию реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом, что позволит России увеличить запасы ресурсов ядерного топлива более чем на тысячу лет. Рост установленной мощности в России за 10 лет должен составить 18,3 ГВт.

В соответствии с государственной программой разрабатываются проекты реакторов на быстрых нейтронах с тяжелым теплоносителем (свинцовым и свинцово-висмутовым). Особое внимание будет уделяться реакторам с естественными системами безопасности, с нулевой вероятностью тяжелых аварий.

В рамках ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» финансируются работы по опытному реактору БРЕСТ мощностью 300 МВт со свинцовым теплоносителем. Рассматривается проект ПРОРЫВ — два реактора БРЕСТ-1200 с пристанционным замкнутым циклом. В случае его реализации, как полагают авторы проекта, атомная энергетика окончательно разрешит проблемы безопасности АЭС и их ресурсного обеспечения.

Строится реактор на быстрых нейтронах БН-800. На заключительном этапе находится строительство плавающей АЭС — ПАТЭС с энергоблоками КЛТ-40С. Планируется развитие атомной энергетики малой мощности (до 100 МВт) для энергообеспечения отдаленных регионов страны и космических исследований. Конструкторами предложено несколько проектов: УНИТЕРМ, АБВ, СВБР-100.

Большое внимание уделяется радиационной и ядерной безопасности, совершенствованию законодательства и технического регулирования. Решается проблема централизованного хранения ОТВС ядерных реакторов.

Второй раз после чернобыльской аварии атомная энергетика оказалась перед угрозой вспышки недоверия мировой общественности к атомным технологиям. Для восстановления положительного импульса развития ядерной энергетики предстоит большая разъяснительная работа среди населения, специалистов и политиков.

Надеемся, полученные уроки пойдут человечеству на пользу. Атомные реакторы станут гораздо надежнее и безопаснее. И тогда, если в будущем и произойдет крупная авария на АЭС, то лишь из-за прямого попадания в нее астероида. Наша главная обязанность — извлечь из аварии на Фукусиме все полезные уроки и применить полученные знания на практике.

УДК 693.22

В.М. Жгутов

МЕТОД КОНСТРУКТИВНОЙ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ РЕБЕР И РАЗЛИЧНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваем тонкие ребристые оболочки общего вида, подразумевая достаточно широкий класс оболочек наиболее важных частных видов: пологие на прямоугольном плане, вращения (например, сферические, конические, цилиндрические, торообразные) и другие оболочки [1].

Срединную поверхность обшивки оболочки толщиной h принимаем за отсчетную поверхность $x_3 = 0$. (Под обшивкой ребристой оболочки понимаем оболочку с мысленно отрезанными ребрами.) Координатные линии x_1 и x_2 криволинейной ортогональной системы координат ($-a/2 \le x_1 \le a/2$ и $-b/2 \le x_2 \le b/2$) направляем по линиям кривизны (параллелям и меридианам в случае оболочек вращения), а ось x_3 — по внутренней нормали отсчетной поверхности так, чтобы система координат x_1, x_2, x_3 была правой.

Элементы длин дуг координатных линий x_1, x_2 и оси x_3 определяем по формулам [1–3]

$$dl_1 = H_1 dx_1;\ dl_2 = H_2 dx_2;\quad dl_3 = H_3 dx_3 = dx_3,$$

где $H_1 = H_1(x_1, x_2)$, $H_2 = H_2(x_1, x_2)$, $H_3 \equiv 1$ — метрические коэффициенты Лямэ. При этом H_1 и H_2 зависят от вида оболочки. В частности, $H_1 \equiv H_2 \equiv 1$ для пологих оболочек (и пластин); $H_1 = \text{const}$ и $H_2 = H_2(x_1)$ в случае оболочек вращения.

Со стороны вогнутости оболочка подкреплена ребрами жесткости (например, шпангоутами), расставленными вдоль координатных линий.

Ребра задаем дискретно с помощью ступенчато-гладкой функции $H = H(x_1, x_2)$, характеризующей распределение ребер по оболочке, их конечную ширину и высоту [1, 4, 5]:

$$H(x_1, x_2) \equiv$$

$$\equiv \sum_{j=1}^{M} h_j^{(2)} \bar{\delta}(x_1 - x_1^j) + \sum_{i=1}^{N} h_i^{(1)} \bar{\delta}(x_2 - x_2^i) -$$

$$- \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} h_{ij} \bar{\delta}(x_1 - x_1^j) \bar{\delta}(x_2 - x_2^i), \qquad (1)$$

где $h_i^{(1)}$ $(1 \le i \le N)$ и $h_j^{(2)}$ $(1 \le j \le M)$ — высоты ребер, подкрепляющих оболочку в направлениях координатных линий, соответственно x_1 и x_2; N и M — количества ребер подкрепления в направлениях x_1 и x_2 соответственно; $h_{ij} \equiv \min\left(h_i^{(1)}, h_j^{(2)}\right)$ — высота фигуры, получающейся при пересечении i-го ребра в направлении x_1 и j-го ребра в направлении x_2; $\bar{\delta}(x_1 - x_1^j)$ и $\bar{\delta}(x_2 - x_2^i)$ — единичные столбчатые функции, равные по определению единице в местах присоединения ребер и нулю — вне таких мест.

При этом полагаем, что:

1) ширина i-го ребра в направлении x_1 равна $r_i^{(1)} = d_i - c_i$ (здесь $c_i = x_2^i - \frac{r_i^{(1)}}{2}$ и $d_i = x_2^i + \frac{r_i^{(1)}}{2}$, где x_2^i – ордината осевой линии прикрепления i-го ребра);

2) ширина j-го ребра в направлении x_2 равна $r_j^{(2)} = b_j - a_j$ (здесь $a_j = x_1^j - \frac{r_j^{(2)}}{2}$ и $b_j = x_1^j + \frac{r_j^{(2)}}{2}$, где x_1^j – абцисса осевой линии прикрепления j-го ребра).

Стало быть, для единичных столбчатых функций можно записать:

$$\overline{\delta}(x_1 - x_1^j) \equiv \begin{cases} 1, \text{если } a_j \le x_1 \le b_j; \\ 0 \text{ при любом другом } x_1; \end{cases}$$

$$\overline{\delta}(x_2 - x_2^i) \equiv \begin{cases} 1, \text{если } c_j \le x_2 \le d_j; \\ 0 \text{ при любом другом } x_2. \end{cases}$$

Таким образом, толщина подкрепленной ребрами (ребристой) оболочки равна $\tilde{h} = h + H$, причем $-h/2 \le x_3 \le h/2 + H$.

Подчеркнем, что в местах подкрепления оболочки ребрами $H > 0$, а в местах ослабления оболочки вырезами (сквозными или «глухими») $H < 0$; при отсутствии ребер подкрепления $H = 0$.

Весьма существенно, что в формуле (1) высоты ребер могут быть как постоянными ($h_i^{(1)} = \text{const}$ и $h_j^{(2)} = \text{const}$), так и переменными величинами: $h_i^{(1)} = h_i^{(1)}(x_1, x_2^i)$ и $h_j^{(2)} = h_j^{(2)}(x_1^j, x_2)$, где $x_2^i = \text{const}^i$ $(1 \le i \le N)$, $x_1^j = \text{const}^j$ $(1 \le j \le M)$; $-a/2 \le x_1 \le a/2$, $-b/2 \le x_2 \le b/2$.

Будем совместно учитывать геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, дискретное расположение ребер, их ширину, сдвиговую и крутильную жесткости, а также возможные проявления ортотропии, нелинейной упругости и ползучести (вязкоупругости) материалов.

Нелинейные геометрические соотношения в отсчетной поверхности $x_3 = 0$ оболочки имеют вид [1]

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}u_2 - K_1 u_3 + \frac{1}{2}\Theta_1^2;$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_2}{\partial x_1}u_1 - K_2 u_3 + \frac{1}{2}\Theta_2^2;$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}u_1 + \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_2}{\partial x_1}u_2 + \Theta_1\Theta_2,$$

где ε_{11} и ε_{22} — деформации удлинения (сжатия) соответственно вдоль координатных линий x_1 и x_2; $\gamma_{12} = \gamma_{21}$ — деформации сдвига в касательной плоскости (dx_1, dx_2); $u_1 = u_1(x_1, x_2)$, $u_2 = u_2(x_1, x_2)$ и $u_3 = u_3(x_1, x_2)$ — компоненты вектора перемещений (точек отсчетной поверхности) соответственно вдоль координатных линий x_1, x_2 и оси x_3; $K_1 = K_1(x_1, x_2)$ и $K_2 = K_2(x_1, x_2)$ — главные кривизны отсчетной поверхности $x_3 = 0$ оболочки соответственно в направлениях x_1 и x_2;

$$\Theta_1 = \Theta_1(x_1, x_2) \equiv \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + K_1 u_1 \approx \frac{1}{H_1}\frac{\partial u_3}{\partial x_1};$$

$$\Theta_2 = \Theta_2(x_1, x_2) \equiv \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + K_2 u_2 \approx \frac{1}{H_2}\frac{\partial u_3}{\partial x_2}.$$

Деформации поперечных сдвигов определяем по формулам [1]

$$\gamma_{13} = c f(x_3)\Phi_1; \qquad \gamma_{23} = c f(x_3)\Phi_2.$$

Здесь $f(x_3)$ — функция, характеризующая распределение напряжений τ_{13} и τ_{23} в главных нормальных сечениях оболочки, такая, что $f(z_\text{в}) = f(z_\text{н}) = 0$, $\frac{1}{\tilde{h}}\int_{z_\text{в}}^{z_\text{н}} f(x_3)dx_3 = 1$, $\frac{1}{\tilde{h}}\int_{z_\text{в}}^{z_\text{н}} f^2(x_3)dx_3 = 1/c$ (c — константа); $\Phi_1 = \Psi_1 + \frac{Du_3}{\partial l_1}$ и $\Phi_2 = \Psi_2 + \frac{Du_3}{\partial l_2}$ — полные углы сдвигов; $\Psi_1 = \text{tg}\psi_1$ и $\Psi_2 = \text{tg}\psi_2$, причем $\psi_1 = \psi_1(x_1, x_2)$ и $\psi_2 = \psi_2(x_1, x_2)$ — углы поворота отрезка нормали к отсчетной поверхности в соответствующих главных нормальных сечениях (dx_1, x_3) и (dx_2, x_3) оболочки.

В качестве $f(x_3)$ используем квадратичную зависимость [1]

$$f(x_3) = -\frac{6}{\tilde{h}^2}(x_3 - z_\text{н})(x_3 - z_\text{в}) = f_0 + f_1 x_3 + f_2 x_3^2,$$

где $f_0 = -\frac{6 z_\text{н} z_\text{в}}{\tilde{h}^2}$; $f_1 = \frac{6(z_\text{н} + z_\text{в})}{\tilde{h}^2}$; $f_2 = -\frac{6}{\tilde{h}^2}$, и тогда $c = 5/6$.

Деформации в слоях $x_3 = \text{const}$ вычисляем по формулам [1]

$$\varepsilon_{11}^{(x3)} = \varepsilon_{11} + x_3 \text{X}_{11}; \qquad \varepsilon_{22}^{(x3)} = \varepsilon_{22} + x_3 \text{X}_{22};$$

$$\gamma_{12}^{(x3)} = \gamma_{12} + x_3 2\text{X}_{12},$$

где $\text{X}_{11} \equiv \frac{1}{H_1}\frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\Phi_2$;

$$\mathrm{X}_{22} \equiv \frac{1}{H_2}\frac{\partial \Phi_2}{\partial x_2} + \frac{1}{H_1 H_2}\frac{\partial H_2}{\partial x_1}\Phi_1$$

и

$$2\mathrm{X}_{12} \equiv \frac{1}{H_1}\frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1} + \frac{1}{H_2}\frac{\partial \Phi_1}{\partial x_2} - \\ -\frac{1}{H_1 H_2}\left(\frac{\partial H_1}{\partial x_2}\Phi_1 + \frac{\partial H_2}{\partial x_1}\Phi_2\right),$$

поскольку для перемещений в слоях $x_3 = \text{const}$ полагаем [1, 6]

$$u_1^{(x3)} = u_1 + x_3\Phi_1;\ u_2^{(x3)} = u_2 + x_3\Phi_2;\ u_3^{(x3)} = u_3.$$

Здесь $\mathrm{X}_{ik}\ (1 \le i,k \le 2)$ — тензор изменения кривизны и кручения (симметричный тензор) [1].

Внутренние силовые факторы, действующие в ребристой оболочке

В соответствии с результатами автора, полученными в работе [1], выражения для внутренних силовых факторов (погонные усилия и моменты), действующих в оболочке и приведенных к отсчетной поверхности, имеют следующий вид.

1. В случае линейно упругого ортотропного материала:

усилия растяжения (сжатия) в направлениях x_1 и x_2

$$N_{11} = G_{11}\left[(h+\overline{F})(\varepsilon_{11} + \mu_2\varepsilon_{22}) + \overline{S}(\mathrm{X}_{11} + \mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$N_{22} = G_{22}\left[(h+\overline{F})(\varepsilon_{22} + \mu_1\varepsilon_{11}) + \overline{S}(\mathrm{X}_{22} + \mu_2\mathrm{X}_{11})\right];$$

усилие сдвига в касательной плоскости (dx_1, dx_2)

$$N_{12} = G_{12}\left[(h+\overline{F})\gamma_{12} + \overline{S}\cdot 2\mathrm{X}_{12}\right];$$

изгибающие моменты в направлениях x_1 и x_2

$$M_{11} = G_{11}\left[\overline{S}(\varepsilon_{11} + \mu_2\varepsilon_{22}) + \left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)(\mathrm{X}_{11} + \mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$M_{22} = G_{22}\left[\overline{S}(\varepsilon_{22} + \mu_1\varepsilon_{11}) + \left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)(\mathrm{X}_{22} + \mu_1\mathrm{X}_{11})\right];$$

крутящий момент в касательной плоскости (dx_1, dx_2)

$$M_{12} = G_{12}\left[\overline{S}\gamma_{xy} + \left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

поперечные (перерезывающие) усилия в главных нормальных сечениях (dx_1, x_3) и (dx_2, x_3) оболочки

$$Q_{13} = cG_{13}(h+\overline{F})\Phi_1; \qquad Q_{23} = cG_{23}(h+\overline{F})\Phi_2.$$

Здесь $\overline{F}$, $\overline{S}$, $\overline{J}$ — соответственно погонные площадь поперечного (или продольного) сечения ребра, статический момент и момент инерции данного сечения:

$$\overline{F} = \int_{h/2}^{h/2+H} dx_3;\ \overline{S} = \int_{h/2}^{h/2+H} x_3 dx_3;\ \overline{J} = \int_{h/2}^{h/2+H} {x_3}^2 dx_3;$$

$G_{11} = \dfrac{E_1}{1-\mu_1\mu_2}$, $G_{22} = \dfrac{E_2}{1-\mu_1\mu_2}$, где E_1, E_2 и μ_1, μ_2 — продольные модули Юнга и коэффициенты Пуассона, причем $E_1\mu_2 = E_2\mu_1$; G_{12}, G_{13} и G_{23} — соответствующие модули сдвига.

В развернутом виде величины $\overline{F}, \overline{S}$ и $\overline{J}$ с учетом формулы (1) можно записать так:

$$\overline{F} = \overline{F}(x_1, x_2) \equiv \\ \equiv \sum_{j=1}^{M} F_j^{(2)}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j) + \sum_{i=1}^{N} F_i^{(1)}\overline{\delta}(x_2 - x_2^i) - \\ -\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} F_{ij}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j)\overline{\delta}(x_2 - x_2^i);$$

$$\overline{S} = \overline{S}(x_1, x_2) \equiv \\ \equiv \sum_{j=1}^{M} S_j^{(2)}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j) + \sum_{i=1}^{N} S_i^{(1)}\overline{\delta}(x_2 - x_2^i) - \\ -\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} S_{ij}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j)\overline{\delta}(x_2 - x_2^i);$$

$$\overline{J} = \overline{J}(x_1, x_2) \equiv \\ \equiv \sum_{j=1}^{M} J_j^{(2)}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j) + \sum_{i=1}^{N} J_i^{(1)}\overline{\delta}(x_2 - x_2^i) - \\ -\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} J_{ij}\overline{\delta}(x_1 - x_1^j)\overline{\delta}(x_2 - x_2^i),$$

где, например,

$$F_j^{(2)} = h_j^{(2)};\ S_j^{(2)} = \frac{h_j^{(2)}(h + h_j^{(2)})}{2};$$

$$J2^j = \frac{1}{4}h^2 h_j^{(2)} + \frac{1}{2}h\left(h_j^{(2)}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(h_j^{(2)}\right)^3.$$

Аналогичный вид имеют выражения для $F_i^{(1)}, S_i^{(1)}, J_i^{(1)}$ и F_{ij}, S_{ij}, J_{ij}.

2. В случае упругоползучего (вязкоупругого) ортотропного материала каждое из выражений для внутренних силовых факторов представим посредством двух аддитивных составляющих [1,7]:

$$N_{11} = N_{11}^E - N_{11}^C, \quad N_{22} = N_{22}^E - N_{22}^C,$$

$$N_{12} = N_{12}^E - N_{12}^C;$$

$$M_{11} = M_{11}^E - M_{11}^C, \quad M_{22} = M_{22}^E - M_{22}^C,$$

$$M_{12} = M_{12}^E - M_{12}^C;$$

$$Q_{13} = Q_{13}^E - Q_{13}^C, \; Q_{23} = Q_{23}^E - Q_{23}^C.$$

Здесь:

1) упругомгновенные (в частности, упругие) составляющие (отмечены индексом «E») вычисляются по формулам, приведенным в пункте 1, с той лишь разницей, что входящие в эти формулы величины $E_1 = E_1(t)$, $E_2 = E_2(t)$, $\mu_1 = \mu_1(t)$, $\mu_2 = \mu_2(t), G_{11} = G_{11}(t) = \dfrac{E_1(t)}{1-\mu_1(t)\mu_2(t)}, G_{22} = G_{22}(t) = \dfrac{E_2(t)}{1-\mu_1(t)\mu_2(t)}, G_{12} = G_{12}(t), G_{13} = G_{13}(t), G_{23} = G_{13}(t)$ являются функциями времени наблюдения t:

$$N_{11}^E = N_{11}^E(t) =$$

$$= G_{11}\left[(h+\bar{F})(\varepsilon_{11} + \mu_2\varepsilon_{22}) + \bar{S}(\mathrm{X}_{11} + \mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$N_{22}^E = N_{22}^E(t) =$$

$$= G_{22}\left[(h+\bar{F})(\varepsilon_{22} + \mu_1\varepsilon_{11}) + \bar{S}(\mathrm{X}_{22} + \mu_2\mathrm{X}_{11})\right];$$

$$N_{12}^E = N_{12}^E(t) = G_{12}[(h+\bar{F})\gamma_{12} + \bar{S}\cdot 2\mathrm{X}_{12}];$$

$$M_{11}^E = M_{11}^E(t) =$$

$$= G_{11}\left[\bar{S}(\varepsilon_{11} + \mu_2\varepsilon_{22}) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}\right)(\mathrm{X}_{11} + \mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$M_{22}^E = M_{22}^E(t) =$$

$$= G_{22}\left[\bar{S}(\varepsilon_{22} + \mu_1\varepsilon_{11}) + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}\right)(\mathrm{X}_{22} + \mu_1\mathrm{X}_{11})\right];$$

$$M_{12}^E = M_{12}^E(t) = G_{12}\left[\bar{S}\gamma_{xy} + \left(\frac{h^3}{12} + \bar{J}\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$Q_{13}^E = Q_{13}^E(t) = cG_{13}(h+\bar{F})\Phi_1;$$

$$Q_{23}^E = Q_{23}^E(t) = cG_{23}(h+\bar{F})\Phi_2;$$

2) составляющие внутренних силовых факторов, обусловленные ползучестью материала (отмечены индексом «C»), определяются по формулам

$$N_{11}^C = N_{11}^C(t) = \int_{t_0}^{t} N_{11}^E(\tau)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$N_{22}^C = N_{22}^C(t) = \int_{t_0}^{t} N_{22}^E(\tau)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$N_{12}^C = N_{12}^C(t) = \int_{t_0}^{t} N_{12}^E(\tau)R_2(t,\tau)d\tau;$$

$$M_{11}^C = M_{11}^C(t) = \int_{t_0}^{t} M_{11}^E(t)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$M_{22}^C = M_{22}^C(t) = \int_{t_0}^{t} M_{22}^E(t)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$M_{12}^C = M_{12}^C(t) = \int_{t_0}^{t} M_{12}^E(\tau)R_2(t,\tau)d\tau;$$

$$Q_{13}^C = Q_{13}^C(t) = \int_{t_0}^{t} Q_{13}^C(\tau)R_2(t,\tau)d\tau;$$

$$Q_{23}^C = Q_{23}^C(t) = \int_{t_0}^{t} Q_{23}^C(\tau)R_2(t,\tau)d\tau,$$

где $R_1(t,\tau)$ и $R_2(t,\tau)$ — функции влияния соответственно при растяжении (сжатии) и сдвиге; τ — время, предшествующее моменту наблюдения.

Примечание 1. Для изотропных линейно упругих и упругоползучих материалов соотношения для внутренних силовых факторов N_{11}, N_{22}, N_{12}, M_{11}, M_{22}, M_{12} и Q_{13}, Q_{23} следуют из приведенных в пунктах 1 и 2 формул, если положить $E_1 = E_2 = E$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ и, следовательно, $G_{11} = G_{22} = \dfrac{E}{(1-\mu^2)}, G_{12} = G_{13} = G_{23} = G = \dfrac{E}{2(1+\mu)}$.

3. В случае нелинейно упругого (упругопластичного) изотропного материала каждое из выражений для внутренних силовых факторов также запишем с помощью двух аддитивных составляющих [1, 8]:

$$N_{11} = N_{11}^E - N_{11}^P; \quad N_{22} = N_{22}^E - N_{22}^P;$$

$$N_{12} = N_{12}^E - N_{12}^P;$$

$$M_{11} = M_{11}^E - M_{11}^P; \quad M_{22} = M_{22}^E - M_{22}^P;$$

$$M_{12} = M_{12}^E - M_{12}^P;$$

$$Q_{13} = Q_{13}^E - Q_{13}^P; \quad Q_{23} = Q_{23}^E - Q_{23}^P.$$

Здесь линейно упругие составляющие (отмечены индексом E) вычисляются по формулам, приведенным в пункте 1, а нелинейно упругие (упругопластические) составляющие внутренних силовых факторов (отмечены индексом P) определяются по формулам

$$N_{11}^P = \omega(\varepsilon_i) N_{11}^E; \quad N_{22}^P = \omega(\varepsilon_i) N_{22}^E;$$

$$N_{12}^P = \omega(\varepsilon_i) N_{12}^E;$$

$$M_{11}^P = \omega(\varepsilon_i) M_{11}^E; \quad M_{22}^P = \omega(\varepsilon_i) M_{22}^E;$$

$$M_{12}^P = \omega(\varepsilon_i) M_{12}^E;$$

$$Q_{13}^P = \omega(\varepsilon_i) Q_{13}^E; \quad Q_{23}^P = \omega(\varepsilon_i) Q_{23}^E,$$

где $\omega(\varepsilon_i)$ — функция А.А. Ильюшина (интенсивность деформаций ε_i).

Примечание 2. Считаем, что материалы обшивки и ребер оболочки имеют одинаковые (достаточно близкие) сдвиговые жесткости.

О жесткостных характеристиках ребер в силовых факторах

Жесткостные характеристики $\bar{F}(x_1, x_2)$, $\bar{S}(x_1, x_2)$, $\bar{J}(x_1, x_2)$ внутренних силовых факторов, действующих в ребрах, являются функциями координат x_1 и x_2, а потому изменяются по-разному вдоль соответствующих координатных линий (в зависимости от числа и жесткости ребер данных направлений).

Представим силовые факторы N_{11}, N_{22}, N_{12}, M_{11}, M_{22}, M_{12}, Q_{13} и Q_{23} в виде

$$N_{11} = N_{11}^S + N_{11}^R, \; N_{22} = N_{22}^S + N_{22}^R,$$

$$N_{12} = N_{12}^S + N_{12}^R;$$

$$M_{11} = M_{11}^S + M_{11}^R, \; M_{22} = M_{22}^S + M_{22}^R,$$

$$M_{12} = M_{12}^S + M_{12}^R;$$

$$Q_{13} = Q_{13}^S + Q_{13}^R, \; Q_{23} = Q_{23}^S + Q_{23}^R,$$

где индексом S отмечены составляющие силовых факторов, действующие в обшивке оболочки, а индексом R — составляющие силовых факторов, действующие в ее ребрах.

Проанализируем влияние ребер разных взаимно ортогональных направлений, в которых рассматриваются те или иные силовые факторы, на примере формирования усилий N_{11}^R и N_{22}^R, действующих в ребрах.

Очевидно, что усилия N_x^R и N_y^R при любых проявленных свойствах материалов имеют вид

$$N_{11}^R = G_{11}(\bar{F}\varepsilon_1 + \bar{S}\varphi_1); \; N_{22}^R = G_{22}(\bar{F}\varepsilon_2 + \bar{S}\varphi_2),$$

где

$$\varepsilon_1 \equiv \varepsilon_{11} + \mu_2\varepsilon_{22}; \quad \varepsilon_2 \equiv \varepsilon_{22} + \mu_1\varepsilon_{11};$$

$$\varphi_1 \equiv \mathrm{X}_{11} + \mu_2\mathrm{X}_{22}; \quad \varphi_2 \equiv \mathrm{X}_{22} + \mu_1\mathrm{X}_{11}. \qquad (2)$$

Примечание 3. В случае изотропных материалов соотношения (2) примут частный вид: $\varepsilon_1 \equiv \varepsilon_{11} + \mu\varepsilon_{22}$; $\varepsilon_2 \equiv \varepsilon_{22} + \mu\varepsilon_{11}$; $\varphi_1 \equiv \mathrm{X}_{11} + \mu\mathrm{X}_{22}$; $\varphi_2 \equiv \mathrm{X}_{22} + \mu\mathrm{X}_{11}$.

Примечание 4. Очевидно, что в случае упругоползучего материала оболочки будем иметь

$$N_{11}^R = N_{11}^{RE} - N_{11}^{RC} \text{ и } N_{22}^R = N_{22}^{RE} - N_{22}^{RC},$$

где $N_{11}^{RE} = N_{11}^{RE}(t) = G_{11}(t)(\bar{F}\varepsilon_1 + \bar{S}\varphi_1)$,

$$N_{22}^{RE} = N_{22}^{RE}(t) = G_{22}(t)(\bar{F}\varepsilon_2 + \bar{S}\varphi_2),$$

причем $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_2(t)$, $\varphi_1 = \varphi_1(t)$, $\varphi_2 = \varphi_2(t)$;

$$N_{11}^{RC} = N_{11}^{RC}(t) = \int_{t_0}^{t} N_{11}^{RE}(\tau) R_1(t, \tau) d\tau, N_{22}^{RC} = N_{22}^{RC}(t) =$$

$$= \int_{t_0}^{t} N_{22}^{RE}(\tau) R_1(t, \tau) d\tau.$$ Аналогично для материала, работающего в нелинейно упругой области, получим

$$N_{11}^R = N_{11}^{RE} - N_{11}^{RP} \quad \text{и} \quad N_{22}^R = N_{22}^{RE} - N_{22}^{RP},$$

где $N_{11}^{RE} = G_{11}(\bar{F}\varepsilon_1 + \bar{S}\varphi_1)$, $N_{22}^{RE} = G_{22}(\bar{F}\varepsilon_2 + \bar{S}\varphi_2)$ и $N_{11}^{RP} = \omega(\varepsilon_i) N_{11}^{RE}$, $N_{22}^{RP} = \omega(\varepsilon_i) N_{22}^{RE}$.

В свою очередь, представим усилия N_{11}^R и N_{22}^R в следующем виде

$$N_{11}^R = N_{11}^{LR} + N_{11}^{TR};\ N_{22}^R = N_{22}^{LR} + N_{22}^{TR},$$

где дополнительным индексом L отмечены составляющие усилий N_{11}^R и N_{22}^R, действующих в тех же направлениях, что и каждое из рассматриваемых усилий, а индексом T — составляющие усилий N_{11}^R и N_{22}^R, действующие в трансверсальных направлениях.

Здесь

$$N_{11}^{LR} = \sum_{i=1}^{N} N_{11}^{Li}\,\bar{\delta}(x_2 - x_2^i), \qquad (3)$$

где $N_{11}^{Li} = G_{11}(F_i^{(1)}\varepsilon_1 + S_i^{(1)}\varphi_1)$;

$$N_{11}^{TR} = \sum_{j=1}^{M} N_{11}^{Tj}\,\bar{\delta}(x_1 - x_1^j), \qquad (4)$$

где

$$N_{11}^{Tj} = G_{11}(F_j^{(2)}\varepsilon_1 + S_j^{(2)}\varphi_1) - \sum_{i=1}^{N} N_{11}^{ij}\bar{\delta}(x_2 - x_2^i),$$

$$N_{11}^{ij} = G_{11}(F_{ij}\varepsilon_1 + S_{ij}\varphi_1);$$

$$N_{22}^{LR} = \sum_{j=1}^{M} N_{22}^{Lj}\,\bar{\delta}(x_1 - x_1^j), \qquad (5)$$

где $N_{22}^{Lj} = G_{22}(F_j^{(2)}\varepsilon_2 + S_j^{(2)}\varphi_2)$;

$$N_{22}^{TR} = \sum_{i=1}^{N} N_{22}^{Ti}\,\bar{\delta}(x_2 - x_2^i), \qquad (6)$$

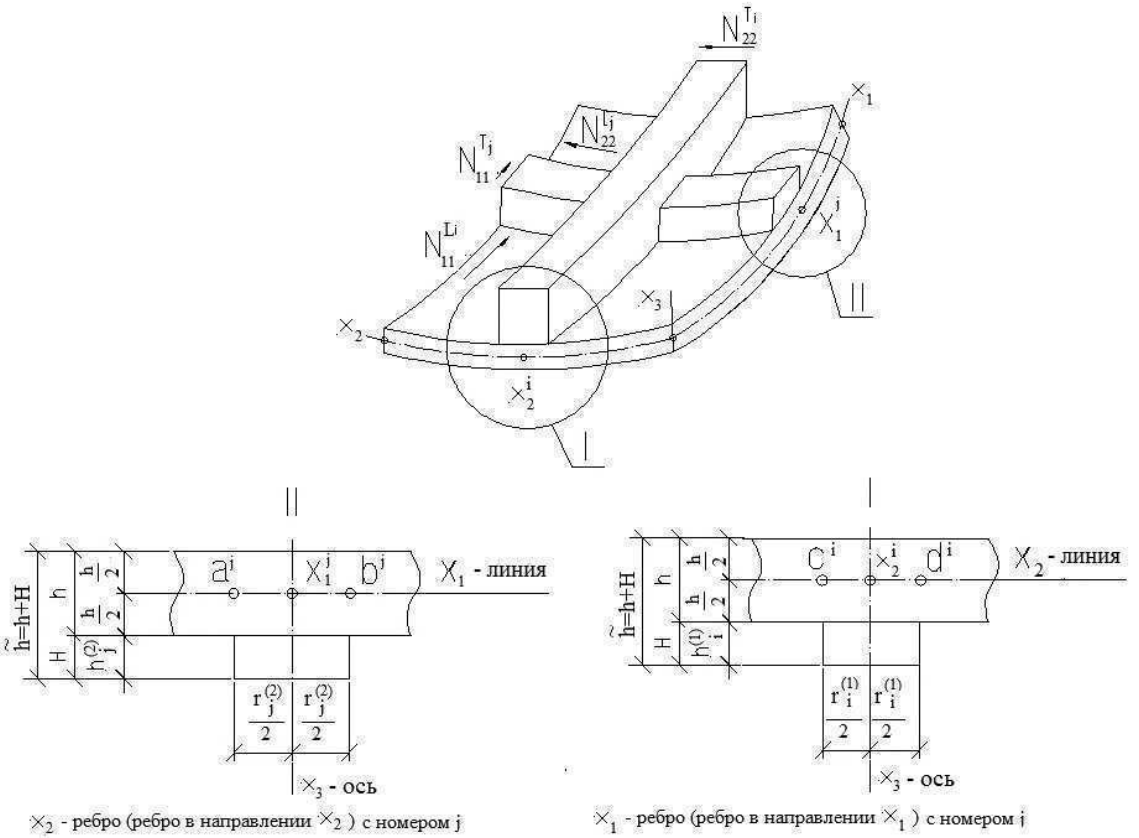
где

$$N_{22}^{Ti} = G_{22}(F_i^{(1)}\varepsilon_2 + S_i^{(1)}\varphi_2) - \sum_{j=1}^{M} N_{22}^{ij}\,\bar{\delta}(x_1 - x_1^j),$$

$$N_{22}^{ij} = G_{22}(F_{ij}\varepsilon_2 + S_{ij}\varphi_2).$$

Составляющие этих усилий показаны на рисунке.

В работе [9] В.В. Карповым (при участии автора) показано (при неучете поперечных сдвигов), что на боковой поверхности ребер или краю вырезов выполняются, в частности, естественные краевые условия:



x_2 - ребро (ребро в направлении x_2) с номером j

x_1 - ребро (ребро в направлении x_1) с номером i

$$N_{11}^{Tj}=0,\ N_{22}^{Tj}=0,\ N_{12}^{Tj}=0;$$

$$M_{11}^{Tj}=0,\ M_{22}^{Tj}=0,\ M_{12}^{Tj}=0.$$

Можно показать, что при учете поперечных сдвигов в рассматриваемом случае имеют место, в частности, следующие дополнительные краевые условия:

$$Q_{13}^{Tj}=0,\qquad Q_{23}^{Ti}=0;\qquad N_{21}^{Ti}=0,\ M_{21}^{Ti}=0.$$

Таким образом, в формирование усилия N_{11}^{R} основной вклад вносит составляющая N_{11}^{LR}. Составляющая же $N_{11}^{TR}=\sum_{j=1}^{M}N_{11}^{Tj}\,\bar{\delta}(x_1-x_1^j)$ в случае относительно узких ребер может быть вообще несущественна, поскольку $N_{11}^{Tj}=0$ на боковой поверхности ребер.

Соответственно, в усилии N_{22}^{R} главной составляющей является N_{22}^{LR}; составляющей же $N_{22}^{TR}=\sum_{i=1}^{N}N_{22}^{Ti}\,\bar{\delta}(x_2-x_2^i)$ в случае узких ребер можно пренебречь.

Мы видим, что основной вклад в формирование силовых факторов, действующих в ребрах, вносят ребра именно тех направлений, в которых эти силовые факторы и рассматриваются. Составляющие данных силовых факторов, обусловленные ребрами трансверсального направления, очевидно, «не успевают развиться» на отрезках сравнительно малой длины $r_i^{(1)}$ или $r_j^{(2)}$, на концах которых они равны нулю.

Таким образом, в случае подкрепления оболочки относительно узкими ребрами (имеющими высоту в 3–5 раз больше их ширины) выражения для внутренних силовых факторов целесообразно упростить, приняв их в следующем приближенном виде (на примере линейно упругого ортотропного материала):

$$N_{11}=G_{11}\left[(h+\bar{F}_2)(\varepsilon_{11}+\mu_2\varepsilon_{22})+\bar{S}_2(\mathrm{X}_{11}+\mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$N_{22}=G_{22}\left[(h+\bar{F}_1)(\varepsilon_{22}+\mu_1\varepsilon_{11})+\bar{S}_1(\mathrm{X}_{22}+\mu_1\mathrm{X}_{11})\right];$$

$$N_{12}=G_{12}\left[(h+\bar{F}_2)\gamma_{12}+\bar{S}_2 2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$N_{21}=G_{12}\left[(h+\bar{F}_1)\gamma_{12}+\bar{S}_1 2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$M_{11}=$$

$$=G_{11}\left[\bar{S}_2(\varepsilon_{11}+\mu_2\varepsilon_{22})+\left(\frac{h^3}{12}+\bar{J}_2\right)(\mathrm{X}_{11}+\mu_2\mathrm{X}_{22})\right];$$

$$M_{22}=$$

$$=G_{22}\left[\bar{S}_1(\varepsilon_{22}+\mu_1\varepsilon_{11})+\left(\frac{h^3}{12}+\bar{J}_1\right)(\mathrm{X}_{22}+\mu_1\mathrm{X}_{11})\right];$$

$$M_{21}=G_{12}\left[\bar{S}_1\gamma_{12}+\left(\frac{h^3}{12}+\bar{J}_1\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$M_{21}=G_{12}\left[\bar{S}_1\gamma_{12}+\left(\frac{h^3}{12}+\bar{J}_1\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$Q_{13}=cG_{13}(h+\bar{F}_2)\Phi_1;\quad Q_{23}=cG_{23}(h+\bar{F}_1)\Phi_2.$$

Здесь

$$\bar{F}_1=\sum_{j=1}^{M}F_j^{(2)}\,\bar{\delta}(x_1-x_1^j);\quad \bar{F}_2=\sum_{i=1}^{N}F_i^{(1)}\,\bar{\delta}(x_2-x_2^i);$$

$$\bar{S}_1=\sum_{j=1}^{M}S_j^{(2)}\,\bar{\delta}(x_1-x_1^j);\quad \bar{S}_2=\sum_{i=1}^{N}S_i^{(1)}\,\bar{\delta}(x_2-x_2^i);$$

$$\bar{J}_1=\sum_{j=1}^{M}J_j^{(2)}\,\bar{\delta}(x_1-x_1^j);\quad \bar{J}_2=\sum_{i=1}^{n}J_i^{(1)}\,\bar{\delta}(x_2-x_2^i).$$

Задание ребристой оболочки в виде оболочки ступенчато переменной толщины применялось в работах Д.В. Вайнберга и И.З. Райтфарта, Л.В. Енджиевского, В.М. Жгутова, П.А. Жилина, В.В. Карпова, И.Н. Преображенского и др. [1, 9].

Для некоторых частных случаев целесообразно найти приведенную жесткость ребер в силовых факторах. Например, для оболочек, подкрепленных узкими ребрами, можно положить $N_{22}^{Ti}=0$ (на отрезках длиной $r_i^{(1)}$) и $N_{11}^{Tj}=0$ (на отрезках длиной $r_j^{(2)}$).

Тогда $\bar{\delta}(x_1-x_1^j)\approx r_j^{(2)}\delta(x_1-x_1^j)$ и $\bar{\delta}(x_2-x_2^i)\approx$ $\approx r_i^{(1)}\delta(x_2-x_2^i)$. Отсюда следуют выражения, аналоги которых (для изотропных оболочек) встречаются в литературе [9], принимаемые там интуитивно:

$$N_{11}^{R}=G_{11}\sum_{i=1}^{N}\left(F_i^{(1)}r_i^{(1)}\varepsilon_{11}-S_i^{(1)}r_i^{(1)}\mathrm{X}_{11}\right)\delta(x_2-x_2^i);$$

$$N_{22}^R = G_{22}\sum_{j=1}^{M}\left(F_j^{(2)}r_j^{(2)}\varepsilon_{22} - S_j^{(2)}r_j^{(2)}\mathrm{X}_{22}\right)\delta(x_1 - x_1^j).$$

Если «размазать» жесткость ребер по всей оболочке, то получим

$$N_{11}^R = G_{11}\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{F_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b}\varepsilon_{11} - \sum_{i=1}^{N}\frac{S_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b}\mathrm{X}_{11}\right);$$

$$N_{22}^R = G_2\left(\sum_{j=1}^{M}\frac{F_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a}\varepsilon_{22} - \sum_{j=1}^{M}\frac{S_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a}\mathrm{X}_{22}\right).$$

Метод конструктивной анизотропии для ортотропных и изотропных ребристых оболочек

При большом числе подкрепляющих оболочку ребер с различными жесткостями в направлениях координатных линий x_1 и x_2 жесткостные характеристики $\overline{F}(x_1, x_2)$, $\overline{S}(x_1, x_2)$, $\overline{J}(x_1, x_2)$ в силовых факторах существенно различаются по направлениям x_1 и x_2.

Рассмотрим составляющие усилия $N_{11}^R = N_{11}^{LR} + N_{11}^{TR}$, определяемые соотношениями (3) и (4).

В формировании N_{11}^{LR} участвуют жесткости ребер направления x_1 (x_1-ребра). Поэтому данная составляющая N_{11}^R с приведенной жесткостью ребер (коэффициент приведения $\frac{a}{a}$) будет иметь вид

$$N_{11}^{LR} \approx \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{r_i^{(1)}}{b}N_{11}^{Li}\right)\frac{a}{a} =$$

$$= G_{11}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{F_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b}\varepsilon_{11} + \frac{S_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b}\varphi_1\right).$$

В формировании N_{11}^{TR} участвует жесткость ребер направления x_2 (x_2-ребра), которые расставлены в местах $a_j \le x_1 \le b_j$, а также пересечения ребер разных направлений. Следовательно, указанная составляющая N_{11}^R с приведенной жесткостью ребер (коэффициент приведения $\frac{r_j^{(2)}}{a}$) будет иметь вид

$$N_{11}^{TR} \approx \sum_{j=1}^{M}\left(\frac{r_j^{(2)}}{a}N_{11}^{Tj}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a} =$$

$$= G_{11}\sum_{j=1}^{M}\left[\left(\frac{F_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} - \sum_{i=1}^{N}\frac{F_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a}\varepsilon_1 + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{S_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} - \sum_{i=1}^{N}\frac{S_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a}\varphi_1\right].$$

Если обозначить

$$F_1 \equiv \sum_{i=1}^{N}\frac{F_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} + \sum_{j=1}^{m}\left(\frac{F_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} - \sum_{i=1}^{N}\frac{F_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a};$$

$$S_1 \equiv \sum_{i=1}^{N}\frac{S_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} + \sum_{j=1}^{m}\left(\frac{S_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} - \sum_{i=1}^{N}\frac{S_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a},$$

то усилия N_{11}^R примут вид

$$N_{11}^R = G_{11}(F_1\varepsilon_1 + S_1\varphi_1).$$

Аналогично можно выразить усилия N_{22}^R с учетом соотношений (5) и (6):

$$N_{22}^R = G_{22}(F_2\varepsilon_2 + S_2\varphi_2),$$

где

$$F_2 \equiv \sum_{j=1}^{M}\frac{F_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} + \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{F_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} - \sum_{j=1}^{M}\frac{F_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_i^{(1)}}{b};$$

$$S_2 \equiv \sum_{j=1}^{M}\frac{S_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} + \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{S_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} - \sum_{j=1}^{M}\frac{S_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_i^{(1)}}{b},$$

Таким же образом

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N}\frac{J_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} + \sum_{j=1}^{M}\left(\frac{J_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} - \sum_{i=1}^{n}\frac{J_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_j^{(2)}}{a};$$

$$J_2 = \sum_{j=1}^{M}\frac{J_j^{(2)}r_j^{(2)}}{a} + \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{J_i^{(1)}r_i^{(1)}}{b} - \sum_{j=1}^{M}\frac{J_{ij}r_i^{(1)}r_j^{(2)}}{ab}\right)\frac{r_i^{(1)}}{b}.$$

При этом выражения внутренних силовых факторов (усилия и моменты) для конструктивно-ортотропной оболочки, равновесной по жесткости исходной ребристой оболочке, будут определяться следующими выражениями:

$$N_{11} = G_{11}[(h + F_1)\varepsilon_1 + S_1\varphi_1];$$

$$N_{22} = G_{22}[(h + F_2)\varepsilon_2 + S_2\varphi_2];$$

$$N_{12} = G_{12}\left[(h + F_2)\gamma_{12} + S_2 2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$N_{21} = G_{12}\left[(h+F_1)\gamma_{12} + S_1 2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$M_{11} = G_{11}\left[S_1\varepsilon_1 + \left(\frac{h^3}{12} + J_1\right)\varphi_1\right];$$

$$M_{22} = G_{22}\left[S_2\varepsilon_2 + \left(\frac{h^3}{12} + J_2\right)\varphi_2\right];$$

$$M_{12} = G_{12}\left[S_2\gamma_{12} + \left(\frac{h^3}{12} + J_2\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$M_{21} = G_{12}\left[S_1\gamma_{12} + \left(\frac{h^3}{12} + J_1\right)2\mathrm{X}_{12}\right];$$

$$Q_{13} = cG_{13}(h+F_1)\Phi_1; \quad Q_{23} = cG_{23}(h+F_2)\Phi_2.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жгутов, В.М.** Математические модели деформирование оболочек переменной толщины с учетом различных свойств материалов [Текст] / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал.— 2012.— № 1.— С. 79–90.— URL: http://engstroy.spb.ru/index_2012_01/jgutov.html.

2. **Кочин, Н.Е.** Векторное исчисление и начала тензорного исчисления [Текст] / Н.Е. Кочин.— М.: Наука, 1965.— 428 с.

3. **Компанеец, А.С.** Курс теоретической физики [Текст] / А.С. Компанеец.— М.: Гостехиздат, 1957.— 564 с.

4. **Жгутов, В.М.** Метод конструктивной анизотропии для ортотропных и изотропных ребристых оболочек [Текст] / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 8.— С. 40–46.— URL: http://engstroy.spb.ru/index_2009_08/zhgoutov1.html.

5. **Жгутов, В.М.** Ответ профессору Карпову Владимиру Васильевичу (о научном приоритете в методе конструктивной анизотропии для ребристых оболочек и на функционал, описывающий ползучесть их материала) [Текст] / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал.— 2011. № 3.— С. 75–80.— URL: http://engstroy.spb.ru/index_2011_03/zhgoutov.html.

6. **Жгутов, В.М.** К вопросу о законах распределения перемещений по толщине оболочек в математическом моделировании их деформирования (модели Кирхгофа — Лява и Тимошенко — Рейсснера) [Текст] / В.М. Жгутов // Пространственные конструкции зданий и сооружений (исследование, расчет, проектирование, применение): Сб. статей. Вып. 13 / МОО «Пространственные конструкции»; под ред. В.В. Шугаева и др.— М., 2011.— С. 116–123.

7. **Жгутов, В.М.** Математические модели деформирования ортотропных и изотопных ребристых оболочек при учете ползучести материала [Текст] / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 7.— С. 46–54.— URL: http://engstroy.spb.ru/index_2009_07/zhgoutov1.html.

8. **Жгутов, В.М.** Математическая модель деформирования нелинейно-упругих ребристых оболочек при больших перемещениях [Текст] / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 6.— С. 16–24.— URL: http://engstroy.spb.ru/index_2009_06/zhgoutov.html.

9. **Карпов, В.В.** Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования: Учебное пособие / В.В. Карпов, О.В. Игнатьев, А.Ю. Сальников— М.: АСВ; СПб: СПбГАСУ, 2002.— 420 с.

УДК 378.1

В.А. Шамахов,

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ИНСТИТУТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Современное высшее учебное заведение представляет собой сложнейший научно-образовательно-хозяйственный комплекс, управление развитием которого — исключительно нетривиальная задача для любого менеджера.

В специальной литературе достаточно давно дискутируются основные проблемы управления развитием вуза, среди которых хотелось бы отметить следующие:

кризис (признаваемый сегодня практически всеми специалистами — и теоретиками, и практиками) традиционной для отечественной высшей школы модели управления высшим учебным заведением;

качественное изменение форм и методов формирования и развития интеллектуального потенциала и человеческого капитала в современном мире;

разносторонний характер деятельности вуза, в силу чего возникает необходимость разработки алгоритмов управления развитием принципиально различных сфер — научно-исследовательской, образовательной, экспертно-консультативной, административной, хозяйственно-экономической (сюда можно добавить также социальную и социально-ориентированную внеучебную сферы деятельности). При этом нужно учитывать, что указанные сферы деятельности различны по содержанию, но находятся в неразрывной взаимосвязи и системном взаимодействии, что на порядок усложняет задачу управления развитием.

Наконец, не будем забывать о том, что, как и любой процесс, процесс развития управляем лишь до определенной степени, причем в отношении вуза это проявляется, на наш взгляд, острее, чем для любой иной организации.

Полноценно раскрыть указанные проблемы управления развитием вуза в формате статьи не представляется возможным. В этой связи обозначим лишь концептуальные основы внедряемой в настоящее время модели управления развитием Северо-Западного института управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (далее — Институт).

Первое, с чего мы начали процесс реформирования нашего вуза, — это объединение всех без исключения сотрудников и обучающихся общей идеей, формирование в умах коллег, студентов и слушателей четкого понимания идеологии дальнейшего развития Института.

С этой целью в 2011 году мной как лидером процесса реформирования были обозначены пять ключевых идей (получивших признание как идеология «5М»):

1. Модернизация — внедрение современных информационно-коммуникационных технологий в образовательную среду.

2. Мобилизация — повышение производительности труда.

3. Мотивация — преодоление сопротивления изменениям.

4. Мировоззрение — придание нового видения целенаправленным, организованным, осмысленным действиям по развитию Института.

5. Материализация — реализация задуманного на условиях постоянного, ежедневного, непрерывного улучшения.

Чтобы коллектив Института двигался в направлении модернизации, повышения качества работы и в целях преодоления информационных шумов, обеспечения транспарентности внутренней среды, которые неизбежно сопровождают любые изменения в организации, мною инициированы три проекта:

1. **Лифт инноваций.** Любой член коллектива — студент, преподаватель, работник может напрямую обратиться ко мне с инновационными идеями по развитию Института. Каждое предложение я рассматриваю лично. Сегодня в «лифте» более 30 проектов, три из них нашли свое практическое воплощение, еще ряд находится в разработке.

2. **Видео-блог.** Еще один мощный инструмент прямого взаимодействия директора Института и коллектива. На высшем уровне управления обсуждаются многие проблемы. Не всегда результаты обсуждения и принятые решения корректно доводятся до коллектива. Понимая это, мы создали общественную видео-приемную, где я как руководитель Института довожу до коллектива основные позиции, на основе которых принимаются наиболее важные для деятельности Института решения.

3. **Трансляция заседаний Ученого совета в интернете** — важный элемент системы открытости, прозрачности принимаемых решений. Это позволяет каждому присутствовать виртуально на заседаниях Ученого совета.

Ключевые составляющие идеологии «5М» находят свое реальное воплощение в основных направлениях сосредоточения усилий руководства Института, которые можно сформулировать так:

1. Управление человеческими ресурсами — поддержка «актуальности» работников и профессорско-преподавательского состава, введение системы материального стимулирования по результатам, стимулирование формирования научных школ и т.п.

Мы исходим из того, что каждый субъект (администрация, сотрудники, преподаватели, студенты), участвующий в жизни Института, становится участником процесса ее планирования. Таким образом, результаты реформирования вуза воспринимаются им как личные, а участие в этом процессе приносит удовлетворение потребностей научно-педагогических, административных кадров Института, студенческого сообщества.

2. Фундаментальные и прикладные научные исследования — создание на базе Института Центра превосходства в сфере публичной власти и управления (информационно-консалтинговые центры, научно-техническое сотрудничество, информационно-аналитическое продвижение, создание семи «Think Tanks» центров).

3. Новые образовательные технологии — модернизация структуры учебных программ, совершенствование организации учебного времени, контроль качества образовательных результатов.

4. Интерактивная академическая среда — внедрение современных систем управления и информационно-коммуникационных технологий в образовательную среду, максимальная открытость процесса принятия решений.

5. Материально-техническая база — создание Санкт-Петербургского кампуса. Внедрение стандарта по разработке систем управления охраной здоровья и безопасностью персонала на базе международного стандарта Occupational Health and Safety Management Systems — OHSAS 18001.

Инструментами формирования среды, отвечающей философии Total Quality Management, для нас стали три международных стандарта.

Всем известный стандарт систем менеджмента качества ISO 9001-2008, в рамках которого мы уже внедрили проведение внутренних аудитов.

Ведется разработка методик по проведению аудитов второй стороны — потребителей услуг. Результатом данной работы станет не только выстраивание системы управления, адекватной современным управленческим практикам, но и запланированная в 2013 году международная сертификация систем менеджмента качества Института.

Второй стандарт, который мы принимаем к внедрению и поддержанию, — это OHSAS 18001 — стандарт по разработке систем управления охраной здоровья и безопасностью персонала (Occupational Health and Safety Management Systems). Стандарт направлен на комплексный контроль факторов различных рисков, обеспечения безопасного труда работников.

И, наконец, третий стандарт, принятый нами за основу развития, — это стандарты Европейской ассоциации гарантии качества высшего образования (ENQA). Соответствие разработанным ENQA стандартам и директивам внутренней и внешней оценки качества высшего образования общепризнанно рассматривается сегодня как ключевое условие признания вуза на Территории Европейского Высшего Образования (EHEA), объединяющей сегодня 42 государства. Стандарты и директивы ENQA приветствуют разнообразие национальных моделей гарантий качества высшего образования и оптимально соотносятся как с универсальными стандартами серии ISO 9000, так и с моделями делового совершенства EFQM, EQUIS и других.

На основе стандартов и директив ENQA планируется обеспечить максимально широкое, многоуровневое участие студентов в контроле качества образования.

Следует отметить, что традиционно проблему вовлечения студентов в обеспечение качества образовательного процесса рассматривают в контексте взаимодействия администрации вуза и органов студенческого самоуправления. Нам такой подход представляется неоправданно узким. Когда в 2011 году мы начали работу по актуализации системы менеджмента качества нашего вуза, что было вызвано процессами преобразования Северо-Западной академии государственной службы в Северо-Западный институт Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, мы исходили из принципиального понимания того, что участие студентов в мероприятиях по качеству не должно рассматриваться как нечто внешнее по отношению к учебному процессу, в который вовлечен студент, как некий дополнительный вид общественной работы или нагрузки. Весь комплекс мероприятий по качеству образования, научной и научно-исследовательской деятельности и участие студентов в этих мероприятиях рассматриваются как неотъемлемая часть процесса формирования академической среды и включения студента в указанную среду. На наш взгляд, активисты студенческого самоуправления могут быть лидерами, могут выступать процессорами определенных программ и направлений, но задача обеспечения качества может быть решена только на условиях активного вовлечения в мероприятия по качеству максимально большого числа студентов.

Таким образом, на наш взгляд, реализация стандартов и директив ENQA предполагает:

участие представительных органов студенческого самоуправления в разработке политики и целей Института в области качества;

создание студенческих комитетов по качеству образования при кафедрах, которые совместно с представительными органами студенческого самоуправления, иными студенческими организациями и сообществами будут осуществлять систематический, независимый и документированный процесс получения достоверных данных о состоянии образовательного процесса в Институте, в том числе относительно уровня преподавания учебных дисциплин, степени учебно-методического, материально-технического, информационного обеспечения учебного процесса, эффективности воспитательной и внеаудиторной работы;

расширение участия студенческих научных обществ, магистрантов и аспирантов в оценке качества научно-исследовательской работы в Институте, доступности и достаточности материально-технических, информационно-библиотечных ресурсов Института для научно-исследовательской деятельности студентов;

проведение конференций с участием студентов и преподавателей Института по вопросам качества образования (конференций по направлениям подготовки, по конкретным учебным дисциплинам, по блокам компетенций и т. д.).

По каждому из указанных международных стандартов мы намерены в течение 2012–2014 годов осуществить необходимый комплекс мероприятий по внедрению, сертификации, поддержанию в рабочем состоянии и улучшению.

В целях оценки эффективности усилий, предпринимаемых Институтом для достижения намеченных целей, мы приступили к разработке внутренних ключевых показателей эффективности, которые включают в себя около ста показателей результативности, качества, эффективности. Ожидаемый результат уже в краткосрочной перспективе — это структурированная система управления, упразднение дублирования в процессах, упорядочение информационных потоков.

Мы рассчитываем, что проводимая нами работа по внедрению системы менеджмента качества, внедрение лучших на сегодняшний день образовательных технологий и практик, применение методик оценки результативности, создание современной информационной среды позволят Северо-Западному институту управления стать полноценным Центром превосходства не только в Северо-Западном федеральном округе, но и заметным игроком на рынке образовательных, научных и консалтинговых услуг на Евразийском пространстве.

Имеются все объективные предпосылки к тому, чтобы к 2020 году Северо-Западный институт управления стал Центром превосходства национального уровня в области социально-экономических наук, обеспечивающим кадрами, исследованиями, проектными и консультативными разработками решение задач инновационного развития и обеспечения глобальной конкурентоспособности России. В числе этих предпосылок следующие:

1. Создание центров компетенций в партнерстве с работодателями (органы государственной власти и местного самоуправления, хозяйствующими субъектами). Центры компетенций призваны реализовывать следующие функции:

управление базами знаний / компетенций (их ведение, обновление, интеграцию, создание удобных поисковых механизмов);

выявление, формализацию и распространение неявных знаний / компетенций, формирующихся в Институте и у его партнеров;

слежение за новшествами в технологиях, методиках, процессах и появлением новых тенденций;

сбор и описание знаний / компетенций, полученных Институтом при выполнении конкретных проектов;

обеспечение коммуникаций между пользователями и внешними экспертами, которые владеют необходимыми знаниями / компетенциями;

защиту интеллектуальной собственности Института;

обучение новых сотрудников, передачу им накопленного опыта.

Применительно к научно-исследовательской и образовательной деятельности Института это позволит совместно модернизировать образовательные программы, строить целевую подготовку студентов, реализовывать профессиональные магистерские программы, имеющие корпоративную направленность, создавать учебно-производственные площадки и лаборатории. Стратегические партнеры будут участвовать в управлении Институтом через попечительский совет и наблюдательные комитеты по отдельным проблемным областям. Также через Совет по управлению целевым капиталом.

2. Уже сегодня Институт постепенно становится центром взаимодействия власти, бизнеса и общественных институтов через организацию площадок коммуникации, через систему консультационной поддержки и повышения квалификации кадров (порядка 70 % всех государственных и муниципальных служащих Санкт-Петербурга прошли повышение квалификации и переподготовку в стенах Института). Институт создаст инфраструктуру и обеспечит поддержку сетей обмена знаниями и виртуальных сообществ специалистов в области социально-экономических и гуманитарных наук, математики, информатики и их приложений.

3. Институт формирует новые рабочие партнерства с ведущими мировыми университетами (Франция, Германия, Китай, Канада, Турция, СНГ), международными организациями, исследовательскими консорциумами и научными изданиями, зарубежными компаниями и транснациональными корпорациями, в рамках которых будут реализованы программы академических обменов, совместные исследования и совместные образовательные программы (включая дистанционные), совместные сетевые журналы.

4. Ведется работа по созданию системы интернет-порталов по основным областям деятельности Института, через которые все желающие смогут получить бесплатный доступ к ключевым профессиональным и образовательным ресурсам; налажена система регулярного пополнения и рецензирования этих ресурсов, в том числе перевод наиболее значимых материалов на русский язык. Будет организовано сетевое взаимодействие Института с российскими и зарубежными вузами в сфере реализации программ повышения квалификации, созданы условия для стажировки преподавателей и целевой аспирантуры в СЗИ.

В ближайшей перспективе запланировано создание системы общедоступных (имеющих электронные версии) реферируемых двуязычных (русский — английский) журналов по всем направлениям деятельности Института.

5. Сетевой характер деятельности Института будет обеспечиваться развернутой программой поддержки академической мобильности. Не менее 30 % преподавателей и исследователей из СЗИ каждый год будут преподавать и проходить стажировки в университетах-партнерах. В свою очередь Институт будет ежегодно принимать сопоставимое количество зарубежных и отечественных специалистов на стажировку и для преподавания продолжительностью не менее двух недель. Каждый десятый студент Института за время обучения проведет не менее одного семестра в другом, зарубежном университете. В свою очередь СЗИ будет принимать не менее 100 студентов в год на обменные программы.

Ведущую роль в развитии Института будут играть выпускники, которые создадут профессиональную ассоциацию выпускников Института, станут основными поставщиками как баз для организации практики студентов, так и работодателями.

Особо хочу остановится на роли нашего Института в Корпоративном университете, формируемом РАНХиГС.

Мы исходим из того, что каждый филиал в составе РАНХиГС может выступить Центром превосходства в сфере, в которой он наиболее силен. Корпоративный университет может стать и постоянной дискуссионной площадкой для внутриакадемического конкурентного отбора лучших образовательных программ, технологий, методического обеспечения и иных инструментов, которые обеспечивают высокое качество услуг, оказываемых Президентской академией.

Северо-Западный институт может выступить Центром превосходства в следующих направлениях:

стандарты и регламенты государственных и муниципальных услуг и функций;

оценка качества государственного и муниципального управления;

совершенствование нормативно-правовых, научно-методических основ государственной и муниципальной службы, их кадрового обеспечения;

экспертно-консультационные услуги в области законопроектной и нормотворческой деятельности органов государственной власти и местного самоуправления;

организация государственного и муниципального заказа;

PR-технологии, в том числе в публично-правовой сфере.

Выбор представленных направлений обусловлен нашим многолетним опытом их разработки в реализации научно-исследовательской, образовательной и консультационной деятельности.

УДК 303.732.4

Е.А. Лифшиц

АНАЛИЗ УРОВНЯ МОТИВАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВУЗАХ

Основная цель нашей работы — разработка и применение системного подхода к управлению уровнем мотивации учащихся вузов на примере студентов Международного университета природы, общества и человека «Дубна». В статье представлены полученные при реализации этой задачи результаты:

методика расчета мотивационного потенциала как показателя эффективности образовательного процесса и заинтересованности студентов в учебе;

набор факторов, оказывающих наибольшее влияние на мотивационный уровень учащихся;

алгоритм совершенствования процесса обучения студентов на основе повышения уровня мотивации.

При выполнении работы использован комплекс методов системного анализа, включая математический, статистический, экспертный, а также методы системно-деятельностного подхода, теория классифицирования, информационные системы и технологии.

Создание набора показателей для измерения мотивационного потенциала

Идея метода близка к циклическим концепциям управления персоналом и процессам поиска оптимального решения, принятым в стратегическом менеджменте. В основу данного механизма положен новый метод формирования набора факторов, наиболее эффективно влияющих на уровень мотивированности. Исходя из концепции цикличности сформулирован метод, сущность которого состоит в том, что процесс успешного профессионального обучения каждого студента на практике реализуется в виде некоторого количества циклов, приводящих к повышению уровня мотивированности учащихся, а это, в свою очередь, приведет и к увеличению эффективности процесса обучения (отношение усвоенного знания к предъявленному).

При проведении исследований уровня мотивированности студентов за основу был взят метод Р. Хэкмана и Г. Олдхэма «Характеристики работы и формирование рабочих заданий» [2], адаптированный к образовательному процессу (рис. 1). Этот метод исследует взаимосвязи между отдельными характеристиками учебы и мотивацией студентов. Метод применяет изменения характеристик учебы для создания психологического состояния, которое приводит к улучшению личностных результатов учебы.

Данное взаимодействие было положено в основу анкеты исследования студентов, вопросы



Рис. 1. Взаимодействие факторов, мотивирующих учебу

которой позволяют получить количественные данные для каждой характеристики учебы по семибальной системе. Данные опроса были использованы для расчета мотивационного потенциала (МП) по формуле [2].

$$МП = \frac{1}{3}(РНУ + ОУЗ + ЗО)А \times ОС, \qquad (1)$$

где РНУ — разнообразие навыков учебы; ОУЗ — однозначность учебного задания; ЗО — значимость обучения; А — автономность учебного процесса для студентов; ОС — обратная связь (все это — контролирующие мотивационные-факторы).

Факторы, воздействующие на уровень мотивированности студентов, разработаны и получены авторами самостоятельно, экспериментальным путем в ходе эмпирических исследований. Вот их перечень:

Наиболее интересные виды учебного процесса, делающие учебу разнообразнее (РНУ)

1. Запись лекций.
2. Лабораторные работы.
3. Игровые ситуации.
4. Тренинги.
5. Ситуационные задачи.
6. Коллоквиумы.
7. Контрольные работы.
8. Самоподготовка в группах.
9. Практическая работа.
10. Спортивные мероприятия.
11. Творческая работа (доклады, рефераты и т.п.).
12. Маркетинговые исследования.
13. Преподавание студентов.
14. Медиасопровождение занятий.
15. Решение задач.
16. Прослушивание специального курса на английском языке.
17. Занятия с практикующим специалистом фирм.

Задействованные навыки и способности, делающие учебу разнообразнее (РНУ)

1. Логическое мышление.
2. Накопленный опыт и знания.
3. Навыки самостоятельной работы.
4. Работа в группах, коммуникабельность.
5. Усидчивость.
6. Абстрактное мышление.
7. Артистизм.
8. Творческое мышление.
9. Организаторские способности.
10. Ораторское искусство.
11. Системный подход в решении задач.

Меры, делающие учебу определеннее (ОУЗ)

1. Введение модульной системы.
2. Интегрирование учебного и практического процессов.
3. Тесная связь преподавателей и студентов.
4. Составление студентами расписания.
5. Выдача учебных программ.
6. Практические занятия и экскурсии с участием фирм-работодателей.
7. Представление проектов студентов фирмам-работодателям.
8. Самостоятельный выбор студентами дополнительных предметов.

Меры, делающие учебу самостоятельнее (А)

1. Самостоятельный выбор тем творческих работ.
2. Самостоятельный выбор дополнительных предметов обучения.
3. Самостоятельный выбор преподавателей.
4. Самостоятельный выбор методов обучения.
5. Самостоятельный выбор методов отчетности.
6. Участие студентов в составлении расписания.
7. Свободное посещение занятий.

Способы усвоения знаний для обратной связи (ОС)

1. Я испытываю самоудовлетворение.
2. Я умею самостоятельно принимать окончательные решения.
3. Я востребован на рынке.
4. Я уверен в своих способностях и силах.
5. Я могу оценить преподавателей изучив дисциплину.

Внешние факторы, оказывающие воздействие на все характеристики учебы (ВФ)

1. Безработица.
2. Востребованность профессии.
3. Семья.
4. Законы об образовании.
5. Развитие современных технологий.
6. Климатические сезонные условия.
7. Альтернативное обучение в иных вузах.
8. Престижность профессии.
9. Уровень доходов в данной профессии.
10. Стабильность в обществе.

Алгоритм совершенствования процесса обучения студентов

Рассмотрим математические основы, которые обеспечивают систематизацию и анализ мотивации студентов. Пусть $Z(n, c, m, y)$ представляет собой массив данных респондента (анкета), принявшего участие в исследовании; компоненты массива z_{ij} — целые положительные числа от 1 до 17, которые соответствуют факторам, наиболее эффективно влияющим на студентов (2):

$$Z(n, c, m, y) = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} & \dots & 0 \\ z_{21} & z_{22} & \dots & \dots & z_{ij} & \dots & z_{217} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{81} & z_{82} & \dots & z_{810} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где n — номер респондента (в данных исследованиях от 1 до 100); c — номер курса студента (в данных исследованиях от 1 до 5); m — месяц исследования (март, ноябрь и апрель); y — год исследования (в данной работе с 2008-го до 2011 года).

Формулы (3)–(10) определяют области действия факторов, представленных элементами массива $Z(n, c, m, y)$:

$$z_{ij} \in F_1, z_{ij} \in [1,7] \quad \text{при } i = 1, j \in [1,5], \quad (3)$$

$$z_{ij} \in F_2, z_{ij} \in [1,17] \quad \text{при } i = 2, j \in [1,17], \quad (4)$$

$$z_{ij} \in F_3, z_{ij} \in [1,11] \quad \text{при } i = 3, j \in [1,11], \quad (5)$$

$$z_{ij} \in F_4, z_{ij} \in [1,8] \quad \text{при } i = 4, j \in [1,8], \quad (6)$$

$$z_{ij} \in F_5, z_{ij} = 1 \quad \text{при } i = 5, \quad (7)$$

$$z_{ij} \in F_6, z_{ij} \in [1,7] \quad \text{при } i = 5, j \in [1,7], \quad (8)$$

$$z_{ij} \in F_7, z_{ij} \in [1,5] \quad \text{при } i = 6, j \in [1,5], \quad (9)$$

$$z_{ij} \in F_8, z_{ij} \in [1,10] \quad \text{при } i = 7, j \in [1,10], \quad (10)$$

где F_1 — область ключевых характеристик учебы студентов; F_2 — область наиболее интересных студентам видов учебного процесса; F_3 — область задействованных студентами навыков и способностей; F_4 — область мер, делающих учебу студентов более определенной; F_5 — область мер, делающих учебу более значимой; F_6 — область мер, делающих учебу студентов более самостоятельной; F_7 — область способов усвоения знаний студентами; F_8 — область внешних мотивационных факторов студентов.

Область F_1 характеристик учебы построена на основании метода Хэкмана—Олдхэма. Области F_i (i = 2, ..., 8) разработаны на базе приведенного перечня. Причем область F_5 включает в себя лишь один фактор — «учеба важна», с которым соглашаются 100 % студентов, и исследованию не подвергается.

Допустимые операции с элементами массива (2) позволяют вычислить мотивационный потенциал заданной выборки групп студентов (11), средний мотивационный потенциал каждого курса различных годов исследования (12) и произвести анализ мотивационного потенциала, а также роли отдельных факторов, влияющих на интерес к учебе и концентрацию внимания студентов Университета «Дубна».

$$\text{МП}(n, c, m, y) = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3} z_{1j}^{ncmy} z_{1,4}^{ncmy} z_{1,4}^{ncmy}; \quad (11)$$

$$\text{МП}(c, m, y) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \text{МП}(j, c, m, y). \quad (12)$$

На базе изложенных расчетов скомпонован массив МП (13) мотивационных потенциалов студентов университета «Дубна», прошедших опрос в 2008–2011 годах, который является базой данных мотивационных потенциалов студентов за все годы исследования.

$$\text{МП} = \begin{pmatrix} \text{МП}(1, \text{март}, 2008) & \text{МП}(1, \text{апрель}, 2009) & \dots & \text{МП}(1, \text{апрель}, 2009) \\ \text{МП}(2, \text{март}, 2008) & \text{МП}(2, \text{апрель}, 2009) & \dots & \text{МП}(2, \text{апрель}, 2009) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{МП}(5, \text{март}, 2008) & \text{МП}(5, \text{апрель}, 2009) & \dots & \text{МП}(5, \text{апрель}, 2009) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Недостаток данного подхода — неограниченный рост массива МП по мере проведения новых исследований и накопления данных.

Создадим промежуточный массив S средних значений характеристик учебы различных курсов и лет исследования:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & \dots & S_{15} \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{ij} & \dots & S_{N5} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где $j \in [1, YY]$; $i \in [1,25]$; YY — количество проведенных исследований (в данном случае YY = 6);

Элементы массива S вычисляются по формуле

$$S_{j+5(c-1),my} = \frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N} z_{1,j}(l, c, m, y), \quad (15)$$

где c = 1, ..., 5 — номер курса;

my = 1 при m = март, y = 2008 год — первое исследование;

my = 2 при m = апрель, y = 2009 год — второе исследование;

my = 3 при m = ноябрь, y = 2009 год — третье исследование;

my = 4 при m = апрель, y = 2010 год — четвертое исследование;

my = 5 при m = ноябрь, y = 2010 год — пятое исследование;

my = 6 при m = ноябрь, y = 2011 год — шестое исследование.

Таким образом, массив S будет базой данных хранения обработанных характеристик учебы по курсам и годам исследования, а ее компоненты выражают следующие значения:

s_{ij} — средние характеристики студентов первого курса при $i \in [1,5]$;

s_{ij} — средние характеристики студентов второго курса при $i \in [6,10]$;

s_{ij} — средние характеристики студентов третьего курса при $i \in [11,15]$;

s_{ij} — средние характеристики студентов четвертого курса при $i \in [16,20]$;

s_{ij} — средние характеристики студентов пятого курса при $i \in [21,25]$;

s_{ij} — разнообразие учебы при i = 1, 6, 11, 16, 21;

s_{ij} —целостность учебы при i = 2, 7, 12, 17, 22;

s_{ij} —важность учебы при i = 3, 8, 13, 18, 23;

s_{ij} — автономность учебы при i = 4, 9, 14, 19, 24;

s_{ij} —обратная связь при i = 5, 10, 15, 20, 25.

Массив G построен на основе эмпирического психофизического закона Вебера—Фехнера*. Таким образом, компоненты g_{ij} массива G можно считать релятивными порогами различения для студентов, благодаря которому изменение факторов воздействия станет ощутимым и повлияет на мотивацию студентов. Релятивный порог говорит о том, что необходимо улучшить влияние наиболее популярных факторов за счет усиления эмоций, повышения наглядности, актуализации информации, перераспределения времени между факторами. Действие, которое ниже релятивного порога, не будет ощущаться студентами.

$$g_{ij} = \frac{s_{ij} - s_{ij-1}}{s_{ij-1}}, \qquad (16)$$

где $i \in [1,25]$; $j \in [1, YY]$.

Рекомендуется в первую очередь усиливать до величины релятивного порога те факторы, у которых $g_{ij} < 0$, т. е. наблюдается ухудшение показателей характеристики учебы. Положительное значение релятивного порога говорит о том, что за прошедший год характеристика учебы студентов улучшилась и можно не проводить работы по повышению уровня мотивации в области данного показателя.

На базе разработанной методики и математического аппарата построен алгоритм совершенствования процесса обучения студентов (рис. 2) [1]. Входными данными алгоритма служат массив $Z(n,c,m,y)$, полученный в исследованях, проведенных в течение определенного месяца года, мотивационный потенциал МП $(n,c,m,y-1)$, вычисленный на данных соответствующего периода, и массив релятивного порога G. (При первых исследованиях принимается, что МП$(n,c,m-1,y-1) = 0$, т. е. мотивационный потенциал студентов считается выросшим, и новые факторы-мотиваторы не выбираются.) Далее вычислялись мотивационные потенциалы N студентов курса по формуле (11) и их среднее значение по формуле (12). Если МП не уменьшается по сравнению с прошлым годом, то количество и качество факторов различных параметров не изменяется, т. е. считается, что уровень мотивации студентов достаточный и подбор мотивационных факторов в предшествующем году прошел успешно.

В случае снижения среднего потенциала курса производится дополнительный опрос студентов, на базе которого происходит расширение различных факторов мотивации и увеличение области массива $Z(n, c, m, y)$ и его компонент z_{ij}^{ncmy} (где $i \in [2,7]$, $j \in [1, 17]$) на коэффициенты k либо усиление интенсивности воздействия на коэффициент релятивного порога:

$$F_i = F_i + kF_i; \qquad (17)$$

$$F = F + GF. \qquad (18)$$

* Закон Вебера—Фехнера заключается в том, что число, выражающее отношение между добавочным раздражением, которое ощущается как заметное изменение, и основным раздражением, называется *релятивным порогом различения*, который представляет собой постоянную величину dr/r = const, где dr — величина дополнительного раздражения, а r — величина основного раздражения.

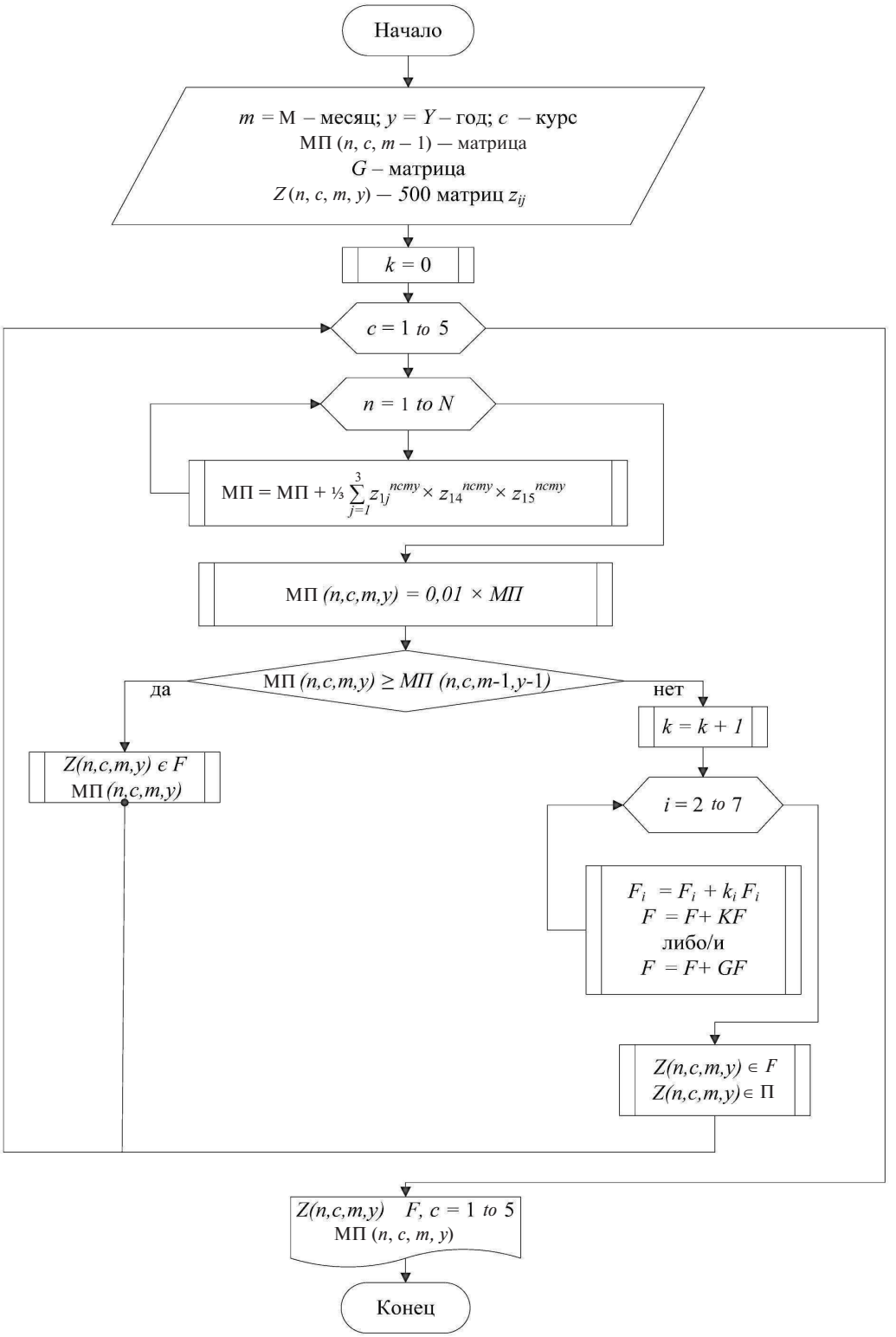


Рис. 2. Алгоритм совершенствования процесса обучения студентов

Подробнее уравнение (18) можно представить так:

$$F_2 = F_2 + F_2 g_{1+5(c-1),yy};$$

$$F_3 = F_3 + F_3 g_{2+5(c-1),yy};$$

$$F_4 = F_4 + F_4 g_{3+5(c-1),yy};$$

$$F_5 = F_5 + F_6 g_{4+5(c-1),yy};$$

$$F_6 = F_6 + F_6 g_{5+5(c-1),yy};$$

$$F_7 = F_7 + F_7 g_{6+5(c-1),yy}.$$

Данные циклы для c є [1, 5] позволяет для каждого курса подобрать факторы мотивации, дкоторые окажут непонижающее влияние на уровень мотивации студентов определенного года. Как показали наблюдения, набор факторов мотивации для каждого поколения отличается незначительно, изменяется лишь значимость факторов для студентов. Поэтому в ходе исследования принято допущение о том, что набор факторов для различных курсов каждого года неизменен.

Выходными данными будут МП(c, m, y) — функции среднего мотивационного потенциала курса периода my — и массив $Z(n, c, m, y)$ — набор факторов мотивации, компонентами z_{ij}^{ncm} которого будут:

при $i = 1$ — характеристики учебы, по которым можно вычислить МП студентов различных курсов;

при i є [2, 8] — набор факторов мотивации, оказывающий непонижающий эффект на студентов различных курсов.

Данный алгоритм позволяет системно подойти к процессу повышения уровня мотивированности учащихся.

Исследования мотивационного потенциала студентов

Алгоритм, изображенный на рис. 2, был применен к исследованию мотивации студентов Университета «Дубна» в 2011 году, при этом учитывались данные характеристик учебы в течение двух лет исследования, проведенных в ноябре 2010 года и ноябре 2011 года. Рис. 3 демонстрирует изменение уровня мотивированности студентов различных курсов этих годов. Представленный анализ показал, что на 1, 2, 3 и 5 курсах МП в ноябре 2011 года повысился, на 4 курсе — уменьшился.

Для повышения уровня мотивированности студентов 4 курса был применен алгоритм совершенствования процесса обучения студентов (рис. 2). Рассмотрим факторы, которые оказали наибольшее влияние на снижение МП данных студентов. Для этого обратимся к массиву релятивного порога студентов Университета. На рис. 4 представлены релятивные пороги четверокурсников в зависимости от характеристик учебы.

В первую очередь необходимо улучшить те характеристики учебы студентов 4 курса 2011 года, релятивные пороги которых имеют отрицательные значения: важность, обратную связь, целостность и разнообразие. Фактор автономности студентов 4 курса в 2011 году улучшился, и данный компонент учебы решено было не изменять. В ином случае, согласно опросу, в первую очередь следовало обратить внимание на такие популярные среди студентов факторы,

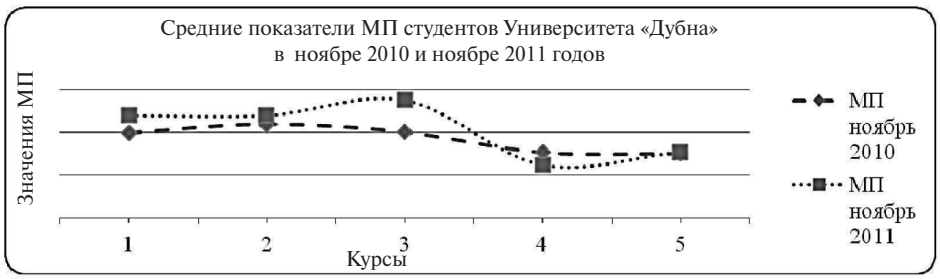


Рис. 3. Мотивационные потенциалы студентов Университета «Дубна» в ноябре 2010 и ноябре 2011 годах

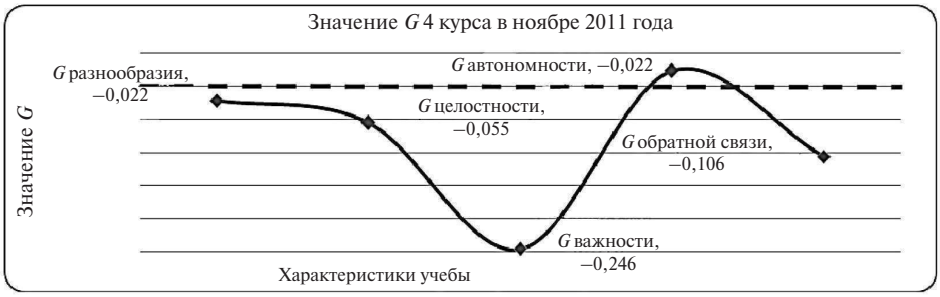


Рис. 4. Релятивные пороги различных характеристик учебы студентов 4 курса Университета «Дубна» в ноябре 2011 года

как самостоятельный выбор творческих работ и дополнительных предметов.

Наибольшему ухудшению подверглась характеристика «важность», она упала на 24,6 %. Это говорит о снижении агитационной работы руководства города и Университета среди молодежи. Кроме того, негативно на данной тенденциии сказался отказ от системы кураторства у старшекурсников. Необходимо внедрение новых форм агитации или увеличение (на 24,6 %) интенсивности воздействия старых методов убеждения молодежи в важности учебы, таких, как выступление ректора, руководства и выпускников Университета, представителей городской администрации и общественности по местному и внутриуниверситетскому радио, влияние родных и близких, друзей, которых следует приглашать на университетские мероприятия.

Для улучшения показателя «важность» было предпринято следующее:

в процессе изучения дисциплины «Организационное поведение» в темах «Трудовая мотивация», «Методы проектирования рабочего места», «Лидерство», «Власть» и «Конфликты» была подчеркнута важность подготовки менеджеров, непрерывного обучения персонала для эффективной и продуктивной работы предприятия, карьерного роста, овладения такими навыками управления, как мотивация, лидерство, власть, предсказание конфликтов и быстрое разрешение их. Данной теме было посвящено на 24,6 % времени больше, чем в предыдущем году, что составило 0,123 часа в год согласно формуле

$$\text{ДВВ} = 0{,}5\ \text{часа}\frac{\text{лекций}}{\text{год}} \cdot 24{,}6\,\% = 0{,}123\frac{\text{часа}}{\text{год}}, \quad (19)$$

где ДВВ — дополнительное время взаимодействия в год. Это время, которое составило 0,623 часа/год, дополнительно уделялось разъяснению важности обучения студентов различным навыкам управления в процессе обучения в вузе;

студенты кафедры менеджмента 4 курса принимали участие в исследованиях уровня мотивированности учащихся Университета, имели возможность сравнить данные 2011 и предыдущих лет. Стоит высказать предположение, что это сыграло особую роль в осознании студентами значимости роли молодежи для совершенствования учебного процесса Университета, в частности значительно помогло им осознать роль каждого из них в системе образования Университета.

проведена дистанционная (Бостон—Дубна) лекция доктора физико-математических наук директора по разработке инновационных продуктов консультационной компании GEN3 Partners, Inc Михаила Вербицкого на тему «Маркетинг завтрашнего дня — Инновационный процесс создания нового товара».

Обратная связь уменьшилась на 10,6 %.

Количественные показатели мотивационных факторов обратной связи студентов 4 курса, выявленные в ходе исследования ноября 2011 года, выглядят следующим образом:

Факторы воздействия	4 курс (чел)
1. Я испытываю самоудовлетворение	37
2. Я умею самостоятельно принимать окончательные решения	54
3. Я востребован на рынке	30
4. Я уверен в своих способностях и силах	52
5. Я могу оценить преподавателей по окончании изучения дисциплины	30

Необходимо добиваться, чтобы студенты испытывали чувство самоудовлетворения, могли

самостоятельно принимать решения, чувствовали свою востребованность, уверенность в своих силах и способностях, четко оценивали роль преподавателей в своем учебном процессе (см. таблицу). Для этого преподавателям необходимо чаще общаться со студентами, в том числе на неформальном уровне. Для стабилизации и усиления этого компонента учебного процесса вполне возможно развивать систему кураторства на старших курсах, организовывать администрацией Университета и кафедрами часы «открытых дверей» для студентов и\или увеличить интенсивность личного восприятия студентами полученных знаний и опыта на 10,6 %.

В рамках улучшения данного показателя было предпринято следующее:

студентам предложены ситуационные задачи, за решение каждой из которых выставлялись бальные оценки за самостоятельность и нетрадиционность принятого решения (реальность предложений не оценивалась), причем студент должен был сам, с полной уверенностью в своей правоте доказать и защитить его на семинарских занятиях. В течение семестра всем студентам была предоставлена такая возможность;

увеличена интенсивность взаимодействия студентов и преподавателей, а именно, организованы дополнительные индивидуальные консультации преподавателя по дисциплине «Организационное поведение» для студентов кафедры менеджмента (1 час в месяц) согласно расчетам по формуле

$$\text{ДВВ} = 3\ \text{часа}\frac{\text{лекций}}{\text{неделя}} \cdot 5б5\,\% = 0{,}16\frac{\text{часа}}{\text{неделя}}, \quad (20)$$

где ДВВ — дополнительное время взаимодействия в неделю.

При проведении мероприятий по улучшению уровня мотивированности студентов не было учтено влияние предложенных мер на все характеристики учебы. Аналогичные рассуждения можно произвести с результатами исследования остальных характеристик учебы и учащихся других курсов и вузов для улучшения уровня мотивированности этих студентов.

Как показали исследования, проведенные после дистанционной лекции Бостон—Дубна, МП студентов 4 курса сразу увеличился на 5,59 единиц и составил 54,32. Если мотивация 4 курса будет расти такими же темпами, то можно было ожидать, что к концу 2011 года МП превзойдет показатель 2010 года, который составлял 61,06.

В статье продемонстрировано создание методики расчета мотивационного потенциала студентов на базе метода системного анализа. Проведены исследования, в ходе которых методика была модифицирована за счет обратной связи со студентами. Обнаружено постоянство набора показателей, которые считают значимыми сами респонденты. Найдена динамика изменения мотивационного потенциала студентов в процессе обучения. Обнаружена закономерность скачкообразного изменения мотивационного потенциала студентов на 3 курсе.

Предложенный в работе алгоритм совершенствования процесса обучения студентов позволяет формализовать процесс мотивации обучающихся, провести исследования уровня их мотивированности и повысить его за счет применения мотивационных факторов, что способствует повышению эффективности учебного процесса в плане увеличения доли усвоения предъявленного материала.

Изменение входных данных алгоритма (в первую очередь мотивационных факторов, специфичных для исследуемой организации) позволит использовать его в организациях и заведениях различных профилей, что поможет обеспечить устойчивую и эффективную работу персонала этих предприятий. В условиях глобализации рыночной среды объективно необходим поиск новых форм и методов управления, позволяющих организациям успешно адаптироваться к динамике внешнего окружения, рационально использовать все компоненты производственно-рыночного потенциала, наращивать конкурентные преимущества и создавать реальные предпосылки к обеспечению устойчивого развития в стратегической перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лифшиц, Е.А.** Исследования мотивационного потенциала студентов для усовершенствования процесса обучения [Текст] / Е.А. Лифшиц // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление: электронное научное издание.— URL: www.rypravlenie.ru 2009. Т. 2. — С.30–40.

2. **Hackman, J.R.** Work Design [Текст] / J.R. Hackman J. Richard Hackman and J. Lloyd Suttle (eds.).— Improving Life at Work.— Goodyear.— Santa Monica, Calif.— 1977.— P. 129.

УДК 621.039.566

В.И. Гуменюк,Б.С. Доброборский ,М.Е. Федосовский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

Аварии на энергетических объектах зачастую приводят к значительному материальному ущербу, а иногда и к человеческим жертвам.

Поэтому на персонал энергетических объектов возлагается высокая, вплоть до уголовной, ответственность за нарушения требований обеспечения безопасности этих объектов, а правила оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике утверждены правительством РФ.

При возникновении предпосылок для возможного наступления чрезвычайных ситуаций от персонала требуется выполнение грамотных и оперативных действий, направленных на предотвращение наступления этих ситуаций и минимизации последствий в случае их наступления в соответствии с действующими правилами и инструкциями.

Однако указанные действия персоналу приходится выполнять в условиях исключительно высокого нервного напряжения, часто приводящего к стрессу, неадекватному поведению, принятию заведомо ошибочных решений и совершению ошибочных действий. Физиологическая причина такого поведения персонала — недостаточная фенотипическая адаптация к этим условиям.

Для решения названных проблем учебными программами предусматриваются проведение специальных тренировок, в частности с использованием специальных тренажеров производства ЗАО «ТЭСТ», с помощью которых производится обучение персонала электрических станций (ТЭЦ, ГРЭС, ГЭС, АЭС) и сетевых предприятий (тепловых и электрических).

В номенклатуру оборудования, производимого и поставляемого ЗАО «ТЭСТ», входят всережимные полномасштабные (щитовые) и компьютерные тренажеры, оснащенные развитым учебно-методическим обеспечением, а также автоматизированные учебные курсы по всему парку теплотехнического, электротехнического и водоподготовительного оборудования, изготавливаемого как российскими, так и зарубежными заводами.

Система подготовки персонала с использованием тренажеров ЗАО «ТЭСТ» включает две ступени:

изучение оборудования и технологических процессов (получение знаний) с помощью специально разработанных компьютерных программ и экзаменаторов;

обучение навыкам ведения штатных, нештатных и аварийных режимов (получение навыков и умений) на специально разработанных тренажерах, адекватно имитирующих как технологические процессы, так и рабочее место оператора.

Такой подход к решению проблемы повышения надежности функционирования персонала в определенной степени обеспечивает навыки работы в перечисленных ситуациях (аналогичный подход широко применяется и в других отраслях — при обучении авиадиспетчеров, водителей автотранспорта и некоторых других).

Однако нерешенной проблемой в вопросе подготовки персонала энергетических объектов является объективная количественная оценка физиологического состояния работников энергетических объектов и их способности к работе в чрезвычайных ситуациях, которая зависит от целого ряда факторов внешней среды и внутреннего состояния человека-оператора.

Основные факторы внешней среды — это физиологические и психологические нагрузки.

К основным физиологическим факторам внешней среды относят такие, как физические нагрузки, вибрация и шум, освещение, влажность и многие другие. К основным психологическим нагрузкам следует относить степень ответственности за принимаемые решения и степень опасности при выполнении работ.

По всем этим параметрам разработаны и действуют соответствующие нормативные до-

кументы: стандарты, санитарные нормы и правила, гигиенические нормативы, правила техники безопасности и др.

Требования этих документов на энергетических объектах безусловно выполняются, чем в определенной степени гарантируется безопасность труда оперативного персонала.

Однако при наступлении чрезвычайных ситуаций (пожар, авария, катастрофа) и их ликвидации условия окружающей среды часто опасны для жизни. Несмотря на это, оперативные работники обязаны принимать правильные решения.

Человеку свойственно ошибаться при любых условиях, как в нормальной рабочей обстановке, так и при чрезвычайных ситуациях.

Изменение вероятности отказов человека в нормальных условиях в течение рабочей смены подчиняется законам термодинамики биологических систем и закону действующих масс.

График изменения вероятности отказов человека в течение рабочей смены представлен на рис. 1.

Как видно из графика, в самом начале смены имеется повышенная, но быстро уменьшающаяся вероятность отказов, связанная с необходимостью оперативной фенотипической адаптации к производственной обстановке. Затем на протяжении нескольких часов происходит процесс постепенного накопления утомления и сопряженного с ним увеличения вероятности отказов, который переходит в конечном итоге к значительному утомлению и значительному увеличению вероятности отказов.

Особенность этих процессов — в том, что они являются следствием биохимических реакций, объем ингредиентов которых жестко ограничен, в связи с чем время функционирования организма человека в состояниях бодрствования и сна также жестко ограничено. Эти функции не имеют способностей к фенотипической адаптации, поэтому человека невозможно в результате тренировок научить жить в ритме, значительно отличающемся от суточного.

Поэтому физиологическое состояние организма человека в значительной степени зависит от того, в какую смену он работает — первую, вторую или третью. Причем периодическое изменение рабочих смен и связанная с этим необходимость оперативной фенотипической

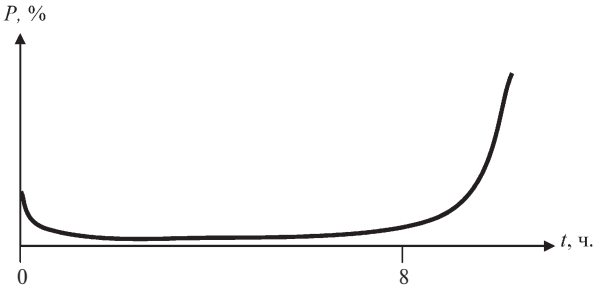


Рис. 1. График зависимости вероятности отказов человека от времени работы.

адаптации к этим изменениям значительно усугубляет напряженность труда.

Динамика этих процессов, текущее (мгновенное) физиологическое состояние работников энергетических объектов и их способность к работе в чрезвычайных ситуациях могут быть количественно оценены путем определения времени восстановления функциональных сдвигов, вызванных их работой.

В результате проведенного нами анализа процессов фенотипической адаптации работников энергетических объектов и их способности к работе в чрезвычайных ситуациях в результате их обучения и тренировок на тренажерах установлено, что величина реакций (функциональные сдвиги) их организма на те или иные команды либо на необходимость принятия того или иного решения изменяется по закону, близкому к экспоненциальному, представленному на рис. 2 (кривая *1*).

При достижении значения уровня реакций ниже некоторого критического в случае наступления чрезвычайной ситуации у работников энергетических объектов может не произойти

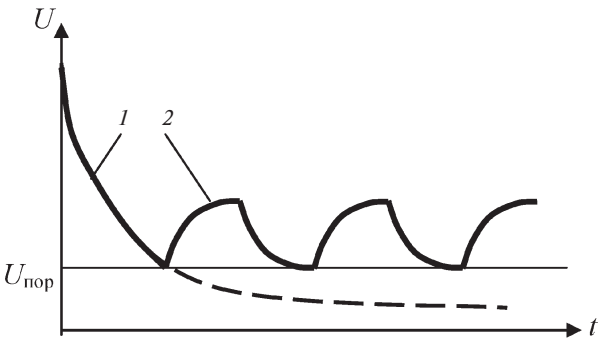


Рис. 2. Изменение функциональных сдвигов *U* в зависимости от времени тренировок *t*

адекватной реакции на эту ситуацию, в результате чего не будут приняты необходимые меры для ее устранения.

При большом перерыве между тренировками выработанная фенотипическая адаптация утрачивается и начинает возвращаться к исходному уровню.

Поэтому тренировки персонала должны иметь периодический характер, в результате которого их фенотипическая адаптация должна находиться вблизи порогового уровня, но не ниже его.

Значение порогового уровня зависит от характера работы и психофизиологического состояния человека и должно определяться персонально. В соответствии с этим должна определяться длительность и периодичность тренировок.

Перечень физиологических параметров, подлежащих контролю, определяется содержанием и условиями работы и, как правило, ограничивается измерениями частоты сердечных сокращений, артериального давления, моторными реакциями на свет и звук и психологическими тестами.

При чрезвычайных ситуациях длительность работы в таких условиях обычно невелика, но требует от людей предельного физического и психологического напряжения.

Поэтому в процессе тренировок должны создаваться такие условия внешней среды, в результате которых благодаря фенотипической адаптации у личного состава были бы выработаны навыки работы в подобных условиях.

На рис. 3 показан процесс изменений функциональных сдвигов в результате фенотипической адаптации к работе в особых условиях.

Как видно из рис. 3, при постоянной работе и жизнедеятельности в нормальных условиях для организма человека существуют три зоны: комфорта, повышенной опасности и непереносимости. При этом организм человека в основном функционирует в зоне комфорта и может испытывать незначительные перегрузки в зоне повышенной опасности, практически не влияющие на его здоровье.

Однако при наступлении чрезвычайных ситуаций организм человека должен быть готов к значительным нагрузкам, которые недопустимы при нормальной работе, так как могут угрожать жизни человека.

Выполнение специальных тренировок, направленных на адаптацию организма к возможным перегрузкам при наступлении чрезвычайных ситуаций, позволяет значительно увеличить допускаемые нагрузки без угрозы жизни и здоровью человека.

График и содержание таких тренировок могут быть разработаны с помощью специальной компьютерной программы «Loqus 2003.1En».

Эта программа по специальному алгоритму рассчитывает характер изменений функциональных сдвигов организма человека при воздействии различных нагрузок и процесс их восстановления после действия нагрузок, во время отдыха.

Особенностью этой программы является то, что в ней в качестве критерия изменения функциональных сдвигов используется время их восстановления.

Такой подход позволил решить не только проблему объективной качественной оценки воздействия нагрузок на организм человека, но и соизмеримость между собой как различных

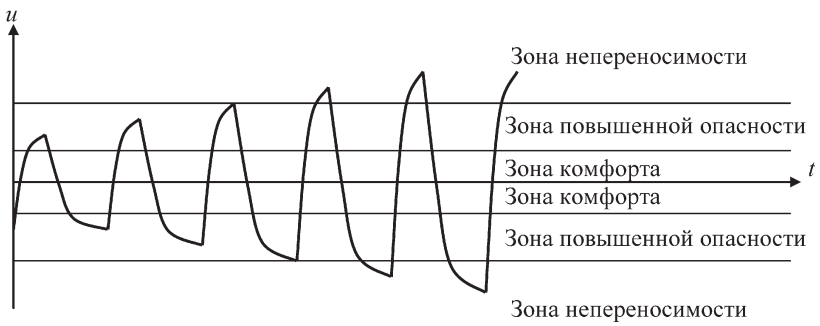


Рис. 3. Процесс изменений функциональных сдвигов в результате фенотипической адаптации к работе в особых условиях

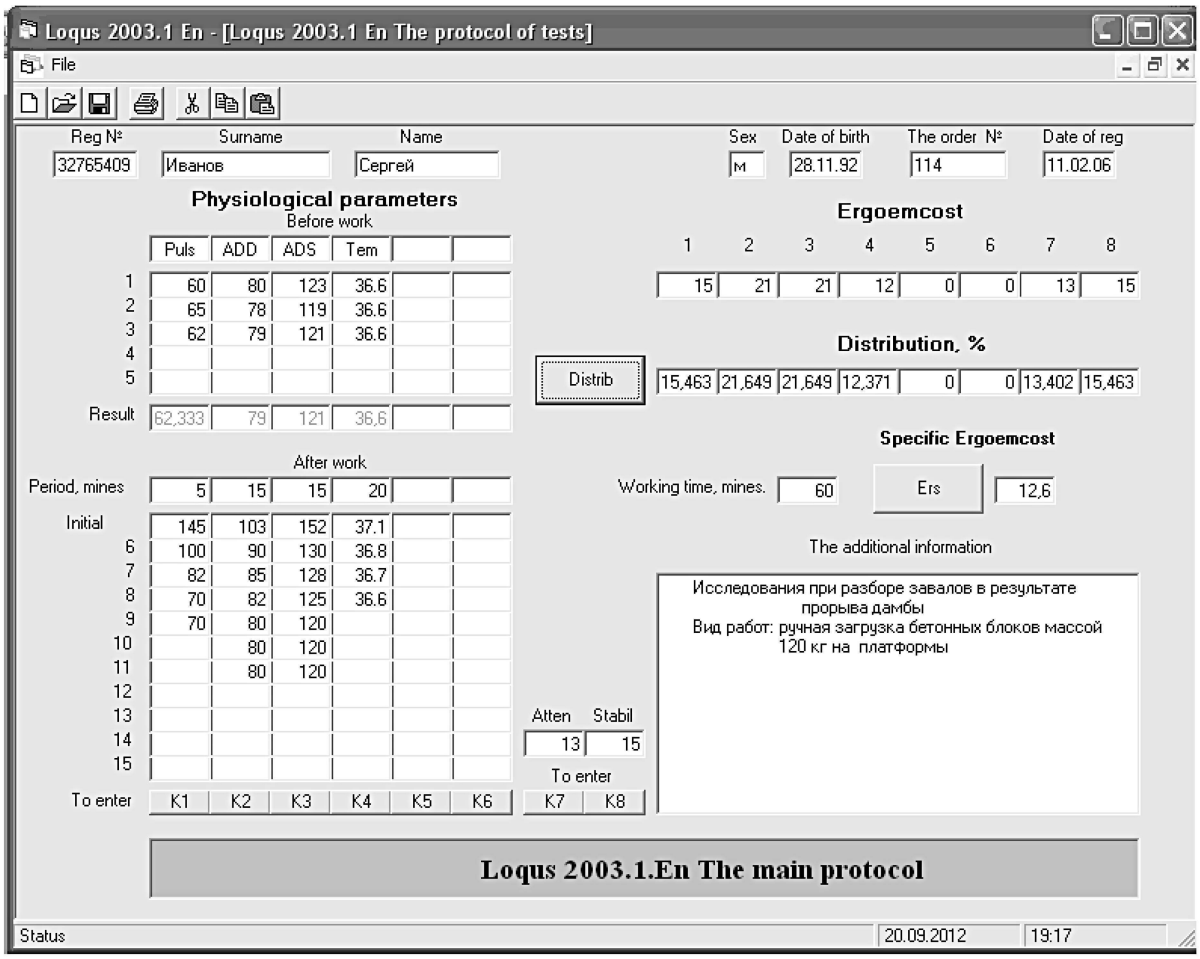


Рис. 4. Протокол исследований физиологического состояния рабочего при выполнении работ по ручному разбору завалов в результате прорыва дамбы

физиологических параметров, так и различных видов нагрузок.

Применение такой программы при исследованиях воздействия различных нагрузок, особенно в условиях чрезвычайной ситуации, позволяет не только определить оптимальные нагрузки при тренировках и их график, но и определить, какие из испытываемых нагрузок — наиболее тяжелые и определяющие работоспособность человека в экстремальных условиях.

Ниже представлен пример расчетов и распределения нагрузок в экстремальной ситуации с помощью этой программы. На рис. 4 показан протокол исследований физиологического состояния рабочего при выполнении работ по ручному разбору завалов в результате прорыва дамбы. Как видно из рис. 4, при исследованиях измерялись физиологические параметры: пульс, диастолическое и систолическое давления крови, температура тела, а так же психологические параметры (таблицы Шульте).

Измерения проводились до начала работы и после окончания работы. Длительность работы составляла 60 мин. Периодичность измерений: пульс — 5 мин; артериальное давление — 15 мин; температура тела — 20 мин.

Как видно из протокола, при отдыхе из физиологических параметров самое короткое условное время восстановления — у пульса (минимальная эргоемкость) — 15, 463. Дольше всех (максимальная эргоемкость) восстанавливается артериальное давление — 21,649. Психологическая нагрузка (таблицы Шульте

«Внимание» и «Стабильность») имеет незначительное время восстановления: соответственно 13,402 и 15,463.

Значение удельной эргоемкости (12,6), величина которой зависит как от значений эргоемкостей функциональных сдвигов, так и от времени работы, при необходимости позволяет произвести сравнительную количественную оценку различных видов работ между собой.

Таким образом, с помощью компьютерной программы могут быть количественно оценены как общие результаты тренировок, так и отдельные параметры физиологической и психологической подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доброборский, Б.С.** Безопасность машин и человеческий фактор. [Текст]: Монография / Под ред. док-ра техн. наук, проф. С.А. Волкова / Б.С. Доброборский / СПбГАСУ.– СПб., 2011.– 114 с.

2. **Патент РФ №2519576.** Способ оценки величины воздействия на организм человека различных нагрузок [Текст] / Б.С. Доброборский, Е.Н. Кадыскина.— 2000. Бюлл. № 33.

3. **Музыка, Л.П.** Энергобезопасность и современный подход к тренажерной подготовке оперативного персонала [Текст] / Л.П. Музыка, С.И. Магид // Надежность и безопасность энергетики.— 2008. № 3.

УДК 387.147:514

И.Б. Афанасьева, Л.И. Димент, О.В. Меркулова

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СТУДЕНТОВ В ОБУЧЕНИИ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Высшее образование в условиях необходимости постоянного самосовершенствования специалистов направлено на формирование профессионально-активной личности, обладающей целостной системой знаний и практико-ориентированных методов в своей области деятельности. Поэтому на систему образования возлагается большая ответственность за организацию образовательного процесса, обеспечивающего личностное, деятельностное и интеллектуальное развитие учащихся (И.А. Зимняя, В.В. Сериков, А.И. Сурыгин, В.И. Панов, Ю.Г. Фокин, М.А. Холодная, А.В. Хуторской и др.). Специфические черты прикладной геометрии как науки и как учебной дисциплины определяют ее особое положение в ряду базисных направлений развития личности.

Овладение системой научных знаний, эффективная работа во многих видах теоретической и практической деятельности человека неразрывно связаны с умением оперировать пространственными образами, т. е. с развитыми интеллектуальными умениями [1, 2].

М.А. Холодная рассматривает интеллект как общую когнитивную способность [7]. Согласно Л. Терстоуну, пространственные способности, или пространственный интеллект, пространственный фактор (space factor) — способность оперировать мысленными пространственными образами, схемами, моделями реальности. Она включает в себя два подфактора: скорость и точность распознавания двухмерных объектов; мысленное вращение и преобразование образов в трехмерном пространстве.

В.В. Дружининым в результате анализа соотношений между вербальным (смысловым), пространственным и знаково-символическим факторами в структуре интеллекта был сделан вывод о существовании иерархии в формировании этих факторов в онтогенезе: первая ступень — вербальный интеллект, связанный с усвоением языка, на его основе складывается пространственный интеллект и, наконец, последним по времени проявляется формальный (или знаково-символический) интеллект [4].

Пространственный интеллект рассматривается учеными как неотъемлемая часть математического мышления, математических способностей. Изучению этих способностей посвящены труды математиков А.Н. Колмогорова, А.Д. Алек-

сандрова и др., психологов А. Бине, Ж. Пиаже, С.Л. Рубинштейна, М.А. Холодной, И.С. Якиманской, педагогов-геометров Г.Д. Глейзера, В.А. Гусева, Э.Г. Гельфман, В.А. Далингера и др.

В современных условиях, когда на первый план вышла компетентностная парадигма высшего профессионального образования, традиционные цели дисциплин геометро-графического цикла — развитие пространственного мышления, творческих способностей к анализу и синтезу пространственных форм и отношений на основе графических отображений, приобретение знаний и умений геометрического моделирования — актуальны и сегодня [6].

В психологии уже давно признано, что необходимым компонентом творческой деятельности в различных областях теории и практики является *воображение*, обеспечивающее создание новых образов на основе тех, которыми человек уже владеет. Психологический анализ деятельности инженеров-конструкторов, изобретателей, художников, а также закройщиков, монтажников и др., представленный в трудах Б.Ф. Ломова, показал, что в выполнении этих видов профессиональной деятельности существенную роль играет умение оперировать с пространственными представлениями, т. е. пространственное воображение.

Решающим фактором в осуществлении творческой деятельности ученые признают произвольное воображение. Оно выступает как умение оперировать образами, как система умственных действий (П.Я. Гальперин, Б.Ф. Ломов и др.). По словам А.Н. Колмогорова, геометрическое воображение (геометрическая интуиция) играет большую роль в исследованиях, причем независимо от раздела математики.

Обогащение умственного опыта учащихся пространственными образами различных видов, а также развитие способности к конструированию пространственного образа — одна из важнейших задач и необходимая предпосылка успешного обучения начертательной геометрии и инженерной графике.

Исследование педагогических условий для развития пространственного интеллекта и формирования пространственных представлений студентов и школьников средствами геометро-графических дисциплин представлено в фундаментальных трудах Б.Ф. Ломова, А.Д. Ботвинникова, Н.Ф. Четверухина, а также в работах И.А. Ройтмана, В.Н. Виноградова, А.А. Чекмарева, Н.Н. Зепновой и др.

Учет психологических особенностей пространственных представлений учащихся и закономерностей их развития может качественно обогатить методику обучения и позволить более правильно и в короткие сроки решить различные практические задачи [1].

Три основные категории знаний о пространстве (о форме, протяженности, направлении) учащиеся получают еще в школе. Формирующиеся на их основе различение и представление учащихся об отдельных предметных и геометрических формах, о величине как протяженности по высоте, длине и ширине и направлениях по сторонам своего тела являются простейшими пространственными представлениями.

К сложным пространственным представлениям, образующимся на основе синтеза, относятся: синтез различных пространственных соотношений между собой, связь их с количественным или временным представлением; все представления, связанные с изучением метрических мер и определением пропорций; геометрические, географические, топографические и т. п. представления.

Формирование простых и сложных пространственных представлений в процессе обучения требует создания определенных условий в педагогическом процессе:

1) накопления учащимися разнообразного опыта различения пространственных признаков и отношений;

2) приобретения ими знаний о пространстве в единстве с практикой различения тех или иных пространственных признаков и отношений;

3) накопление учащимися опыта в произвольном использовании пространственных представлений в мыслительной деятельности при решении различного рода задач.

К сожалению, указанные условия не всегда обеспечиваются в педагогическом процессе, что отрицательно сказывается на развитии пространственных представлений у школьников. В результате они сталкиваются с большими трудностями при изучении начертательной геометрии в вузе.

В данной работе мы рассматриваем важнейшие аспекты формирования пространственных представлений: развитие пространственных представлений (отношений, связей) в обучении

и совокупность педагогических условий для решения поставленной задачи.

Ступени развития пространственных отношений

По мнению Б.Ф. Ломова, формирующую роль в развитии пространственного воображения играет опыт чувственного первосигнального анализа и синтеза пространственных особенностей предмета, накапливаемый в процессе выполнения практической деятельности [5].

В результате исследований путей формирования пространственного интеллекта личности учеными были выделены ступени развития пространственных отношений, для характеристики которых используют следующие показатели [4, 5, 7]:

1. *Уровень различения* (дифференцированность пространственных признаков и отношений — общее развитие пространственных представлений).

В восприятии учащиеся узнают и различают признаки, но словесно их не отождествляют. Таким образом, образуется разрыв между образом и словом, который отражает неполноту взаимодействия между первой и второй сигнальными системами. Использование терминов для определения пространственных отношений требует определенной стимуляции, поскольку учащиеся затрудняются объяснять свои действия. Необходимы специальные вопросы, примеры или другие побуждения к поискам словесных выражений и грамотному применению терминов.

2. *Уровень использования* словесного обозначения пространственных признаков и отношений (устанавливается полное соответствие между представлением и значением слова, учащиеся начинают активно пользоваться словесными выражениями пространственных отношений).

3. *Уровень синтеза и связи* пространственных отношений и количественных и временных-представлений.

4. *Уровень включения* самого пространственного представления в мыслительную деятельность учащихся.

Согласно концепции Б.Ф. Ломова, представление — обобщенный целостный образ, в котором зафиксировано соотношение «конструктивных элементов» объекта. Редукция компонентов этого образа — как бы «оборотная сторона» обобщения, его необходимое следствие [5]. Практические действия играют формирующую роль в развитии пространственного воображения не потому, что, выполняя их, человек начинает все более точно их представлять, а потому, что практические действия обеспечивают тонкий чувственный анализ особенностей объекта действия и его изменений в процессе манипулирования, т. е. обеспечивают формирование структурированного и дифференцированного *образа*.

В познавательной деятельности личности познание и мышление непрерывно переходят одно в другое и взаимно обусловливают друг друга. Таким образом, наглядно-действенное и наглядно-образное мышление являются базой для формирования практического и наглядно-чувственного опыта. На их основании развивается отвлеченное мышление, которое становится фундаментом для формирования мышления в форме абстрактных понятий [4].

Само умственное действие в пространственном воображении выступает как обобщенный способ преобразования представлений. Субъект может деформировать, расчленять образ, комбинировать заново части, не представляя того конкретного способа, которым это выполняется практически. Разумеется, такой обобщенный способ формируется в *опыте практической деятельности*.

Поскольку в процессе зрительного восприятия отчетливо проявляются индивидуальные особенности развития пространственных представлений учащихся — одни легко схватывают общую форму предметов, другие лучше видят его части, то дифференцированные задания по начертательной геометрии создают условия для более напряженной тренировки пространственных представлений студентов.

Совокупность педагогических условий для формирования пространственных представлений

Методика обучения основам проекционного моделирования (начертательной геометрии) основана на отказе от опоры на наглядные изображения при выполнении эпюров. Задача преподавателя — обучить студентов сознательному приему мысленного представления объекта в проекциях (до изображения на эпюре), т. е. об-

учение учащихся созданию *образа воображения*. С этой целью разработана специальная методика обучения, которая предусматривает объяснение студентам принципа проецирования с использованием наглядных средств: визуальных моделей, трехгранного угла, изображений плоскостей проекций при помощи электронных средств или на доске — с постепенным отказом от них и заменой реальных действий мысленными. В результате это приводит к тому, что расчлененные во времени действия объединяются в единый акт и осуществляется полный переход к непосредственному представлению проекций и оперированию ими. Таким образом, схематически процесс формирования навыков выполнения эпюра требует: от преподавателя — показа приема, подведения его к осознанию, обучения мысленному составлению проекций и организации переноса; от студентов — усвоения показанного приема, его осознания, умственного выполнения, что приводит в итоге к автоматизации приема. Надо отметить, что здесь также наблюдается переход от «внешних» действий к мысленным (но сами «внешние» действия иные — они базируются не на манипуляциях с каким-либо предметом, а на принципиальных основах метода проекций) и утверждается необходимость оперирования представлениями. В этом процессе можно отметить большую роль динамического момента пространственного воображения, поскольку именно эта сторона пространственного представления наиболее затруднительна для учащихся [3].

В ходе опытно-экспериментальной работы, проведенной в течение нескольких лет, нами проверялась гипотеза: способствует ли изучение курса начертательной геометрии формированию пространственных представлений студентов? В эксперименте приняли участие студенты машиностроительных специальностей (47 чел.), изучавшие начертательную геометрию в первом семестре, и студенты немашиностроительных специальностей (42 чел.), начавшие изучение цикла геометро-графических дисциплин с инженерной графики. Также был произведен психолого-педагогический анализ учебно-познавательной деятельности указанных групп студентов.

Для определения степени сформированности пространственных представлений нами была использована методика Б.Ф. Ломова, по которой участникам эксперимента предлагалось произвести ментальные действия с плоскими геометрическими фигурами (мысленно сложить, свернуть, разрезать, развернуть), далее — зарисовать на бумаге получившийся мысленный объект. Индикаторами служили правильность изображения и скорость проведения ментальных пространственных преобразований.

Проведенное исследование подтвердило гипотезу: по степени сформированности пространственных представлений показатели студентов машиностроительных специальностей в целом оказались выше (высокий, средний и низкий уровень сформированности), у студентов немашиностроительных специальностей — средний и низкий уровень.

Обобщенные результаты опытной работы, наблюдений, психолого-педагогического анализа учебно-познавательной деятельности представлены в таблице.

В результате анализа теоретической, научно-методической и психолого-педагогической литературы, а также эксперимента и собственного педагогического опыта, мы пришли к выводу, что для решения указанной проблемы необходимо обеспечение совокупности педагогических условий, включающей:

1) многоуровневость содержания учебной деятельности — разные аспекты учебной информации должны быть ориентированы на различные типы познавательного опыта учащихся, а также на различные компоненты в структуре познавательного опыта каждого студента [1, 2, 7];

2) учет психологических особенностей пространственных представлений учащихся и закономерностей их развития; учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении [1, 4, 7];

3) разработку и применение системы дидактического обеспечения, реализующей поставленную задачу средствами учебной дисциплины, поскольку формирование пространственных представлений должно осуществляться в неразрывной связи с изучением содержания дисциплины; необходимые учебная информация и формы ее предъявления должны иметь четкую направленность на определенные модальности ментального опыта личности [7, 8];

4) интенсификацию обучения (как инновационными, так и традиционными средствами)

Сравнительный анализ учебно-познавательной деятельности студентов машиностроительных и немашиностроительных специальностей

№ п/п	Студенты машиностроительных специальностей	Студенты немашиностроительных специальностей
I. *Ментальные проблемы в учебно-познавательной деятельности*		
1	Испытывают затруднения в операциях синтеза и связи пространственных отношений	Имеют значительные трудности в операциях синтеза и связи пространственных отношений
2	Испытывают незначительные затруднения в мысленном преобразовании пространственных объектов	Испытывают значительные затруднения в мысленном преобразовании пространственных объектов и мысленном манипулировании реальными объектами
3	Имеют устойчивые навыки в различении пространственных геометрических объектов, их признаков и отношений	Недостаточный опыт различения геометрических объектов, их признаков и отношений
4	Испытывают минимальные трудности в понятийной сфере, использовании геометрических понятий и терминов на практике	Испытывают значительные трудности в понятийной сфере, использовании геометрических понятий и терминов на практике
5	Частные трудности в переходе с образного, геометрического языка на язык знаково-символический (графический)	Значительные затруднения в переходе с образного, геометрического языка на язык знаково-символический (графический)
II. *Дидактические проблемы в учебно-познавательной деятельности*		
1	Не имеют проблем в соотнесении реальных объектов с их плоскими проекционными моделями	Имеют некоторые проблемы в соотнесении реальных объектов с их плоскими проекционными моделями
2	Устойчивые умения в оперировании проекционными моделями на плоскости чертежа, в обеспечении проекционной связи, при этом возможны частные случаи нарушения проекционной связи	Недостаточная сформированность умений в оперировании проекционными моделями на плоскости чертежа, в обеспечении проекционной связи
3	Недостаточная сформированность графических навыков и частные трудности в отражении информации на чертеже	Недостаточная сформированность графических навыков и трудности в отражении информации на чертеже
4	Трудности в восприятии и воспроизведении геометро-графической информации (чтение чертежа)	Трудности в восприятии и воспроизведении геометро-графической информации (чтение чертежа)
5	Недостаточность умении при работе с теоретическим и справочными источниками.	Недостаточность умении при работе с теоретическим и справочными источниками.
III. *Психологические проблемы в учебно-познавательной деятельности*		
1	Частные проявления психологических состояний напряженности, связанных с неуверенностью в собственных интеллектуальных возможностях, отсутствие состояний тревожности	Проявления состояний напряженности, связанных с неуверенностью в собственных интеллектуальных возможностях; проявление состояний тревожности как реакция на новую учебную деятельность
2	Мотивация к изучению дисциплины как средству обеспечения профессионально-важного качества специалиста (пространственного воображения)	Слабая мотивация к изучению дисциплины, и как следствие, отсутствие интереса

и углубленная подготовка студентов именно в области теории поверхностей и геометрических преобразований, что крайне важно в условиях ФГОС ВПО при сокращении часов на изучение дисциплин геометро-графического цикла, в частности начертательной геометрии.

В качестве заключения отметим, что пространственные представления как разновидность образного мышления обеспечивают создание не только образов объектов, но и системы образов, и оперирование ими в процессе решения задач. Умение мыслить в этих системах и характеризует пространственный интеллект индивидуума.

Формирование пространственных представлений обеспечивается средствами учебных дисциплин (начертательная геометрия, математика), средствами геометрического моделирования (прикладная геометрия, инженерная и компьютерная графика), далее развивается и совершенствуется в освоении специальных дисциплин проектно-конструкторского цикла. Таким образом, обогащение интеллектуального ресурса личности умениями оперировать пространственными образами отвечает задаче высшего профессионального образования — воспитанию высокоинтеллектуального, творческого, а значит, и конкурентноспособного специалиста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьева, И.Б.** Формирование интеллектуальных умений в обучении [Текст] / И.Б. Афанасьева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование.— 2010. № 4 (110).— С. 349–356.

2. **Афанасьева, И.Б**. Формирование пространственных представлений в обучении [Текст] / И.Б. Афанасьева // Фундамент.исслед. и инновации в техн. ун-тах: Матер. ХШ Всерос.конф. по проблемам науки и высшей шк.— СПб, 13 мая 2009. — СПб: Изд-во СПбГПУ, 2009.— С. 203–204.

3. **Ботвинников, А.Д.** О нерешенных вопросах в теории и практике обучения основам проецирования [Текст] / А.Д. Ботвинников // Обучение основам проецирования. Пособие для учителей (из опыта работы) / Сост. А.Д. Ботвинников.— М.: Просвещение, 1975.— 191 с.

4. **Дружинин, В.Н.** Психология общих способностей [Текст] / В.Н. Дружинин.— СПб.: Питер, 2000.— 368 с.

5. **Ломов, Б.Ф.** Опыт экспериментального исследования пространственного воображения [Текст] / Б.Ф. Ломов // В кн.: Проблемы восприятия пространства и пространственных представлений.— М., 1961.— С. 158–162.

6. **Покровская, М.В.** Инженерная графика: панорамный взгляд (научно-педагогическое исследование) [Текст] / М.В. Покровская.— М.: Изд-во «Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов», 1999.— 137 с.

7. **Холодная, М.А.** Психология интеллекта. Парадоксы исследований [Текст] / М.А. Холодная.— СПб.: Питер, 2002.— 272 с.

8. **Хуторской А.В.** Современная дидактика. [Текст] / А.В. Хуторской.— СПб.: Питер, 2001.— 544 с.

УДК 621.01:378.147

В.А. Дьяченко

УСЛОВИЯ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ ШИРОКОГО ПРОФИЛЯ

Сегодня, когда ушли в прошлое многие крупные конструкторские бюро, проектно-конструкторские школы и отраслевые проектные организации, а с ними — и известные промышленные предприятия, потребность в квалифицированных конструкторах-машиностроителях нового типа на сохранившихся и вновь созданных малых и средних предприятиях становится все более ощутимой. По поводу острой нехватки конструкторов-машиностроителей бьют тревогу многие предприятия Санкт-Петербурга, Великого Новгорода и других городов. Ведь хорошо известно, что экономическое благополучие любой промышленно развитой страны в конечном

итоге опирается на машиностроительное производство. Однако сегодня машиностроение у нас все еще не входит в перечень приоритетных направлений развития страны. Такая ситуация не способствует быстрому восстановлению и росту промышленного и экономического потенциала страны. Вместе с тем в ведущих технических вузах страны еще сохранились педагогические кадры и проектно-конструкторские школы, способные готовить конструкторов для современной промышленности. Вузы в силу специфики своей работы активно развивали обучение новым технологиям проектирования, освоение соответствующего программного обеспечения, компьютерного 3*D*-моделирования, автоматизированного проектирования технологии обработки на станках с ЧПУ и т. п.

При всем многообразии производственных машин и реализуемых ими технологий они, как правило, имеют общие принципы построения и схожую техническую структуру: несущую систему, передаточные и исполнительные механизмы, приводы, систему автоматизированного управления и систему контроля. Все это позволяет говорить о целесообразности подготовки конструктора широкого профиля, способного на единой научно-методической основе разрабатывать самые различные по назначению производственные машины и установки практически любой сложности*. Справедливость такого подхода подтверждает многолетний опыт успешной подготовки инженеров-конструкторов широкого профиля на кафедре «Автоматы» СПбГПУ для различных отраслей, их предприятий и организаций.

Однако за последние двадцать лет существенным образом изменилась технология проектирования, значительно изменились и конструкции производственных (и иных) машин, которые теперь строятся, как правило, на основе типовых конструктивных элементов и модулей и представляют собой органически целостную мехатронную систему, объединяющую механику, управляемые приводы, электронику и микропроцессорное управление. Поэтому, говоря сегодня о подготовке конструктора-машиностроителя нового типа, можно следующим образом охарактеризовать уровень его компетентности. Это должен быть специалист с широким научно-техническим кругозором, высокой профессиональной эрудицией, способный разрабатывать концептуальные и конструктивные решения новых высокоэффективных конкурентоспособных машин и оборудования (в том числе на уровне изобретений), профессионально владеющий ремеслом, наукой и искусством проектирования на основе CALS-технологий, способный принимать компромиссные проектные решения, основанные на глубоком понимании физических основ проектной задачи и осознании меры гражданской ответственности за результаты проектирования**.

Первое важное условие организации подготовки таких специалистов — уровень их востребованности отечественной промышленностью, готовности их использовать в соответствии с полученной квалификацией***. Здесь государство и бизнес должны сделать важные встречные шаги, направленные на развитие машиностроения в стране.

Немаловажным условием является и поиск «своего» абитуриента, ориентированного на техническое творчество. Но сегодня в школах и в кое-где сохранившихся домах творчества молодежи практически исчезли технические кружки. Ушли и талантливые педагоги, руководители таких кружков и студий. Более того, в 2012 году только 25 % выпускников школ заявили о своем намерении сдавать ЕГЭ по физике. Поэтому важная государственная задача сегодня — возрождение интереса учащихся средних школ к технике, техническому творчеству и организация

* Разумеется, здесь речь не идет о подготовке конструкторов сложных наукоемких систем (корабли, самолеты, авиационные двигатели и т. п.). Их следует готовить целенаправленно для разработки соответствующего вида техники.

** **Дьяченко, В.А.** Пути и возможности развития в вузе творческого потенциала конструктора-машиностроителя [Текст] / В.А.Дьяченко, М.М. Радкевич // Les problémes contemporains du technosphére et de la formation des cadres d'ingénieurs.— Recueil des exposes des participants V Conférence Internationale scientifigue et méthodigue du 6 an 15 octobre 2011 á Tabarka (Tunisie).— Donetsk.— 2011.— P. 119–121.

*** Можно отметить, что определенную нехватку квалифицированных конструкторских кадров ощущают и промышленно развитые страны, например Германия, где поступающая в университеты молодежь порой отдает предпочтение не машиностроению, а направлениям подготовки в области финансовой деятельности, менеджмента, права и т. п.

соответствующих студий в городских (районных) домах творчества молодежи.

Ну а пока «в конструкторы» нередко идут не всегда профессионально ориентированные абитуриенты, не готовые к повседневному труду по овладению ремеслом и искусством проектирования. Задача вуза — помочь им правильно сориентироваться в выборе дальнейшего пути обучения, а не принуждать их (и педагогов!) до конца обучения осваивать чуждое им проектно-конструкторское дело. Другое дело — развить интерес и творческие способности студентов, которые хотят стать профессионалами-конструкторами, но в силу обстоятельств ранее не имели возможности приобщиться к техническому творчеству. Весьма разумный путь решения этой проблемы видится во введении уже с первого курса сквозной (во всех семестрах обучения) дисциплины «Проектирование» подобно тому, как это имеет место при подготовке промышленных дизайнеров. Это позволит уже на первых семестрах оценить устремленность студента на освоение профессии и раскрыть его начальный творческий потенциал.

Другой вариант начальной профориентации — прием всех студентов просто на факультет, например на направление «Машиностроение», а последующее распределение их по выпускающим кафедрам осуществлять не ранее второго курса после ознакомления студентов с научными школами и профилем подготовки на выпускающих кафедрах. К сожалению, эта идея войдет в противоречие со структурой и содержанием образовательных стандартов, реализуемых сегодня на факультете, и правилами приема.

Здесь уместно также обсудить, в рамках какого направления подготовки (специальности) разумно готовить конструкторов широкого профиля. Применительно к российскому перечню направлений подготовки и специальностей высшего профессионального образования, по нашему мнению, это целесообразно вести в рамках инженерной специальности 151701 — «Проектирование технологических машин и комплексов» или в рамках направления подготовки 221000 — «Мехатроника и робототехника». Базовые и вариативные части федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) этих направлений подготовки (специальности), несмотря на имеющиеся ограничения, в принципе позволяют организовать полноценную подготовку конструкторов широкого профиля. И нет серьезных противоречий в том, что первая программа ориентирована на подготовку инженеров, а вторая (221000) — бакалавров и магистров: магистерская программа может быть профессионально ориентирована на развитие творческого потенциала конструктора современных мехатронных систем и оборудования.

Важнейшим условием реализации задачи развития творческого потенциала будущих конструкторов является наличие в вузе соответствующей образовательной среды. Это понятие включает учебный план подготовки специалистов с комплексом базовых и специальных программ, необходимое материально-техническое и организационное обеспечение и соответствующий профессорско-преподавательский состав. Рассмотрим эти составляющие образовательной среды подробнее.

При формировании и реализации учебного плана (его профессиональной части) должны быть решены следующие задачи:

обучение основам ремесла механика (знания и навыки слесарной и станочной обработки материалов, резки, гибки, сварки, сборки-разборки, пригонки, измерений и т. п.);

овладение основами проектно-конструкторского дела (теоретическая механика, сопротивление материалов, основы конструирования, проектная графика и программное обеспечение 2*D* и 3*D* моделирования, например Компас, AutoCAD, Inventor, SolidWorks 2011, ProEngineer, а также необходимые CAE-системы);

знание элементной базы современных машин и оборудования (крепеж, опоры, редукторы, приводы вращательные и поступательные, пневмогидроаппаратура, арматура, датчики, промышленные контроллеры, микропроцессоры, стандартные профили для формирования несущих систем и другие серийно выпускаемые ведущими фирмами функциональные и конструктивные модули для построения машин и приборов);

знание материаловедения (с акцентами на прикладные вопросы рационального выбора материала по критерию «обрабатываемость — цена — качество») и технологий машиностроения;

знание приводной техники (электроприводы, пневмогидроприводы), систем автоматиче-

ского управления, регуляторов скорости, промышленных контроллеров и микропроцессорной техники;

овладение проектно-конструкторским мастерством и постоянный творческий тренинг (сквозная дисциплина «Проектирование» с I по IX семестры, дисциплины «Методология проектирования» и «Инженерный анализ», регулярный научный и проектно-конструкторский семинар, мастер-классы).

При выполнении курсовых проектов (от разработки простых изделий к сложным машинам и системам) в рамках дисциплины «Проектирование» студент учится творчески анализировать проектную ситуацию, известные аналоги, выбирать прототип, формировать комплексные требования к проектируемому изделию, предлагать концепцию (принципы) построения и варианты ее реализации, обосновывать выбор варианта для дальнейшей разработки, выполнять необходимые расчеты, находить его схемное и конструктивное решение с учетом функциональных, эргономических и дизайнерских требований, моделировать функционирование системы с целью определения ее рациональных параметров. Следует отметить, что моделировать и исследовать работу системы можно, как правило, тогда, когда все принципиальные решения по ее построению и функционированию уже приняты конструктором. Моделирование системы, в том числе в рамках $3D$ виртуальной реальности, анимации работы, а также твердотельного моделирования конструкции в рамках технологий быстрого прототипирования (RP — rapid prototyping), позволяет оптимизировать рабочие и конструктивные параметры изделия, существенно ускорить процесс проектирования и избежать возможных ошибок в разработке рабочей документации. Здесь же студенты учатся составлению пояснительных записок с обоснованием принятых решений, включающим и экономическое обоснование проекта. Весьма важная творческая составляющая этого модуля подготовки специалиста — приобретение умений и творческих навыков разработки наглядной компьютерной презентации проекта и результатов всей работы.

В рассмотренном образовательном модуле интегрируются практически все другие этапы обучения студента-конструктора, формируется и раскрывается его творческий потенциал. При этом весьма важно правильно подбирать тематику курсового проектирования, реально востребованную промышленностью или перспективную поисковую. Преподавателю следует остерегаться давать на курсовой проект задачу, решение которой он не знает или не сможет активно искать его вместе со студентом. Лучшая организационная форма подобного выполнения курсовых и дипломных проектов — активная работа студента в реально действующем кафедральном (или производственном) конструкторском бюро, где студент погружается в проектно-конструкторскую среду и одновременно приобретает навыки работы в творческом коллективе.

Студенту должны быть заранее известны и критерии оценки в предметной комиссии или Государственной аттестационной комиссии результатов его проектно-конструкторской работы. Основные из них:

способность к анализу проектной ситуации, умение ставить и решать новаторские проектные задачи, правильно определять сегмент рынка, социальный проект потребителя (для товаров народного потребления) и стоимостные ограничения;

правильность подбора и анализа основных аналогов, выбора прототипа и формирования предложений по его модернизации;

новизна и перспективность предложенного концептуального решения, глубина его проработки с учетом современных тенденций развития данного вида техники;

умение грамотно и эстетически выразительно представить схемные решения разрабатываемого изделия (структурные, функциональные, кинематико-компоновочные, эргономические и иные схемы, включая схемы системы управления);

уровень проектного мастерства в конструктивно-технологической проработке изделия (включая проработку цветографической 3D-модели), правильность определения его основных параметров, обоснованность выбора материалов и технологий изготовления;

уровень владения программным обеспечением и компьютерными технологиями подачи и презентации материала проекта, включая анимацию работы проектируемого изделия и расчетные обоснования проекта;

содержание и качество оформления пояснительной записки;

степень самостоятельности в разработке материалов проекта и умение грамотно доложить и защитить предлагаемые проектные решения.

При формировании творческого потенциала и профессионального мастерства конструктора следует иметь в виду следующие основные тенденции развития новой техники и технологий:

интеграцию различных видов техники и технологий в новых технологических комплексах для различных областей применения;

всемерное ресурсосбережение при создании и эксплуатации новой техники (сбережение энергии, материалов, трудозатрат);

переход к малорисковым экологически приемлемым технологиям.

Наиболее ярко и наглядно примеры интеграции конструкции и новейших технологий для выполнения известных функций можно проследить на стремительно развивающихся цифровых фотоаппаратах, телефонах, принтерах, электронных тонометрах и т. п. Конструкторы активно используют все современные аспекты IT-технологий, по сути дела, в машиностроении и приборостроении такая интеграция новых технологий, прецизионной механики, электро и пневмопривода, оснащенных современными средствами контроля и микропроцессорного управления получила название «мехатронные системы». Сегодня мехатронные системы широко распространены в самых разных областях техники — от автомобилестроения и медицинской техники, станков с ЧПУ, промышленных и иных роботов (например, робот-пылесос) до систем вооружения и миниатюрных беспилотных летательных аппаратов. При этом зачастую существенно меняется тектоника машин и сооружений, трансформируется их облик, меняется весь интерфейс, свойственный предшествующему этапу развития той или иной техники. Достаточно, например, вспомнить эволюцию фотографии с ушедшими в прошлое фотопленками, реактивами для ее обработки и комплексом оборудования для проявки и печати, как впрочем, и самими пленочными фотоаппаратами. Существенно преобразилась конструкция и внешний облик станков с ЧПУ, коренным образом меняется по сравнению с традиционным автомобилем конструкция электромобиля, резко изменился и облик современного телевизора. При этом всегда на качественно более высоком уровне раскрываются и функциональные возможности такой новой техники.

Прямым результатом такой организации проектирования должно быть развитие творческого потенциала конструктора нового поколения, подкрепленное подачей заявки на изобретение, участием в творческих конкурсах, выставках, конференциях, публикацией материалов разработок, передачей их в промышленность. Все это является существенным стимулом дальнейшего творческого роста специалиста и должно рассматриваться в качестве основных критериев оценки уровня подготовки конструкторов в вузе.

Разумеется, такая подготовка конструкторов — весьма дорогостоящее для вуза (и страны) дело. Она требует значительных площадей и дорогостоящего современного оборудования для мастерских и профильных лабораторий. Весьма высокую стоимость имеет оснащение и эксплуатация лабораторий станков с ЧПУ, мехатроники и робототехники, 3D виртуальной реальности с трехэкранным CAVE и высокопроизводительным компьютерным кластером, лабораторий быстрого прототипирования. Но все это, несомненно, окупится результатами подготовки высококвалифицированных конструкторов нового поколения для отечественного машиностроения. Замена же работы студентов-конструкторов с реальным оборудованием на изучение компьютерной эмуляции работы с ним едва ли принесет желаемые результаты.

И последнее, но, быть может, самое важное — это кадровое обеспечение подготовки конструкторов. Если многие естественнонаучные, общепрофессиональные и специальные дисциплины могут вести профессора, доценты и высококвалифицированные преподаватели различных кафедр, то основную профильную дисциплину «Проектирование» (а также «Методологию проектирования» и «Инженерный анализ») обязательно должны вести педагоги-конструкторы, постоянно участвующие в реальной проектно-конструкторской работе по созданию новой техники по заказам промышленности. Конструктора должен учить конструктор, а не только ученый! К сожалению, система оплаты труда высококвалифицированных конструкторов, не имеющих ученой степени, в вузах России не отрегулирована и ждет своего решения.

УЧЕНЫЕ — ПОЛИТЕХНИКИ, ПРОСЛАВИВШИЕ НАШУ СТРАНУ

С.Н. Вернов (1910–1982) — выдающийся ученый-физик и организатор науки, крупный специалист в области космических лучей, создатель первой в мире аппаратуры для высотных автоматических измерений потоков космических лучей с передачей данных на Землю по радио, открыватель внешнего радиационного пояса Земли, один из основоположников космического материаловедения, ученик и соратник академика Д.В. Скобельцына, действительный член АН СССР (1968), Герой Социалистического Труда (1980), лауреат Ленинской (1960) и Сталинской (1949) премий; кавалер орденов Ленина (трижды), Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени (дважды) и «Знак Почета».

Сергей Николаевич в 1927 году поступил на физико-механический факультет Ленинградского политехнического института; после окончания института в 1931 году в 1932–1934 годах проходил аспирантуру в Радиевом институте в Ленинграде, затем в 1935–1939 годах докторантуру в Физическом институте АН СССР. Вместе с Д.В. Скобельцыным С.Н. Вернов в 1946 году организовал НИИ ядерной физики в МГУ и, будучи в 1946–1960 годах заместителем, а с 1960 по 1982 год директором НИИЯФ, внес огромный вклад в дело создания и развития института и отделения ядерной физики физического факультета МГУ.

Портрет С.Н. Вернова помещен в портретной галерее «Ученые-политехники, прославившие нашу страну», расположенной на первом и втором этажах главного здания СПбГПУ.

УДК 001:929

Ф.П. Кесаманлы

АКАДЕМИК СЕРГЕЙ НИКОЛАВИЧ ВЕРНОВ

Я не встречал человека столь совестливого, столь преданного науке, способного на любые личные жертвы во имя нового научного результата и успешного хода исследований во всей стране независимо от своего участия в этой или иной конкретной работе.

Академик Г.Б. Христиансен [1, с. 10].

Сергей Николаевич Вернов родился 11 июля 1910 года в г. Сестрорецке под Санкт-Петербургом. Отец его — Сергей Степанович Вернов — был почтовым служащим, мать — Антонина Михайловна Вернова — учителем математики в средней школе.

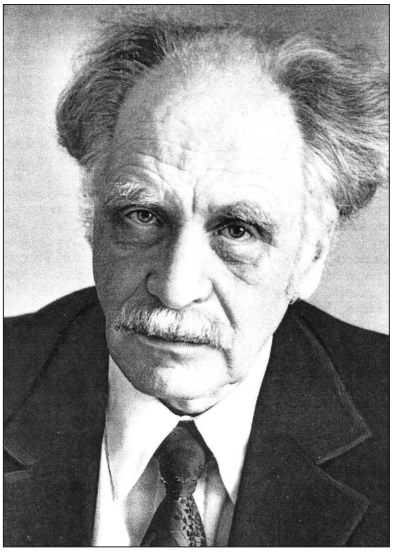
По воспоминаниям родственников, Сергей Николаевич был поздним ребенком — его матери исполнилось 42 года, и он был ее первым ребенком. Он рос окруженный огромным числом бабушек и тетушек, единственный ребенок для всех этих взрослых людей. Во время первого причастия (наверное, 4-х–5-ти лет, кудрявый ангелочек в нарядном матросском костюмчике), что-то не понравилось ему в церкви, он решительно отказался выполнять то, что требовалось, топнул ногой и громко на всю церковь произнес: «Что НЕ хочу, то НЕ хочу; что НЕ хочу, то НЕ буду!» Антонина Михайловна говорила: «Ну, если такой упрямый и умный — это еще ничего, даже хорошо! А если упрямый и дурак...»

Примерно в том же возрасте Сергей Николаевич в игре очень четко выразил то, что потом стало действительно его жизнью: он вставал за стулом (это была кафедра) и говорил: «Я — профессор, это кафедра моя». Антонина Михайлов-

на была исключительно одаренным человеком, прекрасным педагогом, в 1887 году окончила педагогические курсы с золотой медалью. Сергей Николаевич учился в классе, где она преподавала математику, и рассказывал, что ее слушали, буквально затаив дыхание, а сама она никогда не повышала голоса на своих учеников. В семье Верновых сохранилось много писем и адресов к Антонине Михайловне от ее учеников, которые писали: «Вы были для нас не только педагогом, но добрым любящим наставником, всегда о нас беспокоившимся. Мы доставляли Вам много неприятностей, очень часто Вас огорчали, но Вы все нам прощали и по-прежнему относились к нам с большим вниманием». Родители Сергея Николаевича прожили долгую жизнь вместе и жили «как два голубка». Но Николай Степанович любил повторять: «Мы ни по одному вопросу сговориться не можем!». Николай Степанович был чрезвычайно общителен и разговорчив и, когда Антонина Михайловна его останавливала, отвечал ей: «Не наступай мне на язык!» Эта фраза часто цитировалась в семье Верновых [1, с. 97].

В 1926 году Сергей Николаевич окончил школу. В аттестационных документах отмечалось, что он обладал отличными математическими способностями, интересом к гуманитарным наукам и являлся лучшим учеником выпускного класса. После окончания школы Сергей Николаевич поступил в Механический техникум и уже через год перешел на первый курс физико-механического факультета Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина. Ему повезло: в годы его учебы на физико-механическом факультете там преподавали академик А.Ф. Иоффе, профессора Д.В. Скобельцын, Н.Н. Семенов, Я.И. Френкель и учились такие талантливые студенты, как А.И. Шальников, М.А. Садовский, А.И. Алиханов, И.К. Кикоин, ставшие впоследствии академиками. В студенческие годы Сергей Николаевич работал в Радиевом институте. В начале 1931 года он окончил физико-механический факультет, когда тот уже был самостоятельным Физико-механическим институтом.

Закончив Физико-механический институт, он стал аспирантом Радиевого института. Аспирантура проходила под руководством профессора Д.В. Скобельцына. Соответственно, тема для



Сергей Николаевич Вернов

кандидатской диссертации была связана с космическими лучами, изучением которых в те годы успешно занимался сам Дмитрий Владимирович. Космическим лучам Сергей Николаевич оставался верным до конца своей жизни. В первой половине 30-х годов о первичных космических лучах, т. е. о частицах до вхождения их в атмосферу Земли, ничего не было известно, и, чтобы понять их природу, необходимо было проводить эксперименты поближе к источнику, на границе атмосферы. Сергей Николаевич решает изучать природу космических лучей в верхней стратосфере. Для этого ему надо было преодолеть одну существенную трудность. В то время экспериментатор не имел возможности подняться с приборами на высоту более 10 км, и нужно было создавать автоматический прибор, проводящий измерения без участия человека. Он нашел блестящее решение: использовать опыт ленинградского профессора П.А. Молчанова, впервые в мире создавшего в 1930 году радиозонд, передававший метеорологическую информацию по радио. Совместно с П.А. Молчановым, Л.В. Мысовским Сергей Николаевич в 1934 году создает прибор и проводит первые успешные измерения в атмосфере с передачей данных по радио. Первый пробный эксперимент с радиозондом, регистрирующим космические лучи, был выполнен им в 1934 году на самолете. Первый самостоятельный полет радиозонда состоялся 1 апреля 1935 года. В этом же году им

была защищена кандидатская диссертация на тему «Изучение космических лучей в стратосфере при помощи радиозондов». После аспирантуры он остался работать в Радиевом институте в должности старшего научного сотрудника [1, с. 12, 13].

Диссертационная работа С.Н. Вернова очень понравилась С.И. Вавилову. Здесь мы предоставляем слово самому Сергею Николаевичу: «В 1935 г., когда мне было всего 25 лет, меня вызвал член президиума Академии наук СССР, научный руководитель Государственного оптического института, директор ФИАН, замечательный ученый и человек, незабвенный Сергей Иванович Вавилов. С.И. Вавилов предложил мне поступить в докторантуру АН СССР и переехать из Ленинграда в Москву. Думаю, что легко понять мое состояние. Мне, кандидату наук, предлагают поступить в докторантуру. Но все же с дрожью в голосе я сказал: «Но я думал работать у Скобельцына». Сергей Иванович на меня посмотрел своими добрыми глазами, которые одновременно пронизывали собеседника насквозь. Со свойственной ему сочетанием «мягкости» и «твердости» Сергей Иванович ответил: «Чудак-человек. Скобельцын будет в Москве. Это я Вам гарантирую». Вот как я попал в ФИАН» [3, с. 43].

В годы прохождения аспирантуры в Радиевом институте, он познакомился там с Марией Сергеевной Меркуловой. Она была радиохимиком и сотрудником лаборатории директора института, академика Виталия Григорьевича Хлопина. Их роман протекал незаметно для всех, в поздние вечерние часы, когда Сергей Николаевич создавал свой прибор и сидел окутанный проводами («как паук в паутине», по выражению Марии Сергеевны), а у Марины Сергеевны шли многочасовые химические опыты. Поэтому известие о предстоящей свадьбе произвело в институте впечатление «разорвавшейся бомбы». В момент свадьбы ему было 22 года, а ей — 26 лет. Несмотря на различный жизненный опыт, у них было много общего в тех главных чертах, которые определяют позицию человека в жизни: целеустремленность, трудолюбие, общительность. В то время в Радиевом институте компания химиков была очень веселая, и Сергей Николаевич был зачислен в химики. Эту компанию возглавлял сам В.Г. Хлопин [1, с. 98].



С.Н. Вернов с женой М.С. Меркуловой

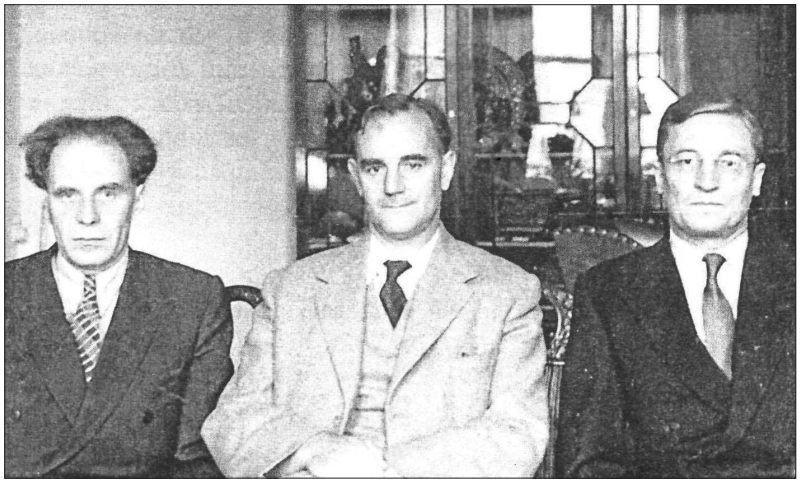
В 1936 году Сергей Николаевич, а немного позднее Мария Сергеевна переехали в Москву в общежитие докторантов, в мансарду (5-й этаж) старинного дома на улице Горького, д. 22-а. Это была не коммунальная квартира, а именно общежитие: прямо с лестничной площадки, пройдя по длинному коридору, жильцы 5-го этажа попадали в свои квартиры. На кухне стояло много столов для жильцов всего этажа. Не было ванны, не было горячей воды. Быт был трудный. И все же на 5-м этаже все девять семей жили очень дружно, охотно помогали друг другу, совершенно отсутствовали коммунальные ссоры. Все главы семей стали известными учеными, докторами наук, а четверо из них — академиками. В чем причина слаженности тяжелого быта, чуткого отношения друг другу жильцов 5-го этажа? Что служило истоком и что способствовало интенсивному творчеству и успехам молодых ученых с 5-го этажа? Ответ простой: наука объединяла и роднила всех, на обывательские дрязги не оставалось ни времени, ни желания, ни сил. Следует учитывать и то, что все были молоды, полны надежд, в них жил добрый дух студенчества. В квартире на 5-м этаже Верновы прожили 17 лет. Здесь появились двое детей: о рождении сына Юрия Сергей Николаевич узнал во время своей экваториальной экспедиции, о рождении дочери Елены — в очереди в кооперативе, отоваривая продуктовые карточки [1, с. 100,101 и 117].

Усовершенствовав метод стратосферных измерений на шарах-зондах, Сергей Николаевич провел в 1936–1938 годах успешные исследования широтного эффекта космических лучей

в стратосфере в нескольких пунктах: в Ленинграде, Ереване и в районе экватора. Для этого он в 1937 году организовал Экваториальную морскую научную экспедицию и возглавил ее. Танкер «Серго Орджоникидзе» шел из Одессы во Владивосток и обратно. Состав экспедиции состоял из четырех человек: Сергей Николаевич — начальник экспедиции, Алексей Васильевич Миронов — геофизик по образованию, Жак Исаакович Шейхзаманов — радист экспедиции, Н.Л. Григоров — лаборант (студент 3-го курса МГУ) [3, с. 59–67].

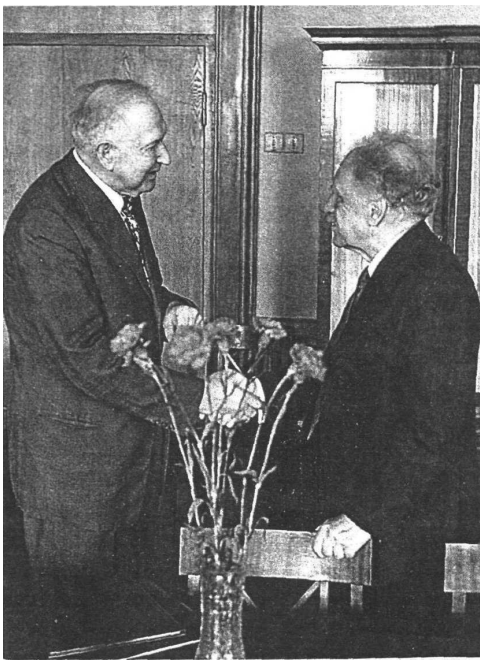
Эксперименты в стратосфере показали, что на экваторе поток частиц космических лучей в четыре раза меньше, чем на высоких широтах. Это означало, что магнитное поле Земли отклоняет космические частицы, и, следовательно, они обладают зарядом. Аналогичные эксперименты почти одновременно были проведены и Р.А. Милликеном, что окончательно доказало, что первичные космические частицы не являются нейтральными, например гамма-квантами. В 1939 году Сергей Николаевич защитил докторскую диссертацию на тему «Широтный эффект космических лучей в стратосфере и проверка каскадной теории в случае прохождения электронов через вещество с малым атомным весом». Эта диссертация стала первой докторской диссертацией по космическим лучам, защищенной в ФИАН-е [3, с. 13, 14].

Как и для всякого крупного ученого, естественной потребностью С.Н. Вернова была работа с молодежью — педагогическая деятельность. Преподавать он начал в Ленинградском государственном университете, будучи еще аспирантом. В 1940 году по инициативе С.И. Вавилова на физическом факультете МГУ была образована первая в нашей стране кафедра по ядерной физике — кафедра радиоактивности и атомного ядра. Заведовать кафедрой стал Д.В. Скобельцын, который пригласил Сергея Николаевича работать на кафедре по совместительству профессором. Вторая мировая война прервала исследование космических лучей и педагогическую деятельность Сергея Николаевича. Он вместе с ФИАН-ом был эвакуирован в Казань и в 1941–1943 годах, находясь там, занимался оборонными работами. С 1943 года Сергей Николаевич перешел на основную работу в МГУ и до последних дней жизни работал профессором, а затем заведующим кафедрой космических лучей и физики Космоса физического факультета. В 1946 году в МГУ были созданы Научно-исследовательский институт ядерной физики и отделение ядерной физики физического факультета. Первым директором НИИЯФ и заведующим отделением был Д.В. Скобельцын. Его первым заместителем, а с 1960 года преемником на этих постах стал С.Н. Вернов. Под их руководством НИИЯФ МГУ быстро стал первоклассной научной организацией, а отделение ядерной физики — местом подготовки высококвалифицированных научных кадров.



С.Н. Вернов, лауреат Нобелевской премии С. Пауэлл
и Н.А. Добротин

С 1945 года Сергей Николаевич развернул широкий фронт стратосферных исследований космических лучей. Для этих целей он в 1946 году создал в Долгопрудном под Москвой стратосферную станцию ФИАН-а и специальную группу в МГУ. В ходе продолжительных целенаправленных работ С.Н. Вернова и его учеников была успешно решена задача о выяснении природы первичных космических лучей и основных особенностей механизма генерации ими вторичных частиц. Эти результаты получили широкое признание. В 1949 году Сергею Николаевичу Вернову была присуждена Сталинская премия первой степени и присвоено звание лауреата Сталинской премии за экспериментальные исследования в верхних слоях стратосферы, изложенные в статьях «Исследование с помощью годоскопа ливней частиц, образованных в свинце космическими лучами в стратосфере», «Изучение ливней космических лучей, сопровождающих проникающие частицы», «Измерение толчков, создаваемых космическими лучами в стратосфере с помощью ионизационной камеры», «Угловое распределение космических частиц в стратосфере», «Исследование мягкой и жесткой компонент космических лучей в стратосфере», опубликованных в 1948 году. В 1953 году он был избран членом-корреспондентом АН СССР.



Академик М.А. Марков поздравляет академика С.Н. Вернова с 70-летием

1950-е годы для Сергея Николаевича были годами максимальной творческой и научно-организационной активности. Круг его научных интересов в области космических лучей становится необыкновенно широким. Наряду с продолжением традиционной «долгопрудной» стратосферной тематики, под его руководством в МГУ была создана уникальная установка для исследования космических лучей сверхвысоких энергий (10^{14}–10^{17} эВ). На большой территории была размешена разнообразная аппаратура для регистрации и прецизионного анализа широких атмосферных ливней (ШАЛ), создаваемых первичными частицами гигантских энергий. Эта установка позволяла проводить изучение характеристик взаимодействия элементарных частиц при энергиях, пока недоступных для ускорительной техники. Важным результатом, полученным с помощью данной методики, стало измерение энергетического спектра первичных космических лучей в указанном диапазоне. При энергиях 10^{15} эВ был обнаружен излом спектра, вероятно, соответствующий переходу от частиц галактического происхождения к наиболее энергичным частицам, идущим из Метагалактики. Этот результат был зарегистрирован как открытие.

Важнейшим элементом программы исследований космических лучей стали осуществленные под руководством Сергея Николаевича эксперименты на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и автоматических межпланетных станциях (АМС). Уже при запусках первых советских спутников было сделано крупнейшее открытие — обнаружен внешний радиационный пояс Земли. Исследование внутреннего пояса на тех же спутниках позволили С.Н. Вернову с сотрудниками дать объяснение природы этой зоны (захват продуктов распада нейтронов, выбиваемых из атмосферы Земли космическими лучами).

В дальнейшем под руководством Сергея Николаевича была осуществлена программа детальных исследований радиационных поясов и магнитосферы Земли на ИСЗ серии «Электрон». Эти исследования уже в 1968 году привели к выяснению полной картины структуры и динамики радиационных поясов Земли, осуществлен-

ному под руководством Сергея Николаевича, что стало выдающимся достижением советской науки. За эти работы в 1960 году С.Н. Вернов был удостоен Ленинской премии. В ноябре 1968 года он был избран действительным членом АН СССР по Отделению ядерной физики (физики высоких энергий).

Указом Президиума Верховного Совета СССР 10 июля 1980 года за большие заслуги в развитии физической науки, подготовке научных кадров и в связи с семидесятилетием со дня рождения Сергею Николаевичу Вернову было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот».

За 50 лет научной деятельности Сергей Николаевич создал большую научную школу. Достижения этой школы были дважды удостоены Ленинской премии, четырежды — Государственной премии СССР, Государственной премии УССР и трижды — Ломоносовской премии МГУ [4, с. 523].

Научно-организационная работа Сергея Николаевича выходила далеко за рамки НИИЯФ МГУ. С момента образования Отделения ядерной физики АН СССР он был членом бюро и заместителем академика-секретаря этого отделения, возглавлял Научный совет АН СССР по проблеме «Космические лучи». На этих постах он вел большую работу по планированию научных исследований в СССР. Постоянное внимание Сергей Николаевич уделял развитию науки в союзных и автономных республиках, в частности в Грузии, Армении, Узбекистане, Якутии. Возглавляемый им Научный совет регулярно организовывал Всесоюзные конференции по космическим лучам в разных городах нашей страны. В Якутске, например, такие конференции проходили трижды: в 1962, 1977 и 1984 годах. С.Н. Верновым были созданы также зимние школы союзного масштаба в Аппатитах и международные семинары в Ленинграде. С 1969 по 1982 год в Ленинграде прошло 13 семинаров.



Выступление С.Н. Вернова на Международной конференции КОСПАР — 1970 в Ленинграде

С.Н. Вернов вел большую общественную работу, он возглавлял Московский городской и областной комитеты защиты мира. В 1967 году был награжден медалью «В защиту мира».

Выдающаяся научная, педагогическая, организационная и общественная деятельность С.Н. Вернова получила высокую оценку. Он был награжден тремя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета», медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина». Умер Сергей Николаевич 26 сентября 1982 года в Москве, там же похоронен на Новодевичьем кладбище.

Тридцать лет прошло со дня его смерти, но память о нем жива [1–3, 5–9]. В МГУ учреждена стипендия имени С.Н. Вернова: ее ежегодно присуждают студентам-отличникам физического факультета. Одна из крупных аудиторий физического факультета названа его именем. На здании НИИЯФ установлена памятная мемориальная доска. В новом районе Дубны одна из улиц, которая пересекается с проспектом Н.Н. Боголюбова, носит имя С.Н. Вернова. В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете его портрет помещен в портретной галерее «Ученые-политехники, прославившие нашу страну», расположенной в главном здании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Академик С.Н. Вернов— ученый Московского университета [Текст]: Сб. статей.— М.: УНЦ ДО, 2004.— 140 с.

2. Академик Сергей Николаевич Вернов [Текст]: Фотоальбом к 95-летию со дня рождения.— М.: Граница. 2005.— 52 с.

3. Воспоминания об академиках Д.В. Скобельцыне и С.Н. Вернове [Текст]: Сб. статей.— М.: Изд-во МГУ, 1995.— 114 с.

4. **Григоров, Н.Л.** Сергей Николаевич Вернов (К семидесятилетию со дня рождения) [Текст] / Н.Л. Григоров [и др.] // Успехи физических наук.— 1980. Т. 121, вып. 3.— С. 521–523.

5. К 100-летию со дня рождения академика С.Н. Вернова. Совместное заседание научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук и Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 16 июля 2010 г. [Текст] / МГУ // Успехи физических наук.— 2011.— Т. 181, вып. 2.— С. 187–229.

6. Персональный состав членов Российской академии наук Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 1899–2007 [Текст]: Справочник / Сост. В.Н. Боронин [и др.].— СПб.: Наука, 2007.— 128 с.

7. Проблемы физики космических лучей. Посвящается памяти академика Сергея Николаевича Вернова [Текст]— М.: Наука, 1987.— 288 с.

8. **Смелов, В.А.** Политехники— кавалеры Золотой Звезды [Текст] / В.А. Смелов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— 139 с.

Л.С. Шульдешов

ТРАДИЦИИ ЧЕСТВОВАНИЯ ГЕРОЕВ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ — ВЕЧНЫ

Каждый прошедший год все дальше отделяет нас от тяжелых фронтовых лет Великой Отечественной войны. Все меньше ветеранов могут гордо выйти в день Победы в орденах и медалях на праздничные мероприятия и пройти по улицам города.

Простая арифметика подтверждает факт, что сегодня минимальный возраст реального участника ВОВ должен составлять не менее 84–85 лет. Одновременно, если учесть, что согласно статистическим данным средняя продолжительность жизни мужского населения Санкр-Петербурга — 66 лет, женского — 76 лет, то понятно, что количество здравствующих ветеранов остается предельно малым. Именно поэтому одной из важных задач нашего коллектива и руководства является забота о ветеранах не только в памятный для всех День Победы.

Участников войны осталось немного, но они пока с нами. Среди них — орденоносцы, которыми мы гордимся: Александр Алексеевич Смирнов, Николай Филипович Сидоренко, Константин Константинович Гомоюнов, Нина Ивановна Чугунова, Анна Никитична Фетисова, Василий Алексеевич Секачув, Габриель Александрович Поляков, Анатолий Михайлович Логинов и др.

Согласно плану подготовки и проведения мероприятий университета, посвященных дню Победы ряд делегаций наших представителей 9 мая выезжали к местам захоронений воинов-политехников на территории Ленинградской области.

Помещаю впечатления автора от посещения пос. Тайцы, где захоронены пять наших политехников. Это преподаватели И.М. Межиборский, А.Г. Ныркова, студенты А.М. Красовский, Г.Б. Яшнова, лейтенант А.Г. Разин.

В состав делегации под руководством проректора Михаила Валентиновича Лопатина входили 20 человек. Костяк ветеранской группы из состава Совета ветеранов составили Иван Яковлевич Флегонтов, София Андреевна Сироткина, Нина Васильевна Виноградова, Нина Ивановна Чугунова.

Для поддержки преемственности поколений в состав группы вошли также студенты ФЭМ в количестве 10 человек.

Согласно последней переписи населения в пос. Тайцы в настоящее время проживает около 6,5 тыс. человек. Поражает тот факт, что на празднование Дня Победы обычно выходит основная часть жителей вместе со своими семьями — в этом глубокая традиция этого поселка. Бросается в глаза также неподдельное вдохновение и радость на лицах жителей от этого празднования.

Заслуживает уважение большая организаторская работа администрации поселка под руководством Натальи Ивановны Окуневой, мать

которой заканчивала наш университет, и Совета ветеранов, руководимого Людмилой Анатольевной Ашманиной.

Мероприятия по чествованию ветеранов и отданию почестей погибшим за свободу и независимость нашей Родины прошли в этот день на очень высоком уровне. После торжественного прохождения ветеранской группы, митинга, возложения венков к памятнику погибшим воинам и минуты молчания в воздух одновременно взлетело море разноцветных шаров. Перед участниками мероприятий торжественным маршем прошла группа воинов местной бригады ПВО. Всем желающим было предложено фронтовое угощение — солдатская каша из походной кухни и горячий чай.

В завершение мероприятий участникам был представлен концерт художественной самодеятельности с очень интересной программой и почти профессиональными артистами.

... Интересно, что перед поездкой член Совета ветеранов университета София Андреевна Сироткина высказала выезжающим впервые свое особое мнение: «Вам, ах... как... понравится в Тайцах!». В самом деле, впечатление — «Ах с плюсом», а воинам, отдавшим свои жизни в жестоких сражениях Великой Отечественной войны, — вечная память.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АБДУЛЛАЕВ Али Мамедкерим-оглы — *аспирант кафедры реакторо- и парогенераторостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

188540, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, ул. Солнечная, д. 41

(81369) 4-57-74

fortyman@yandex.ru

АВАКЯН Сергей Вазгенович — *доктор физико-математических наук, начальник лаборатории аэрокосмической физической оптики Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научный центр «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»», ведущий научный сотрудник лаборатории проблем космической погоды Главной Пулковской астрономической обсерватории РАН, профессор факультета комплексной безопасности СПбГУ.*

199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 12

(812) 323-88-33

avak2@mail.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — *доктор технических наук заведующий кафедрой технологии металлов и металловедения Санкт-Петербургского института машиностроения.*

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14

(812) 540-01-59

АРСЕНЬЕВ Дмитрий Германович — *доктор технических наук профессор проректор по международной деятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ

(812) 534-10-01

vicerector.int@spbstu.ru

АФАНАСЬЕВА Ирина Борисовна — *старший преподаватель кафедры прикладной геометрии и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-75-14

kpgd@mail.ru

БАРИЛОВИЧ Владимир Антонович — *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-77-73

БАРЫШНИКОВ Дмитрий Сергеевич — *аспирант кафедры общей физики Иркутского государственного университета.*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1. ИГУ

(3952)-521261

БАРЫШНИКОВ Сергей Олегович — *кандидат технических наук профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций.*

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 7

(812) 251-12-21

rector@spbuwc.ru

БАСС Максим Станиславович — *кандидат технических наук доцент директор трансфера технологий Технопарка Забайкальского государственного университета.*

672039, г. Чита, ул. Александро-заводская, д. 30, ЗабГУ

8(3022) 33-43-36

bms77@mail.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — *кандидат технических наук доцент кафедры тепловых электрических станций Забайкальского государственного университета.*

672039, г. Чита, ул. Александро-заводская, д. 30, ЗабГУ

(3022)41-70-85

БАТУХТИН Сергей Геннадьевич — *специалист центра энергосбережения Технопарка Забайкальского государственного университета.*

672039, г. Чита, ул. Александро-заводская, 30, ЗабГУ

(3022) 41-70-85

БЕЗРУКОВА Яна Владимировна — *кандидат технических наук доцент кафедры общей физики Иркутского государственного университета.*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1, ИГУ.

(3952)-521261

БОРТЯКОВ Даниил Евгеньевич — *кандидат технических наук доцент кафедры подъемно-транспортных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-60-88

БУХАРЦЕВ Владимир Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры гидротехнического строительства, заведующий отделением гидротехнических сооружений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)297-59-88

gts.bu@cef.spbstu.ru

ВАГАНОВ Вячеслав Владимирович — *кандидат технических наук профессор заместитель заведующего кафедрой полиграфических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)294-42-15

prvaganov_spb@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ Богдан Юрьевич — *аспирант кафедры электротехники и электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*

199029, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, д. 2

vasilev.bu@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ Сергей Александрович — *аспирант кафедры общей физики Иркутского государственного университета.*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1. ИГУ

(3952)-521261

ВАСИЛЬЕВА Людмила Константиновна — *научный сотрудник научно-исследовательского отдела Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ

(812) 297–97–94

ВОЛОВЕЙ Александр Георгиевич — *аспирант, лаборант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ

volovey@mail.ru

ВОРОНИН Николай Анатольевич — *сотрудник лаборатории аэрокосмической физической оптики ФГУП «Всероссийский научный центр — Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова».*

199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 12

812-323-88-33

nik_v2@mail.ru

ГАНЗУЛЕНКО Оксана Юрьевна — *аспирант 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

ГЕРАСИМОВ Иван Михайлович — *кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

fra@nevalink.net

ГОЛУБ Юлия Александровна — *аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 591-66-58

ГУМЕНЮК Василий Иванович — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 248-92-13

kaf-uzchs@mail.ru

ДАВЫДОВ Константин Игоревич — *инженер кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-71

ДИМЕНТ Лев Иосифович — *кандидат технических наук доцент кафедры прикладной геометрии и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-75-14

kpgd@mail.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — *кандидат технических наук доцент заместитель по учебной работе заведующего кафедрой колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-14-31

kgm-spb@list.ru

ДОБРОБОРСКИЙ Борис Самуилович — *кандидат технических наук доцент кафедры транспортно-технологический машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета*

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, СПбГАСУ

(812) 575-01-95

ДОЛИНОВСКАЯ Регина Васильевна — *аспирант кафедры энергетического и плазменного оборудования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

dolinovskaya@gmail.com

ДОНСКОЙ Виктор Ильич — *кандидат технических наук доцент кафедры общей физики Иркутского государственного университета*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1, ИГУ

(3952)-521261

victor.donskoy@mail.ru

ДУБАРЕНКО Константин Андреевич — *кандидат исторических наук доцент заведующий кафедрой безопасности социальных и технических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)2941274

bsts@fkb.spbstu.ru

ДЬЯЧЕНКО Владимир Алексеевич — *доктор технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-96-86

automats@inbox.ru

ДЮЛЬДИН Максим Викторович — *ассистент кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-71

ЕЖОВА Лилия Игоревна — *студентка 4-го курса физического факультета Иркутского государственного университета.*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1, ИГУ

(3952)-521261

ЕЛИСТРАТОВ Виктор Васильевич — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-77-71

elistratov@cef.spbstu.ru

ЕЛЬШИН Александр Всеволодович — *доктор технических наук старший научный сотрудник, заведующий кафедры проектирования и эксплуатации АЭС Института ядерной энергетики (филиал СПбГПУ в г. Сосновый Бор).*

188540, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, ул. Солнечная, д. 41

(81369) 4-57-74

otd10@mail.ru

ЕФРЕМОВ Сергей Владимирович — *кандидат технических наук доцент, заведующий кафедры безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-9824

sefremov@rambler.ru

ЖГУТОВ Владимир Михайлович — *кандидат технических наук докторант кафедры технологии, экономики и организации строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)297-59-49

abc.kitezh@gmail.com

ИВАНОВ Александр Васильевич — *доктор технических наук профессор начальник управления информационных ресурсов, заведующий кафедрой полиграфических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ

(812)5527526

ivanov@mediabooks.ru

ИГОЛКИН Борис Иванович — *кандидат технических наук доцент старший научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50, СПбТЭИ

(812)528-20-91

bigolkin@rambler.ru

КИРИЛЛОВ Николай Борисович — *доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университет.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552–75–37, 552–93–02

mmftkm@yandex.ru

КИСЕЛЕВ Владимир Геннадьевич — *доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)2474828

kis_vg@mail.ru

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — *доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-75-31

КОБЫЛКИН Михаил Владимирович — *аспирант кафедры тепловых электрических станций Забайкальского государственного университета*

672039, г. Чита, ул. Александро-заводская, д. 30, ЗабГУ

(3022)41-70-85

КОВЕЛЕНОВ Николай Юрьевич — *кандидат технических наук доцент кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-76-64

КОЛГАТИН Сергей Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры экспериментальной физики, декан физико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-90; 552-7959

kolgatin@softimpact.ru

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — *доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

z1dehy97@mail.wplus.net

КОРТИКОВ Николай Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

(812) 552-77-73

n-kortikov@yandex.ru

КОТОВ Константин Анатольевич — *соискатель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

(812)352-47-46

konstantan515@mail.ru

КРИВОНОСОВА Виктория Владимировна — *аспирант кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

(812) 55-77-73

v.v.krivonosova@gmail.com

КУБРЯКОВ Кирилл Андреевич — *студент Забайкальского государственного университета*

672039, г. Чита, ул. Александро-заводская, д. 30, ЗабГУ

(3022) 41-70-85

КУЗНЕЦОВА Ольга Сергеевна — *аспирант кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

(812) 552-64-29

КУКАЛЕНКО Борис Дмитриевич — *кандидат технических наук доцент кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

(812) 552-64-29

uwc99@mail.ru

КОНИЩЕВ Михаил Алексеевич — *кандидат технических наук доцент кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики, директор Центра технологий преобразования ВИЭ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)552-77-71

mak@cef.spbstu.ru

ЛИФШИЦ Елена Андреевна — *аспирант кафедры устойчивого инновационного развития Международного университета природы, общества и человека «Дубна».*

141980, г. Дубна, М.О., ул. Университетская, д. 19

(469621)9-07-10

Grattar@mail.ru

МАТЕНЁВ Олег Александрович — *аспирант кафедры экономики и менеджмента в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-74-36

МЕРКУЛОВА Ольга Васильевна — *старший преподаватель кафедры прикладной геометрии и дизайна Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-14
kpgd@mail.ru

МЕХТИЕВ Вадим Сейдуллаевич — *кандидат технических наук старший научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50, СПбТЭИ
vadim.dag@mail.ru

МИТРОФАНОВ Юрий Александрович — *аспирант кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-21-36
Yurasell@yandex.ru

МОРЕНОВ Валентин Анатольевич — *аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета «Горный»*

199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 2,
(812) 328-82-70

НИКИТКОВ Николай Валентинович — *доктор технических наук профессор кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-76-64
nnvnvi@mail.ru

ОКРЕПИЛОВ Владимир Валентинович — *доктор экономических наук профессор, академик РАН, заместитель председателя Санкт-Петербургского научного центра РАН, член Президиума РАН, генеральный директор ФБУ «Тест-С.-Петербург», советник Президента СПбГПУ.*

190103, г. Санкт-Петербург, ул. Курлядская, д. 1
(812) 244-62-28. 251-39-50, 244-62-27

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич — *доктор технических наук заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 335-58-52

ПАНФИЛОВ Александр Алексеевич — *кандидат технических наук доцент кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-77-71

ПЕТКОВА Ани Петрова — *доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-37, 552-93-02
apetkova@inbox.ru

ПЕТРОЧЕНКО Михаил Романович — *доктор технических наук профессор кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-94-60
fonpetrich@mail.ru

ПИНИГИН Василий Владимирович — *аспирант кафедры тепловых электрических станций Забайкальского государственного университета.*

672039, г. Чита, ул. Александрозаводская, д. 30, ЗабГУ
(3022)41-67-26

ПОПОВ Игорь Олегович — *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д.6, тел.
(812) 294-42-68
Prof.popov@yandex.ru

РАТУШЕВ Дмитрий Владимирович — *аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ
Dmitriy.Ratushev@omzglobal.com

РОМАНЦОВА Ольга Владимировна — *аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ
(812) 552-9824
olga.v.romantsova@gmail.com

РУДСКОЙ Андрей Иванович — *доктор технических наук профессор ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН.*
195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-97-14

РУСИНОВ Ростислав Викторович — *доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-14-31
kgm-spb@list.ru

РЫБАЛКО Владимир Владимирович — *доктор технических наук профессор кафедры атомных и тепловых энергетических установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-89-24
ribalco@yandex.ru

САРКИСОВ Ашот Аракелович — *доктор технических наук академик РАН, советник Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.*
115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52, ИБРАЭ РАН
(495) 955-22-80
sarkisov@ibrae.ac.ru

СЕВАСТЬЯНОВА Анна Вячеславовна — *аспирантка кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-5072
sevastyanova_a@niipt.com

СОКОЛОВ Всеволод Павлович — *кандидат технических наук конструктор лаборатории гидропривода Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-7734

СОЛОВЬЕВ Юрий Владимирович — *преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 555-42-93
yury.solovyev@yahoo.com

СТЕПАНОВ Евгений Юрьевич — *аспирант кафедры энергетического и плазменного оборудования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, СПбГПУ
stepanovjohn@gmail.com

СТОЛЯРОВ Николай Витальевич — *инженер кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-77-71

СЫЧЁВ Сергей Владимирович — *аспирант кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, гл. учебный корпус
(812) 552-64-29

ТИМОФЕЕВ Андрей Николаевич — *доктор технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-96-86
automats@inbox.ru

ТИТОВА Татьяна Ивановна — *доктор технических наук директор НИЦ, генеральный директор ООО «ТК — «ОМЗ-Ижора»*
196651, г. Санкт-Петербург, Колпино, ул. Финляндская, д.13, здание большого инженерного комплекса
Tatyana.Titova@omzglobal.com

ТИХОНОВ Михаил Николаевич — *эксперт журнала «Атомная стратегия»*
198188, Санкт-Петербург, ул. Васи Алексеева, д. 22
(812) 781-01-84

ТОНКОНОГОВ Евгений Николаевич — *кандидат 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

ТУМАНОВ Александр Юрьевич — *доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 294–22–62
toumanov@mail.ru

УЛЫБИН Вячеслав Борисович — *доктор технических наук профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-9824

ФАДИН Юрий Александрович — *доктор технических наук профессор кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, гл.учебный корпус

(812) 552-64-29

ФЕДОСОВСКИЙ Михаил Евгеньевич — *кандидат технических наук генеральный директор ЗАО «Диаконт».*

195274, Санкт-Петербург, ул. Учительская, д. 2, ЗАО «Диаконт»

(812) 334-00-81

diakont@diakont.ru

ФУКС Михаил Дмитриевич — *аспирант, инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».*

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49

(812) 274-16-19

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич — *доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-80-90

plast-ftim@mail.ru

ЧИЖИК Татьяна Александровна — *главный металловед филиала ОАО «Силовые машины — ЛМЗ».*

195009, г. Санкт-Петербург, Свердловская наб., 18

Chizhik_TA@lmz.power-m.ru

ЧУЛКИН Сергей Георгиевич — *доктор технических наук профессор заведующий кафедрой машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, гл.учебный корпус

(812) 552-64-29

ШАБАЛИН Дмитрий Николаевич — *кандидат технических наук доцент кафедры технологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 5527664

shadmit@yandex.ru

ШАБАЛИН Станислав Андреевич — *аспирант института электроэнергетики и электрофизики Российской академии наук.*

191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18

antimac@mail.ru

ШАКИРОВ Мансур Акмелович — *доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, действительный член академии электротехнических наук РФ .*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-75-72

ШАМАХОВ Владимир Александрович — *доктор экономических наук профессор директор Северо-Западного института управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации.*

199178, г. Санкт-Петербург, Средний пр., В.О., д.57/43

(812) 326-01-39

rector@szags.ru

ШУЛЬДЕШОВ Леонид Сергеевич — *профессор кафедры связи факультета военного обучения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 535-53-47

ШКЛЯЕВ Сергей Энгелевич — *начальник лаборатории исследований и испытаний технологических процессов НИЦ ООО «ТК — ОМЗ-Ижора»*

196651, г.Санкт-Петербург, Колпино, ул.Финляндская, д.13, здание большого инженерного комплекса

Sergey.Shklyaev@omzglobal.com

ЩЕРБАЧЕНКО Лия Авенировна — *доктор технических наук профессор, заведующая кафедрой общей физики Иркутского государственного университета*

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 1, ИГУ

(3952)-521261

ЯКОВИЦКАЯ Марина Валентиновна — *зав. лабораторией 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

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Басс М. С., Батухтин С. Г., Кубряков К. А. ГОДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

В статье приведены относительные годовые характеристики систем теплоснабжения комплекса «источник — тепловая сеть — потребитель» для условий Забайкальского края.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ИСТОЧНИК. КОТЕЛЬНАЯ. ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ТЕПЛОПОТЕРИ. ПОТРЕБИТЕЛЬ.

Батухтин А. Г., Пинигин В. В., Кобылкин М. В. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

В статье рассматриваются особенности функционирования и развития современных систем теплоснабжения. Представлен анализ существующих методов оценки эффективности сложных технических систем. Предложен способ оценки способов снижения вредных выбросов от котельных агрегатов ТЭС.

ЭНТРОПИЯ. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ. КОТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ЭКОЛОГИЯ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ.

Безрукова Я. В., Донской В. И., Щербаченко Л. А., Барышников Д. С., Ежова Л. И., Васильев С. А. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ЗАРЯДОВ В ГИДРАТИРОВАННЫХ СИЛИКАТАХ.

Установлено, что в мелкодисперсных системах активные межсоединения способствуют генерации внутренней электрической энергии в отсутствие внешнего источника тока. Обнаружен гидроэлектрический эффект, обеспечивающий накопление большой концентрации электретных зарядов и переход системы в суперионное состояние.

ЭЛЕКТРЕТЫ. ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. СУПЕРИОНИК. РЕЛАКСАЦИЯ. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА. СИЛИКАТЫ.

Киселёв В. Г. ВЛИЯНИЕ ЁМКОСТИ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ.

В статье рассмотрены основные закономерности протекания коррозии по линии водораздела (ватерлиния) в зоне брызг и связь этого процесса с потенциалом погружения (потенциал Биллитера). Предложена электрохимическая модель коррозионного процесса по ватерлинии, позволяющая объяснить вид экспериментально наблюдаемой коррозионной кривой. Повышенное внимание уделено оценке скорости коррозии по ватерлинии в зоне брызг энергетического оборудования.

КОРРОЗИЯ ПО ВАТЕРЛИНИИ. КОРРОЗИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ. МОРСКАЯ КОРРОЗИЯ. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ. КОРРОЗИЯ В ЗОНЕ БРЫЗГ.

Моренов В. А. ПРИМЕНЕНИЕ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ.

Рассматриваются проблемы рационального использования попутного нефтяного газа на примере Тобойского месторождения. Предлагается применение микрогазотурбин Capstone и новой схемы водяного отопления для повышения энергоэффективности промысла.

ПОПУТНЫЙ НЕФТЯНОЙ ГАЗ. МИКРОТУРБИНА. ЭНЕРГИЯ. МОЩНОСТЬ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. РАСХОД.

Ельшин А. В., Абдуллаев А. М. СООТНОШЕНИЕ ВЗАИМНОСТИ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА И ЦЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ НА ГРАНИЦЕ КВАДРАТНОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОСЬМИ ПРОБНЫХ ФУНКЦИЙ.

В методе поверхностных гармоник для построения распределения нейтронов и их ценности в гетерогенном реакторе используется (в каждой ячейке) линейная комбинация некоторых пробных функций и сшивка

распределений на границах ячеек. Для доказательства сопряженности получаемых конечно-разностных уравнений необходимо соотношение между распределением нейтронов и их ценностью на границах ячеек. В работе предложены такие соотношения для двухмерной квадратной решетки при использовании восьми пробных функций.

МЕТОД ПОВЕРХНОСТНЫХ ГАРМОНИК. КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ. ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА. ЦЕННОСТЬ НЕЙТРОНОВ.

Рыбалко В. В. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

В статье рассмотрена актуальная для большинства объектов энергетики задача мониторинга (распознавание и оценка) технического состояния в процессе эксплуатации. Предложены решения этой задачи на основе методов статистического анализа многомерной эксплуатационной информации. Работоспособность созданной процедуры контроля технического состояния энергетических объектов подтверждена при анализе эксплуатационных параметров современных газотурбинных двигателей, используемых в энергетике Российской Федерации.

МОНИТОРИНГ. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ. МНОГОМЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ.

Севастьянова А. В. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ АНАЛИЗА СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ.

В статье предложен алгоритм структурного анализа схемно-режимных особенностей электроэнергетических систем, предназначенный для выявления проблемных участков в энергосистемах. Алгоритм основан на поиске элементов электрической сети, аварийное отключение которых приводит к недопустимому изменению параметров установившегося режима. Расчеты ведутся в нормальной и ремонтных схемах. Приведен пример применения разработанного алгоритма для анализа схемно-режимных особенностей электрической сети 110 кВ Санкт-Петербурга.

НАДЕЖНОСТЬ. НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ. ПОСЛЕАВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ. АЛГОРИТМ.

Соловьев Ю. В., Тонконогов Е. Н. О ВЛИЯНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИЩЕННЫХ ПРОВОДОВ ВЛ 6–35 КВ НА ОТКЛЮЧАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Проведен расчет величин токов короткого замыкания (КЗ) для конкретной схемы сети 0,4–35 кВ с учетом эксплуатационных характеристик защищенных проводов. Определены трехфазные и двухфазные токи, а также мощности КЗ в расчетных точках схемы. Сравнительный (со случаем неизолированных проводов) анализ результатов показал снижение трехфазных токов КЗ для соответствующих расчетных точек схемы в среднем на 10–15 %. Трехфазные токи КЗ, являющиеся наиболее тяжелыми воздействиями на коммутационную аппаратуру, для конкретной схемы оказались на порядок меньше отключающей способности современных вакуумных и элегазовых выключателей, имеющих широкое применение в сетях среднего напряжения, что свидетельствует: по отключающей способности параметры выбранных коммутационных аппаратов являются завышенными по сравнению с реальными условиями эксплуатации, и это значительно удорожает строительство таких сетей. Альтернативной может быть использование выключателей нагрузки, технико-экономическая эффективность которых должна быть обоснована в рамках конкретного проекта с учетом планов развития сети.

ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. ЗАЩИЩЕННЫЙ ПРОВОД. ОТКЛЮЧАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ. ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ.

Шакиров М. А. ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЧАСТЬ 1: ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР С ТОНКИМИ ОБМОТКАМИ.

Выведены ранее неизвестные аналитические соотношения, подтверждающие достоверность новой теории броневых трансформаторов и их 2Т-образных схем замещения. Доказано, что передача мощности в трансформаторе сопровождается фазовым сдвигом между потоками в стержне и боковом ярме. Внезапное короткое замыкание приводит к внедрению постоянного магнитного поля в сталь трансформатора.

ТРАНСФОРМАТОР. ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ ОБМОТКИ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Степанов Е. Ю., Долиновская Р. В., Шабалин С. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ПЛАЗМОТРОНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИЗМЕНЕНИЕМ РОДА И РАСХОДА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ.

В статье описываются результаты серии экспериментов по работе плазмотронов переменного тока промышленной частоты. В качестве плазмообразующих сред использовались воздух и углекислый газ. Получены

осциллограммы работы системы «источник питания — электродуговой плазмотрон переменного тока». Для различных расходов плазмообразующих сред построены динамические вольтамперные характеристики. Уделено внимание поведению дугового канала как нагрузки системы питания.

ПЛАЗМОТРОН. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА. ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИЕ ГАЗЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Барилович В. А. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТЕПЛОВОГО НАСОСА.

Предложен тепловой и гидро-газодинамический расчет теплообменников теплового насоса при наличии фазовых переходов. Составлена система обыкновенных дифференциальных уравнений для двухслойной и паро-капельной моделей с учетом переменной массы, реализуемая в среде Visual Fortran. Приведены результаты расчета.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС. ИСПАРИТЕЛЬ. КОНДЕНСАТОР. ПЕРЕОХЛАДИТЕЛЬ. ИЗОБУТАН. ДВУХФАЗНЫЙ ПОТОК. СТЕПЕНЬ СУХОСТИ ПАРА. ГРАДИЕНТ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ. ОТОПИТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ.

Бортяков Д. Е., Соколов В. П. УЧЕТ ТРЕНИЯ В ШАРНИРАХ МНОГОЗВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ.

Впервые при силовом расчёте многозвённого механизма учтено трение в шарнирах. Определены критические значения углов наклона силового звена, до которых механизм остаётся неподвижным.

СИЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ. МНОГОЗВЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ. УЧЁТ ТРЕНИЯ.

Кукаленко Б. Д., Чулкин С. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК БАЛЛОНОВ ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МУФТ.

Уточнена методика расчета основных статических нагрузок баллонов шинно-пневматических муфт. Предложены формулы для определения линейных напряжений и усилий в нитях кордного каркаса от давления сжатого воздуха и приложенного момента вращения при расчете прочности резино-кордного баллона. Они могут быть применены при модернизации и разработке новой методики расчета шинно-пневматических муфт.

ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ МУФТА. СТАТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА. ПРОЧНОСТЬ. РЕЗИНО-КОРДНЫЙ БАЛЛОН.

Русинов Р. В., Добрецов Р. Ю., Герасимов И. М. К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

В статье рассмотрен вопрос практического применения математической модели теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания, в которой учитывается только тепловая энергия рабочего тела, используемая непосредственно для производства механической энергии. Предложено производить построение математической модели цикла и расчет по ней для ряда согласованных соотношений теплот, подводимых при постоянном объеме и постоянном давлении, в функции степени предварительного расширения с последующим анализом полученных результатов.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Барышников С. О. СЛОЖНЫЙ ИЗГИБ ОБШИВКИ СУДНА.

Предложен итерационный метод наложения исправляющих функций для решения задачи изгиба прямоугольной защемленной пластины под действием поперечной нагрузки и сжимающих усилий в ее плоскости. Поперечная нагрузка разлагается в двойной ряд Фурье. Частное решение и исправляющие функции в виде гиперболо-тригонометрических рядов дают в пределе точное решение.

ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ЗАЩЕМЛЕННАЯ ПЛАСТИНА. СЛОЖНЫЙ ИЗГИБ. ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД. РЯДЫ ФУРЬЕ. ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ.

Рудской А. И., Анастасиади Г. П., Орыщенко А. С., Кондратьев С. Ю., Фукс М. Д. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 3: МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ.

На основании результатов экспериментальных исследований и расчетно-теоретического анализа объяснен механизм фазовых превращений в литом жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температуре 1150 °С. Показано, что фактором, определяющим направленность процесса трансформации структуры (образование, рост и растворение фаз) при длительных высокотемпературных выдержках в сплавах на железо-хром-никелевой основе является концентрация электронных дырок. При этом кинетически процесс лимитируется диффузией элемента замещения с наибольшим соотношением его концентрации в новой фазе и в матрице ($C_ф/C_0$).

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. МИКРОСТРУКТУРА. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ. МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ. СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ.

Митрофанов Ю. А., Попов И. О. ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ФЛЮСА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТ-НАТРИЕВОГО СИЛИКАТА В ПРОЦЕССАХ ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ.

В статье описана возможность применения эгиринового концентрата (техногенного отхода ОАО «Апатит») в качестве комплексного флюса в процессе огневого рафинирования медных сплавов с целью улучшения основных технико-экономических показателей процесса. Описаны лабораторные испытания исследуемого флюса по обоснованию его рафинирующей способности.

МЕТАЛЛУРГИЯ МЕДИ. КВАРЦЕВЫЙ ФЛЮС. ЭГИРИНОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ. ОГНЕВОЕ РАФИНИРОВАНИЕ. СТЕПЕНЬ РАФИНИРОВАНИЯ. МЕДЬ.

Никитков Н.В., Ковеленов Н.Ю., Шабалин Д.Н. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.

В статье рассмотрены вопросы аналитического расчета режимов резания алмазными кругами хрупких заготовок. Предложены зависимости для вычисления режимов шлифования твердых хрупких материалов.

РЕЖИМЫ, ПЛОТНОСТЬ ЗЕРЕН, АЛМАЗНЫЕ КРУГИ, ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ.

Ганзуленко О. Ю., Кириллов Н. Б., Петкова А. П., Яковицкая М. В. ПОВЫШЕНИЕ ВОДОРОДОСТОЙКОСТИ АУСТЕНИТНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.

Выявлены закономерности и структурно-физические механизмы снижения водородопроницаемости аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей путем рационального выбора их химического состава и химико-термической обработки поверхности с целью повышения стойкости к длительному воздействию повышенных температур и водородосодержащих сред. Предложен режим химико-термической обработки деталей внутриреакторных устройств, позволяющий снизить водородопроницаемость разработанной аустенитной стали на три порядка по сравнению с неокисленным состоянием. Даны рекомендации по его применению для создания многослойных систем очехловки отдельных элементов и блоков гидридных изделий.

АУСТЕНИТНЫЕ ХРОМОНИКЕЛЕВЫЕ СТАЛИ. ВОДОРОДОСТОЙКОСТЬ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.

Титова Т. И., Цеменко В. Н., Ратушев Д. В., Шкляев С. Э., Чижик Т. А. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА.

В данной работе изучено влияние режимов термической обработки на свойства и структуру новой высокохромистой стали типа Х11МНАФБ. Представлены результаты исследований микроструктуры, испытаний кратковременных механических свойств при комнатной температуре, переходной температуры хрупкости и длительной прочности.

ХРОМИСТЫЕ СТАЛИ. ЗАГОТОВКИ РОТОРОВ. СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА (ССКП). ДВОЙНАЯ ЗАКАЛКА. МИКРОСТРУКТУРА. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ.

Кузнецова О. С., Сычёв С. В., Фадин Ю. А., Чулкин С. Г. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Предложен метод оценки состояния узлов трения, основанный на анализе спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии, для определения износа материалов без остановки самого процесса трения. Разработан подход количественной оценки износа при повышенных скоростях трения. Проведен сравнительный анализ методов контроля износа с получением высоких коэффициентов корреляции.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. ИЗНОС. МОНОКРИСТАЛЛЫ И КЕРАМИКИ. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ.

Кортиков Н. Н., Кривоносова В. В. ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ СО СТОЛБИКАМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ И ВИХРЕВОЙ МАТРИЦЕЙ.

Сопоставлены опытные данные и эмпирические зависимости для расчета гидравлического сопротивления и интенсификации теплообмена в каналах со столбиками-туррбулизаторами и вихревой матрицей. Проведена их экспертная оценка с помощью коэффициентов Тейла и предложены новые расчетные зависимости.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА. СТОЛБИКИ-ТУРБУЛИЗАТОРЫ. ВИХРЕВАЯ МАТРИЦА. ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕЙЛА.

Сычёв С. В., Кузнецова О. С., Фадин Ю. А., Чулкин С. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ КЕРАМИК.

Рассмотрена эволюция поверхностных шероховатостей на начальном этапе трения. Предложен метод оценки времени приработки, основанный на вейвлет-анализе сигналов акустической эмиссии, возникающих в процессе трения.

ТРЕНИЕ. ИЗНОС. ПРИРАБОТКА. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. ШЕРОХОВАТОСТИ. ВЕЙВЛЕТЫ. КЕРАМИКИ.

Елистратов В. В., Конищев М. А., Давыдов К. И., ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОНАПОРНОГО БЛОКА МИКРО-ГЭС.

В статье рассматривается актуальная задача совершенствования конструкции и повышения эффективности работы низконапорных блоков микро-ГЭС на основе лабораторных энергогидравлических исследований. Разработана методика проведения энергетических испытаний блока микро-ГЭС с диаметром рабочего колеса 350 мм на экспериментальном стенде в лаборатории гидроэнергетических установок кафедры ВИЭГ. Получены рабочие характеристики и построена универсальная характеристика блока микро-ГЭС с рабочим колесом ПЛ984–35. На основе результатов испытаний предложены изменения в конструкцию для повышения к.п.д. микро-ГЭС.

МИКРО-ГЭС. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД. ГИДРОТУРБИНА. НИЗКИЕ НАПОРЫ. УНИВЕРСАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Бухарцев В. Н., Петриченко М. Р. ТРАНСЛЯЦИОННАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ФОРМУЛЫ ДЮПЮИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ПРОМЕЖУТКА ВЫСАЧИВАНИЯ.

Доказаны: независимость величины фильтрационного расхода в движении со свободной поверхностью от оператора сдвига $U_l := \exp\left(l\frac{d}{dx}\right)$; сходимость полученных решений для депрессионной кривой к решению Дюпюи при $l \to +0$ (длинные перемычки, длинные потоки), равномерная по длине потока; сходимость $\Delta \to +0$ при удлинении перемычки, равномерная по глубине наполнения нижнего бьефа.

ПЕРЕМЫЧКА. КРИВАЯ ДЕПРЕССИИ. ПРОМЕЖУТОК ВЫСАЧИВАНИЯ. УРАВНЕНИЕ ДЮПЮИ.

Колгатин С.Н. КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА, БИНОДАЛЬ, СПИНОДАЛЬ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ УРАВНЕНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА.

Одним из перпективных направлений развития новых технологий является использование веществ, находящихся на грани или даже за гранью термодинамического равновесия. Между тем из-за недостатка времени соотвествующие разделы часто выводятся за рамки курса общей физики. В предлагаемой статье приводятся начальные сведения, необходимые для студентов или молодых специалистов, начинающих работать в данной области. На примере уравнения Ваальса введены понятия критических параметров, бинодали, спинодали, метастабильной области. Статья предназначена для преподавателей физики, планирующих структуру будущего курса, а также для специалистов, впервые сталкивающихся с перечисленными понятиями в научной или педагогической работе. Материал статьи может быть использован для организации самостоятельной работы студентов.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВА. МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ. МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ.

Дюльдин М. В., Панфилов А. А., Столяров Н. В. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРОВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ.

В статье рассматривается актуальная задача совершенствования методов измерения основных характеристик ветрового потока, анализируются практические способы и современные технологии проведения ветромониторинга для нужд ветроэнергетики, преимущества и недостатки способов проведения натурных измерений скорости и направления ветрового потока в приземном двухсот метровом слое атмосферы в местах непосредственного размещения ветроэлектрических установок.

ВЕТРОМОНИТОРИНГ. СКОРОСТЬ ВЕТРА. НАПРАВЛЕНИЕ ВЕТРА. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ.

Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. АНАЛИЗ СТРУКТУР И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

Рассмотрены принципы построения различных манипуляционных систем космического назначения, дан анализ структур и функциональных возможностей одиночных стационарных манипуляторов и мобильных робототехнических систем с двумя и тремя автономными манипуляторами.

КОСМИЧЕСКИЕ МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. РАЦИОНАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ. АНАЛИЗ. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ.

Иванов А. В., Ваганов В. В., Котов К. А. ВЫБОР СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.

Для решения проблемы обеспечения эффективности функционирования программно-алгоритмической компоненты АСУ ТП полиграфического производства использован комбинаторно-графовый подход на основе решения задачи о наименьшем разбиении.

ТИПОГРАФИЯ. ПЕЧАТНЫЕ МАШИНЫ. ДОПЕЧАТНАЯ ПОДГОТОВКА. ПОСЛЕ ПЕЧАТНАЯ ПОДГОТОВКА. ТЕХНОЛОГИЯ.

Голуб Ю. А., Матенёв О. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКОГО КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ: АНАЛИЗ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ.

В статье рассмотрены основные подходы и методы проектирования баз данных, даны их краткие характеристики, а также рассмотрен пример разработки структуры базы данных на основе выделенных методов и подходов.

БАЗА ДАННЫХ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. СТРУКТУРА. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ.

Васильев Б. Ю. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МЕТОДАМИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.

Рассмотрена структура парка газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и приведена его краткая характеристика. Рассмотрены структура электроприводных ГПА (ЭГПА) и способы повышения энергоэффективности электропривода за счет использования нечеткого управления. Приведены современные конструкции ЭГПА.

ЭЛЕКТРОПРИВОД. ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЙ АГРЕГАТ. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ. НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА.

Васильева Л. К., Воловей А. Г., Иголкин Б. И., Мехтиев В. С. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ.

Дано описание устройства для изучения электрофизических свойств растительных масел, особенностью которого является возможность определения характеристической частоты и характеристической электропроводности в диапазоне частот синусоидального поля от 0,9 до 100 кГц с дискретностью (шагом) рабочей частоты в 1,0 кГц.

УСТРОЙСТВО. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА. ЧАСТОТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Соколов В. П. О ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЁТОВ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА).

Рассчитана надёжность комплексов защиты от наводнений Лондона и Санкт-Петербурга. Надёжность КЗС Санкт-Петербурга существенно меньше.

НАДЕЖНОСТЬ. КОМПЛЕКС ЗАЩИТЫ ОТ НАВОДНЕНИЙ.

Туманов А. Ю. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА И БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИЙ.

В рамках решения задачи предотвращения и прогнозирования неблагоприятных событий (аварии, происшествия, инциденты, катастрофы) решаемой с применением средств автоматизации, разработана и реализована автоматизированная система количественной оценки риска, которая является экспертной объектно-модульной системой поддержки принятия решений посредством анализа субъективно-вероятностными квазистатистическими методами данных и извлечения знаний из эмпирической информации в условиях частичной неопределенности.

СИСТЕМА. АВТОМАТИЗАЦИЯ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. ОПАСНОСТЬ. ОПАСНЫЙ ОБЪЕКТ ЭНЕРГЕТИКИ. БАЗА ЗНАНИЙ. АВАРИЯ.

Гуменюк В. И., Доброборский Б. С., Федосовский М. Е. О ПРОБЛЕМЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ.

В статье рассмотрены вопросы количественного учета физиологических свойств организма человека при решении проблем согласования действий противоаварийных автоматических систем и оперативного персонала в случае наступления чрезвычайных ситуаций на объектах энергетики.

ТЕРМОДИНАМИКА. БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ.

Авакян С. В., Воронин Н. А., Дубаренко К. А. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА АВАРИЙНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ И СВЯЗИ.

Рассмотрено влияние геомагнитных бурь на объекты техносферы и в первую очередь на электрические сети. Показано, что основной причиной аварийности на линиях электропередач и связи являются геомагнитно-индуцированные токи, генерируемые во время магнитных бурь переменными магнитными полями в проводящих системах. Рассмотрен дополнительный фактор, усиливающий эффекты геомагнитных бурь в техносфере, — дрейф магнитного полюса в Северном полушарии в сторону арктического побережья России. Предложено создать единый «Центр гелиогеофизических проблем и прогноза воздействий на окружающую среду и техносферу», в том числе с использованием результатов мониторинга «Постоянный космический солнечно-магнитосферный патруль».

МАГНИТНЫЕ БУРИ. ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТЕХНОСФЕРУ. МАГНИТНЫЙ ПОЛЮС. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ.

Улыбин В. Б., Ефремов С. В., Романцова О. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА.

В статье рассмотрены три существующих промышленных способа производства пероксида водорода (электрохимический, антрахинонный и изопропиловый). Особое внимание уделено вопросам обеспечения пожароврывобезопасности. На основании проведенного критического анализа показано, что изопропиловая технология, являющаяся наиболее перспективной в РФ, с точки зрения безопасности представляет особый интерес и требует самого тщательного исследования.

ПЕРОКСИД ВОДОРОДА. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД. АНТРАХИНОННЫЙ МЕТОД. ИЗОПРОПИЛОВЫЙ МЕТОД. ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТЬ.

Гуменюк В. И., Тихонов М. Н., Федосовский М. Е. ПОСТФУКУСИМСКИЙ СИНДРОМ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.

На основе анализа открытых публикаций систематизирован и обобщен обширный материал о постфукусимском синдроме. Много внимания уделено проблеме возникновения, углубления (вплоть до превращения в катастрофу) и ликвидации нештатной ситуации. Представленный материал — своеобразная иллюстрация того, насколько масштабны, сложны и непредсказуемы самые мрачные сценарии в атомной отрасли в плане обеспечения ядерной и радиационной безопасности населения.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. ОБЛУЧЁННАЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ СБОРКА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА. КОНТАЙНМЕНТ. РАДИАЦИЯ. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ. РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ. ДОЗА ОБЛУЧЕНИЯ.

Жгутов В. М. МЕТОД КОНСТРУКТИВНОЙ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЁСТКОСТИ РЕБЕР И РАЗЛИЧНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ.

Предложен метод конструктивной анизотропии для подкрепленных (ребристых) оболочек, при котором совместно учитываются геометрическая нелинейность, поперечные сдвиги, дискретное расположение ребер, их конечная ширина, высота (постоянная или переменная), сдвиговые и крутильные жесткости, а также ортотропия, нелинейная упругость и ползучесть материалов.

РЕБРИСТЫЕ ОБОЛОЧКИ. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ. ПОПЕРЕЧНЫЕ СДВИГИ. СДВИГОВАЯ И КРУТИЛЬНАЯ ЖЁСТКОСТИ РЁБЕР. ОРТОТРОПИЯ. НЕЛИНЕЙНАЯ УПРУГОСТЬ И ПОЛЗУЧЕСТЬ МАТЕРИАЛОВ.

Шамахов В. А. МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ИНСТИТУТА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье рассматриваются различные аспекты развития Северо-Западного института Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации как важной части формирующегося на базе Президентской академии образовательного кластера: формирование академической среды, реализация стандартов качества ИСО и Европейской ассоциации гарантии качества в высшем образовании, формирование центров превосходства.

РАЗВИТИЕ ВУЗА. АКАДЕМИЧЕСКАЯ СРЕДА. СТАНДАРТЫ КАЧЕСТВА.

Лифшиц Е. А. АНАЛИЗ УРОВНЯ МОТИВАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВУЗАХ.

В работе рассмотрена алгоритм совершенствования процесса обучения учащихся на основе повышения уровня мотивации, и ее практическое использование на примере студентов Международного университета природы, общества и человека "Дубна".

МОТИВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ. ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧЕБЫ. РАЗНООБРАЗИЕ УЧЕБЫ. ОДНОЗНАЧНОСТЬ УЧЕБНОГО ЗАДАНИЯ. ЗНАЧИМОСТЬ УЧЕБЫ. АВТОНОМНОСТЬ. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ. ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ.

Гуменюк В. И., Доброборский Б. С., Федосовский М. Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО УЧЕТА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА.

Статья посвящена анализу процессов фенотипической адаптации работников энергетических объектов и их способности к работе в чрезвычайных ситуациях в результате обучения и тренировок на тренажерах.

ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ. ОБУЧЕНИЕ. ТРЕНАЖЕРЫ. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ.

Афанасьева И. Б., Димент Л. И., Меркулова О. В. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СТУДЕНТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ.

В статье рассмотрены теоретические и методические основы формирования пространственных представлений умений в процессе обучения. Рассмотрена совокупность педагогических условий для формирования пространственного интеллекта как разновидности образного мышления.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ. МЫШЛЕНИЕ. УЧЕБНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ. НАЧЕРТАТЕЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ.

Дьяченко В. А. УСЛОВИЯ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ ШИРОКОГО ПРОФИЛЯ.

На основе анализа тенденций развития наукоемкой техники и современных технологий проектирования сформулированы комплексные требования к условиям подготовки конструкторов-машиностроителей нового поколения.

КОНСТРУКТОРЫ-МАШИНОСТРОИТЕЛИ. ШИРОКИЙ ПРОФИЛЬ. УСЛОВИЯ ПОДГОТОВКИ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Bass M. S., Batuhtin S. G., Kubryakov K. A. ANNUAL CHARACTERISTICS FOR HEAT SUPPLY SYSTEMS.

In article are brought relative annual feature for systems of the centralized supply in Zabaykaliskom Krai for the complex: source - heat network - consumer.

ENERGY-SAVING. SOURCE. BOILER-HOUSE. HEAT CIRCUITS. THERMAL INSULATION. THERMAL ENERGY. LOSS OF HEAT. CONSUMER.

Batuhtin A. G., Pinigin V. V., Kobilkin M. V. ANALYSIS METHODS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF DISTRICT HEATING SYSTEMS.

The features of functioning and development of modern systems of a heat supply are considered in the article. The analysis of existing methods of an estimation of efficiency of difficult technical systems is presented. The way of an estimation of ways of decrease in harmful emissions from boiler units of thermal power stations is offered.

ENTROPY. EXERGETICHESKY METHOD OF THE ESTIMATION. BOILER INSTALLATION. ECOLOGY. THERMODYNAMIC CYCLE.

Bezrukova Ya. V., Donskoy V. I., Scherbachenko L. A., Baryshnikov D. S., Yezhova L. I., Vasiliev S. A. FEATURES OF THE RELAXATION OF ELECTRET CHARGES IN HYDRATED SILICATES.

The active surfaces in the fine disperse silicates assist to the generation of power in absence of an external power source is found out.

Hydroelectric effect which is supplying the accumulation of high concentration of electret charges and the transition the system to the superionic state is discovered.

ELECTRETS. HYDROELECTRIC EFFECT. SUPERIONIC. RELAXATION. CHARGE TRANSFER. SILICATES.

Kiselev V. G. THE INFLUENCE OF THE ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITANCE AT THE RATE OF CORROSION AT THE PHASE BOUNDARY.

In the article are examined basic laws governing the flow of corrosion on the line of watershed (water line) in the zone of drops and the connection of this process with the potential of sinking (by potential Of [billitera]). Is proposed the electrochemical model of corrosive process on the water line, which makes it possible to explain the form of corrosive curve. The increased attention is given to the calculated of the speed of corrosion according to the water line in the zone of drops of power machinery equipment.

CORROSION ON THE WATER LINE. THE CORROSIVE ELEMENT. SEA CORROSION. ELECTROCHEMICAL CORROSION. CORROSION IN THE ZONE OF DROPS.

Morenov V. A. APPLICATION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS AS AN ENERGY CARRIER

Problems of associated petroleum gas rational usage in conditions of Toboiskoe oilfield are considered in the article. Implement of Capstone gas microturbines and new scheme of water heating for oilfield energy efficiency increase is advised.

ASSOCIATED PETROLEUM GAS. MICROTURBINE. ENERGY. POWER. EFFICIENCY. CONSUMPTION.

Elshin A.V., Abdullaev A.M. RECIPROCITY RELATION BETWEEN NEUTRON DISTRIBUTION AND NEUTRON IMPORTANCE AT SQUARE CELL BOUNDARY WITH USAGE OF EIGHT TRIAL FUNCTIONS.

In the surface harmonics method, to derive the finite-difference equations for a heterogeneous reactor the neutron flux distribution and neutron importance distribution in each cell of the reactor are represented as a linear combination of some trial functions. Reciprocity relation between neutron distribution and neutron value at the cell boundary is necessary to prove the adjointness of the finite-difference equations. In this paper we present this reciprocity relation for two-dimensional geometry with the use of eight trial functions.

SURFACE HARMONICS METHOD. FINITE-DIFFERENCE EQUATIONS. NEUTRON FLUX. NEUTRON IMPORTANCE.

Ribalko V. V. DIAGNOSING OBJECTS OF INDUSTRIAL OF ENERGY.

In this article the current facilities for the majority of energy monitoring task (recognition and evaluation) technical condition during operation. Proposed to solve this problem, based on multivariate statistical analysis of operational information. The efficiency established procedures for monitoring the technical conditions of power plants is confirmed by the analysis of the operational parameters of a modern gas turbine engine used in the power of the Russian Federation.

MONITORING. DIAGNOSING OF THE TECHNICAL CONDITION. MULTIDIMENSIONAL STATISTICAL ANALYSIS. GAS-TURBINE ENGINES.

Sevastyanova A. V. DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR ANALYSIS OF SCHEMATIC PERCULIARITIES AND OPERATIONAL CONDITIONS OF POWER SYSTEMS.

In the article an algorithm of structural analysis of schematic and operational peculiarities of electric power systems intended for defining problem areas in a power system is suggested. The algorithm is based on searching for electric grid elements, which emergency tripping results in inadmissible variations of steady state parameters. Calculations are performed in normal and repair schemes. An example of the algorithm application for the analysis of schematic and operational conditions of 110 kV electric grid of Saint-Petersburg is given.

RELIABILITY. NORMAL OPERATION CONDITIONS. POST-FAULT OPERATION CONDITIONS. ALGORITHM.

Solovyev Y. V., Tonkonogov E. N. ON THE INFLUENCE OPERATIONAL CHARACTERISTICS PROTECTED WIRES FOR OVERHEAD LINES 6-35 KV BREAKING CAPACITY OF SWITCHING EQUIPMENT

The model calculation of fault currents for the defined network circuit 0,4-35 kV with aspect to the performance characteristics of covered conductors is performed. Three-phase and two-phase fault currents with fault power capacities are defined. Performed calculation by using method in the case of traditional non-insulated conductors provided the possibility to carry out the comparable analysis of results indicated decreasing three-phase fault currents for the existing control points at 10-15%. Three-phase fault currents for the investigated circuit define the most severe switching conditions for circuit breakers. Obtained values are an order less in comparison with switching capability of modern circuit breakers for medium voltages. It confirms the switching capability parameters of the circuit breakers are higher that it needed according to the real circuit conditions. Besides, the costs of the network construction increase. In this case using load interrupter switches can be as an alternative variant but technical and economic efficiency should be proved in the frames of the project with aspects to the development plan of the network.

FAULT CURRENT. COVERED CONDUCTOR. SWITCHING CAPABILITY. CIRCUIT BREAKER.

Shakirov M. A. THEORY OF TRANSFORMERS. PART 1: IDEALIZED TRANSFORMER WINDINGS WITH THIN.

Deduced analytical expressions previously unknown to the credibility of the new theory of armored of transformers and 2T-shaped equivalent circuits. Is proved that the transfer of power in the transformer accompanied by a phase shift between the flow in the core and side yoke. A sudden short circuit leading to the introduction of a constant magnetic field in the transformer steel.

TRANSFORMER. THE PRIMARY WINDING. THE SECONDARY. THE MAGNETIC FLUX. VECTOR DIAGRAM. RESISTANCE OF SHORT CIRCUIT.

Dolinovskaya R. V., Stepanov E. U., Shabalin S. A. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PROCESSES OF ELECTRIC ARCH AC PLASMA GENERATORS OPERATION WITH DIFFERENT FLOW RATES OF PLASMA FORMING GASES.

The results of experiments with 50Hz AC plasma generators are described. For plasma creation air and carbon dioxide were used. Oscillograms of system "power supply – electric arch plasmatron as load for power supply" were obtained. Dynamic current-voltage characteristic for different plasma forming gases were analyzed. Behavior of arch discharge channel as a load for power supply was described.

PLASMA GENERATOR. ELECTRIC ARCH. PLASMA FORMING GASES. MODELING.

Barilovich V. A. CALCULATION OF HEAT EXCHANGERS OF THE HEAT PUMP

Heat and hydro-gasdynamic calculation of heat exchangers for the heat pump with phase converts is offered. The system of the ordinary differential equations for stratified (two-phase) and vapor-drop flow with variable mass models is delivered. The results of calculation realized in surroundings Visual Fortran and are shown in the paper.

HEAT PUMP. EVAPORATOR. CONDENSER. AFTERCOOLER. ISOBUTANE. TWO-PHASE FLOW. STEAM DRYNESS. STATIC PRESSURE GRADIENT. HEATING FACTOR.

Bortyakov D. E., Sokolov V. P. ALLOWANCE FOR FRICTION IN HINGES OF MULTIJOINED GEARS.

For the first time calculating the force of multijoined gears' work takes into account friction in hinges. We calculated critical angles of force join, until mechanism stays motionless.

CALCULATING OF THE FORCE OF MULTIJOINED GEARS. ALLOWANCE FOR FRICTION IN HINGES.

Kukalenko B. D, Chulkin S. G. THE STUDY AND CALCULATION OF THE MAIN STEADY-STATE LOADS BALLOON BUS-PNEUMATIC MUFFS.

The elaborated methods of the calculation of the main steady-state loads balloon bus-pneumatic muffs. The offered formulas for determination of the linear voltages and force in thread of kordnyy framework from pressure of the compressed air and attached moment of the rotation at calculation of toughness of the rubber-kordnyy balloon. The got correlations can be applying at modernizations and development of the new methods of the calculation bus-pneumatic muffs.

BUS-PNEUMATIC MUFF. STEADY-STATE LOAD. TOUGHNESS. RUBBER-KORDNYY BALLOON.

Rusinov R. V., Dobretsov R. U., Gerasimov I. M. ON CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS HEAT CYCLE INTERNAL COMBUSTION ENGINES.

Practical application of thermal-cycle mathematical model of internal combustion piston engines, which takes into account only the thermal energy of the working fluid that is used directly for the production of mechanical energy is considered. It is proposed to make the construction of a mathematical model and calculation of the thermal cycle on it for a number of agreed ratios of the heats of that supplied at constant volume and constant pressure as a function of the degree of expansion, followed by a preliminary analysis of the results.

DIESEL ENGINE. RUNNING CYCLE. PROFITABILITY.

Baryshnikov S. O. COMPLEX BENDING OF SHIP□S SHELL.

The article proposes an iteration method of a correcting function superposition for the solution problem of bending rectangular clamped plate under the normal load and squeeze force along plane. Normal load is developed as the double Fourier series. Special solution and correcting function in the form of hyperbolic-trigonometric series bring exact solution.

RECTANGULFR CLAMPED PLATE. COMPLEX BENDING. ITERATION METHOD. FOURIER SERIES. EXACT SOLUTION.

Rudskoy A. I., Anastasiadi G. P., Orischenko A. S., Kondratyev S. Yu., Fuks M. D. FEATURES OF STRUCTURAL CHANGES IN HEAT-RESISTANT ALLOY 45Х26Н33С2Б2 AT OPERATING TEMPERATURES. RECORD 3. MECHANISM AND KINETICS OF PHASE TRANSFORMATIONS.

The mechanism of phase transformations in cast heat-resistant alloy 45Х26Н33С2Б2 at the temperature of 1150°C is explained based on the results of experimental studies and calculated-and-theoretical analysis. It is shown that the factor determining the direction of the transformation of the structure (formation, growth and dissolution of phases) during long exposures to high temperature in alloys on the iron-chromium-nickel-base is the concentration of electron holes. The kinetically process is limited by the diffusion of the replacing item with the highest ratio of its concentration in a new phase and in the matrix ($C_ф/C_0$).

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. MICROSTRUCTURE. PHASE COMPOSITION. MECHANISM AND KINETICS OF PHASE TRANSFORMATIONS. STRUCTURAL STABILITY.

Mitrofanov, Y. A., Popov I. O. A COMPLEX STUDIES OF FLUX-BASED FERRITE-SODIUM SILICATE IN THE PROCESS OF FIRE REFINING OF COPPER.

This article describes the possibility of aegirine concentrate (man-made waste "Apatit") as an integrated flux in the fire refining of copper alloys to improve the basic technical and economic parameters of the process. We describe the laboratory tests to validate the test flux of its refining capacity.

METALLURGY OF COPPER. QUARTZ FLUX. AEGIRINE CONCENTRATE. FIRE REFINING. DEGREE OF REFINING. COPPER.

Nikitkov N. V., Kovelenov N. Y., Shabalin D. N. CALCULATION MODE CUTTINGS UNDER DIAMOND CUTTING STOCKING UP FROM HARD FRAIL MATERIAL.

Questions of the analytical calculation mode cuttings diamond circle frail stocking up are considered In article. The Offered dependencies for calculation mode cutting hard frail material.

MODES. DENSITY OF GRAINS. DIAMOND CIRCLES. CALCULATION OF MODES OF PROCESSING.

Ganzulenko O. Y., Kirillov N. B., Petkova A. P., Yakovitsky M. V. INCREASE VODORODOSTOYKOSTI AUSTENITIC CORROSION-RESISTANT CHROMIUM-NICKEL STEEL HIGH TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR POWER PLANTS.

Revealed the regularities of structural and physical mechanisms to reduce the permeability of hydrogen through austenitic corrosion-resistant chromium-nickel steels by rational choice in their chemical composition and thermochemical surface treatment to improve the resistance to long-term impact of the elevated temperatures and hydrogen-containing environments. Designed regime thermochemical processing of parts in-core devices, allowing to reduce the permeability of hydrogen through austenitic steels developed by three orders of magnitude compared with the unoxidised state. Proposed its use to create multilayer systems covers individual elements and the blocks of hydride products.

AUSTENITIC CHROMIUM-NICKEL STEEL. VODORODOSTOYKOST. POWER PLANTS.

Titova T. I., Tsemenko V. N., Ratushev D. V., Shklyav S. E., Chizhik T. A. INFLUENCE OF MODES HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-CHROMIUM STEEL MARTENSITE CLASS.

This thesis investigated influence of heat treatment on structure and properties new high chromium steel Х11МНАФБ. Results of microstructure research, testing mechanical properties at room temperature, definition fracture appearance transition temperature and stress rupture tests are presented.

ROTOR FORGINGS. 9–12 % CHROMIUM STEELS. ULTRA SUPERCRITICAL STEAM PARAMETER (USC). DOUBLE QUENCHING. MICROSTRUCTURE. MECHANICAL PROPERTIES. STRESS RUPTURE.

Kuznetsova O .S, Sychev S. V., Fadin Y. A., Chulkin S. G. THE APPLYING OF ACOUSTIC EMISSION IN STUDY OF BRITTLE MATERIAL'S WEAR.

The new method of condition monitoring the units of friction, based on the analysis of acoustic emission signal's parameters is suggested for defining the amount of wear on-line, during the process of friction. The suggested mode is able to count the volume of wear at high speeds. The comparative analysis of the considered wear control methods is made.

ACOUSTIC EMISSION. WEAR. MONOCRYSTALS AND CERAMICS. CONDITION MONITORING.

Kortikov N. N., Krivonosova V. V. CORRELATIONS FOR PREDICTION OF FLOW RESISTANCE AND HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN CHANNALS WITH PIN FINS AND LATTICE MATRIX.

Experimental data and empirical correlations were used to compare the friction factor and heat transfer enhancement of pin fin and of lattice-matrix. Expert appraisal have done by means of Theil coefficient. On basis of this analysis the new correlations to predict pedestal banks friction factor has been proposed.

HUDRAULIC RESISTANCE. HEAT TRANSFER ENCHANCEMENT. PIN FINS. LATTICE MATRIX. REYNOLDS NUMBER. TEIL COEFFICIENTS.

Sychev S. V., Kuznetsova O. S, Fadin Y. A., Chulkin S. G. INVESTIGATION OF THE SURFACE RUNNING-IN PROCESS FOR WEAR RESISTANT CERAMICS.

Running-in mechanism of friction for silicon carbide ceramics is studied. The evolution of the surface roughness on of the initial stage of friction is considered. A method for estimating the running time, which is based on wavelet analysis of acoustic emission signals arising in the friction process is proposed.

FRICTION. WEAR. RUNNING-IN. ACOUSTIC EMISSION. ROUGHNESS. WAVELET. CERAMICS.

Elistratov V. V., Konishchev M. A., Davydov K. I. PRACTICAL METHODS OF WIND MEASUREMENTS FOR WIND POWER PLANT DEVELOPMENT.

The article considers the actual task of improving the design and effectiveness of low-pressure micro-hydro units on the basis of hydraulic laboratory studies. The methodology of micro-HPS testing on an experimental stand with a rotor diameter of 350 mm in the laboratory department RESH is developed.

The performance and universal characteristic of micro-HPS with impeller PL984-35 are obtained. Based on the results of experimental study the changes to the structure of micro-HPS for improving efficiency are proposed.

MICRO-HPS. HYDRAULIC RESEARCH. EXPERIMENTAL STAND. HYDRO TURBINE. LOW HEAD. HYDROELECTRIC STATION. UNIVERSAL CHARACTERISTIC.

Bukhartsev V. N., Petrichenko M. R. TRANSLATIONAL INVARIANCE FORMULA DUPUIS AND HEIGHT DETERMINATION PERIOD OF SEEPS.

Proved: the independence of the value of filtration flow rate on the move with the free surface of the shift operator

$U_l := \exp\left(l\frac{d}{dx}\right)$ convergence of the solutions to the depression of the curve to the solution Dupuis at $l \to +0$ (long

jumper, long streams) uniformly along the stream; convergence $\Delta \to +0$ for extending the bridge, uniform depth of filling the tailrace.

JUMPER. DEPRESSION CURVE. THE GAP SEEPS. DUPUIS EQUATION.

Kolgatin S. N. CRITICAL POINT, BINODAL, SPINODAL AND NEGATIVE PRESSURES ON THE EXAMPLE OF VAN-DER-WAALS EQUATION.

Usage of matters being at the phase boundary or even behind the last is a prospective way for a number of modern technologies. Meanwhile, related chapters in the general physic course are usually omitted because of restriction on time. The author presents initial data that are necessary for a student or a novice expert starting to work in the field. Categories of the critical parameters, binodal, spinodal, and metastable region are introduced on the example of van der Waals equation. Probable audience for the paper is general physic teachers preparing their course, or a specialist facing with the questions in the beginning of his scientific or pedagogical activity. The paper can be also used for the self-independent work of students.

EQUATIONS OF STATE. PARAMETERS OF THE CRITICAL POINT. METASTABLE STATE. METHODS OF TEACHING PHYSICS.

Dyuldin M. V., Panfilov A. A., Stolyarov N. V. PRACTICAL METHODS OF WIND MEASUREMENTS FOR WIND POWER PLANT DEVELOPMENT.

The article considers practical methods of wind measurement for the wind energy needs, advantages and disadvantages of methods of in-situ measurements of wind speed and direction in the 200 m layer of the atmosphere at wind power plants location.

WIND MEASUREMENT. WIND SPEED. WIND DIRECTION. WIND TURBINE. WIND POWER PLANT.

Dyachenko V. A., Timofeev A. N. ANALYSIS OF THE STRUCTURES AND FUNCTIONALITIES MANIPULATION SYSTEMS OF SPACE APPOINTMENT.

Principles of various space handling systems creation are considered, the analysis of structures and functionality of individual stationary manipulators and mobile robotics systems with two and three self-contained manipulators is given.

SPACE HANDLING SYSTEMS. RATIONAL STRUCTURES. ANALYSIS. FUNCTIONALITY.

Ivanov A. V., Vaganov V. V., Kotov K. A. THE CHOICE OF PROCESS EQUIPMENT POLYGRAPHIC ENTERPRISE BASED ON PROGRAM AND ALGORITHMIC PROVIDING.

For the decision of problems of maintenance of efficiency of functioning of the Pro-граммно-algorithmic components of ACS TP of polygraphic production used combinatorially графовый approach based on the solution of the problem on the smallest partition

PRINTING HOUSE. PRINTING PRESS. PREPRESS. PRINTED CIRCUIT AFTER TRAINING. TECHNOLOGY.

Golub Yu. A., Matenev O. A. THE DESIGN OF DATABASE STRUCTURE FOR MONITORING AND EVALUATION PROCESS OF SCIENCE CLUSTER DEVELOPMENT: ANALYSIS OF APPROACHES AND METHODS.

The article describes the basic approaches and methods of databases design, contains their short characteristics, and consider an example of development of the database structure, based on selected methods and approaches

DATABASE. DESIGN. STRUCTURE. PRINCIPLE OF CONSTRUCTION.

Vasiliev B. Yu. IMPROVING THE EFFICIENCY OF MOTOR CONTROL ALGORITHMS, FUZZY LOGIC METHODS.

The structure of the fleet of gas pumping units (GPU) and give its brief description. The structure electric drive GPA (EGPA) and ways to improve the energy efficiency of the actuator through the use of fuzzy control. The modern design of EGPA.

ELECTRICAL DRIVE. GAS PUMPING UNIT. CONTROL ALGORITHM. FUZZY LOGIC.

Vasilieva L. K., Volovey A. G., Igolkin B. I., Mekhtiev V. S. DEVICE FOR THE STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF VEGETABLES OILS.

In this paper we describe the device to study the electrical properties of vegetable oils, which feature is the ability to determine the characteristic frequencies and intrinsic conductivity in the frequency range of sinusoidal fields of 0.9 to 100 kHz with a resolution (step), the operating frequency of 1,0 kHz

DEVICE. ELECTRICAL. VEGETABLE OIL. FREQUENCY OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS.

Sokolov V. P. ABOUT RELIABILITY OF ESTIMATES OF RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS (ON EXAMPLE, THE COMPLEX OF PROTECTIVE STRUCTURES OF ST. PETERSBURG).

Reliability of London and St.Petersburg flood protection systems were analysed. Reliability of St.Petersburg flood protection system is considerably smaller.

RELIABILITY OF ST.PETERSBURG FLOOD-PROTECTION SYSTEM.

Tumanov A. Yu. AUTOMATED SYSTEM FOR THE QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT AND SECURITY OF ENERGY FACILITIES FOR THE PREDICTION AND PREVENT ACCIDENTS.

The task of preventing and anticipating adverse events (accidents, accidents, incidents, accidents) solved when using Automation, developed and implemented automated quantification of risk, which is the peer object-modular system support decision-making through analysis of subjectively-probabilistic kvazistatisti□eskimi data and extract methods from empirical evidence and knowledge.

SYSTEM AUTOMATION. FORECASTING. RISK OF HAZARDOUS ENERGY. KNOWLEDGE BASE. ACCIDENT.

Gumenyuk V. I., Dobroborsky B. S., Fedosovsky M. E. ON THE PROBLEM OF QUANTIFYING THE HUMAN FACTOR IN EMERGENCY SITUATIONS USED BY POWER UTILITIES.

The questions of quantifying the physiological properties of the human organism in addressing harmonization of automatic emergency systems and operations staff in the emergencies at the power.

THERMODYNAMICS. BIOLOGICAL SYSTEMS. ENERGY FACILITIES. EMERGENCIES. SAFETY.

Avakian S. V., Voronin N. A., Dubarenko K. A. THE CONTRIBUTION OF MAGNETIC STORMS IN THE ACCIDENT RATE ON SYSTEMS OF POWER GRIDS, AUTOMATICS AND COMMUNICATIONS.

In this paper the influence of geomagnetic storms on the technospheric objects and especially the electrical network are considered. It is shown that the main cause of accidents on the power lines and communication are geomagnetically induced currents generated during magnetic storms variable magnetic fields in conducting systems. Consideration of the additional factors: increase the effects of geomagnetic storms in the technosphere - drift of the magnetic pole in the northern hemisphere in the direction of the Arctic coast of Russia is fulfilled. The "Center heliogeophysical problems and prediction of impacts on the environment and the technosphere", including the use of results of the "Permanent space solar-magnetospheric patrol mission" is proposed to create.

MAGNETIC STORMS. GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS. THE IMPACT ON THE TECHNOSPHERE. THE MAGNETIC POLE. ELECTRICAL NETWORK.

Ulibin V. B., Efremov S. V., Romantsova O. V. COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS METHODS OF RECEIVING HYDROGEN PEROXIDE.

In article three existing industrial ways of production of hydrogen peroxide (electrolytic method, anthrahydroquinone and alcohol autoxidation) are considered. The special attention is given to the questions of fire and explosion hazard management. On the basis of the analysis it is shown that the alcohol autoxidation is the most perspective in the Russian Federation, it is of special interest and demands the most careful research in sphere of safety.

HYDROGEN PEROXIDE. ELECTROLYTIC METHOD. ANTHRAHYDROQUINONE AUTOXIDATION. ALCOHOL AUTOXIDATION. FIRE AND XPLOSION SAFETY.

Gumenyuk V. I., Tikhonov M. N., Fedosovsky M. E. POSTFUKUSIMA SYNDROME: PROBLEMS AND SOLUTIONS.

Based on a systematic analysis of open publications and summarized an extensive article on postfukusimskom syndrome. Much attention is paid to the problem of origin, depression (up to turn into a disaster) and the elimination of contingency. The material presented here - a kind of illustration of how large-scale, complex and unpredictable gloomiest scenario in the nuclear industry in terms of nuclear and radiation safety.

NUCLEAR ENERGY. NUCLEAR POWER PLANTS. EMERGENCY. IRRADIATED FUEL ASSEMBLIES OF NUCLEAR REACTORS. CONTAINMENT. RADIATION. RADIOACTIVE WASTE. RADIOACTIVE CONTAMINATION. RADIATION DOSE.

Zhgutov V. M. THE METHOD OF CONSTRUCTIONAL ANISOTROPY FOR THE SUPPORTED SHELLS TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS RIBB RIGIDITY AND DIFFERENT MATERIAL PROPERTIES.

The method of the constructional anisotropy for the supported (ribbed) shells, in which jointly are taken into account geometrical nonlinearity, transversal shifts, discrete position of the ribs, their final width, height (constant or various), shear and torsion rigidities, as well as orthotropic, nonlinear elasticity and creeping of the material.

RIBBED SHELLS. GEOMETRICAL NONLINEARITY. TRANSVERSAL SHIFTS. SHEAR AND TORSION RIB RIGIDITIES. ORTHOTROPIC. NONLINEAR ELASTICITY AND CREEPING OF THE MATERIAL.

Shamakhov V. A. CONTROL MODEL DEVELOPMENT OF THE NORTH-WEST INSTITUTE OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATIONAL ECONOMY AND PUBLIC ADMINISTRATION UNDER THE PRESIDENT OF THE RUSSIAN FEDERATION.

The article deals with various aspects of the North-West Institute's of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration evolution course. The North-West Institute is the important branch of the emerging by source of the President's Academy educational cluster. Discusses issues such as formation of the academic environment, the implementation of standards ISO and standards of the European Association for Quality Assurance in Higher Education, the formation of centers of excellence.

EVOLUTION OF THE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION. ACADEMIC ENVIRONMENT. STANDARDS OF QUALITY.

Lifshits E. A. ANALYSIS OF THE LEVEL OF MOTIVATION OF STUDENTS IN HIGHER EDUCATION.

This work regards the algorithm of develop of student educational process on the basis of improving motivation; and its practical use as an example the students of the International University of Nature, Society and Man "Dubna".

MOTIVATIONAL POTENTIAL. CHARACTERISTICS OF EDUCATIONAL. A VARIETY OF EDUCATIONAL. UNAMBIGUITY OF THE EDUCATIONAL TASK. THE IMPORTANCE OF THE EDUCATIONAL. AUTONOMY. A FEEDBACK. INFLUENCE FACTORS.

Gumenyuk V. I., Dobroborsky B. S., Fedosovsky M. E. DETERMINE THE EFFECTIVENESS OF TRAINING PERSONNEL ENERGY FACILITIES BY QUANTIFYING RECORDS HUMAN FACTORS.

This article analyzes the process of phenotypic adaptation of workers and their energy facilities sposobnostb to work in emergency situations as a result of education and training at the gym.

PHENOTYPIC ADAPTATION. TRAINING. TRAINERS. EMERGENCIES. ENERGY FACILITIES.

Afanas'eva I. B., Diment L. I., Merkulova O. V. THE DEVELOPMENT OF SPATIAL REPRESENTATIONS OF STUDENTS IN TEACHING OF DESCRIPTIVE GEOMETRY.

The paper describes theoretical and methodical basis of formation of space factor in training. There is presented a stage of pedagogical conditions to formation of spatial intelligence as a variety of creative thinking.

SPATIAL REPRESENTATION. THINKING. EDUCATIONAL ACTIVITY. DESCRIPTIVE GEOMETRY.

Dyachenko V. A. CONDITIONS FOR THE PREPARATION CONSTRUCTORS ENGINEERING A WIDE PROFILE.

Complex demand and terms of training of mechanical engineering designers are formulated on the basis of the analysis of development of the knowledge-based techniques and modern technologies of design.

DESIGNERS OF MECHANICAL ENGINEERING. WIDE PROFILE. TERMS OF TRAINING.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 3-2 (154) 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
О.А. Матенев – технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

Подписано в печать 00.00.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 44,0. Тираж 1000. Заказ 365.

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**