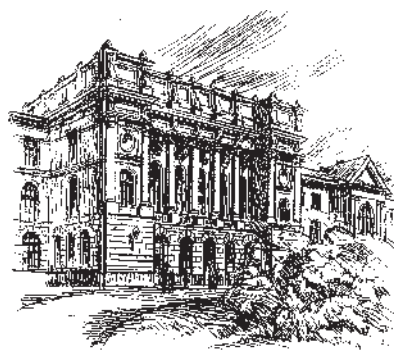


2-2(100)/2010



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Том 2

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010

Содержание

Энергетика и электротехника

Попов М.Г. Система релейной защиты управляемой межсистемной электропередачи	11
Силин Н.В., Коровкин Н.В., Шамкин И.С. Об особенностях организации эксплуатационного обслуживания высоковольтного оборудования	19
Середкин А.А., Басс М.С., Иванов С.А. Анализ результатов энергообследования системы централизованного теплоснабжения г. Читы	22
Батухтин А.Г. Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности существующих систем централизованного теплоснабжения	28
Иванов С.А., Батухтин А.Г., Горячих Н.В. Сравнительная оценка эффективности способов получения дополнительной мощности от турбоагрегатов ТЭЦ	33
Молодкина Л.М., Андрианова М.Ю., Чусов А.Н. Влияние ультразвукового и ферментативного воздействия на биодеструкцию средне- и медленноразлагаемых отходов	44
Бессолицын А.В., Новоселова О.А., Попов М.Г. Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой задачи	50
Бессолицын А.В., Попов М.Г., Хорошинина Е.Н. Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии	55
Головин А.Н. Методика расчета и оптимизации процессов переключения транзисторов в резонансном инверторе тока	59
Игнатёнок В.В., Боровков В.М. Анализ методов регулирования отпуска тепловой энергии потребителям	65
Васильев А.П., Бандурин И.И. Оптимизация структуры оперативного обслуживания электрических сетей	71
Зайцев А.В., Карпов А.С. Оценка эффективности автоматических устройств ограничения повышения частоты в районах с преобладанием ГЭС	75
Кравченко И.В., Карпов А.С. Преимущества применения автоматической разгрузки паротурбинных блоков для функций противоаварийной автоматики энергосистем	82

Машиностроение

Шеломов В.Б., Добрецов Р.Ю. Мощности двигателя и буксования фрикционного элемента управления поворотом гусеничной машины	87
Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Васильева Е.С., Толочко О.В., Максимов М.Ю. Исследование модернизированных конструктивных смазочных материалов, содержащих мелкодисперсные частицы модификаторов трения	92
Шарова Н.А., Живушкин А.А., Тихомирова Е.А. Оценка состояния развития и применяемости современных материалов для деталей турбины перспективного авиационного двигателя	97
Малюгин С.Г., Шемякин А.В., Малюгин В.С. Оценка вероятности разрушения покрытия поверхности изделия с учетом изменчивости толщины подложки	103
Долгушев Д.М., Семёнов А.Г., Элизов А.Д. Концепция трансскутера-амфибии для лиц с ограниченной подвижностью	106
Кудряшев Ф.А., Посевкин А.А., Семёнов А.Г., Элизов А.Д. Предложения по созданию гибридных концептов на базе автомобиля и трансскутера	110

Материаловедение. Обработка металлов

Барзов А.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М., Сальников С.К. Анализ влияния кинетического фактора ультразвука на эффективность гидрообработки материалов	115
Лахова Е.Н., Носов В.В. Оценка степени неоднородности структурно-напряженного состояния материала нахлесточных сварных соединений методом акустической эмиссии	124
Кириллов Н.Б., Васильков С.Д., Новиков В.И. Исследование влияния электролитно-плазменного полирования на качество поверхностного слоя изделий из легированных сталей	130
Ельчанинов Г.С., Носов В.В. Особенность состояния нахлесточных сварных соединений и неразрушающий контроль их прочности	136
Золотов А.М., Ганин С.В., Паршиков Р.А., Смирнов Е.С. Исследование процесса равноканального углового прессования заготовок из алюминиевых порошков в капсулах	146

Металлургия

Гасанов Б.Г., Ефимов А.Д. Активация диффузионных процессов при двухступенчатом спекании порошковых биметаллических материалов	154
Наторхин М.И. Высокоэффективная переработка полиметаллического свинцово-серебряного сырья с помощью хлоридного выщелачивания	158

Моделирование. Математические методы

Орлов А.В. К обоснованию степенного метода определения долей остаточного члена	165
Епифанов А. А., Титенский В. И. Численное моделирование течения вязкого газа в плоских компрессорных решетках	172
Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Оптимизация технологии низкотемпературного плазменного обезвреживания нефтесодержащих отходов	177
Данилец Л.А. Методика определения полноты сгорания газообразного топлива в газотурбинных установках методом анализа пробы	184
Кондратьев М.А., Ивановский Р.И., Цыбалова Л.М. Применение агентного подхода к имитационному моделированию процесса распространения заболевания	189

Экология

Федоров М.П., Уманец В.Н. Анализ геоэкологических проблем при строительстве городов (на примере Санкт-Петербурга)	196
Боголепов И.И., Столярова Н.П. Определение необходимой звукоизоляции окон современных зданий ...	202
Аль-Ахваль Н.С., Семин Е.Г. Оценка влияния твердых коммунальных отходов на загрязнение окружающей среды (на примере Йемена)	209

Вопросы образования

Антонов В.И. Фундаментальное математическое образование в СПбГПУ	216
Комаров В.Д. Статус и специфика технологических наук	220
Корбутов И.И., Снопков Г.И. Организация управления вузом в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени	229
Кесаманлы Ф.П. П.С. Эренфест, Д.С. Рождественский и А.Ф. Иоффе — основатели первых трех научных школ в области физики в Петербурге — Петрограде — Ленинграде	233

Гуманитарные науки

Борисов С.Н., Переверзев Е.В. <i>Терроризм: идентичность и дискурс</i>	244
Рукомойникова Е.Г. <i>Становление категории «научная реальность»</i>	248
Целищева З.А. <i>Идея возмездия в средневековой культуре Западной Европы</i>	252
Сидоренко О.В. <i>Мировоззренческая заданность футурологических прогнозов</i>	258

Хроника событий

Смелов В.А. <i>Пионеры радиолокации из Политехнического института</i>	263
<i>Сведения об авторах, контактные данные</i>	267
<i>Аннотации, ключевые слова</i>	273

Contents

Power engineering and electrical engineering

Popov M.G. <i>Relay protection of phase-controlling power transmission line</i>	11
Silin N.V., Korovkin N.V., Shamkin I.S. <i>Some aspects of the high-voltage equipment service</i>	19
Seryodkin A.A., Bass M.S., Ivanov S.A. <i>Problems of rate setting of loss of heat in heat circuits of Chita</i>	22
Batuhtin A.G. <i>Modern methods of increasing of efficiency of teamwork of installations of helioheating and systems of the centralized supply</i>	28
Ivanov S.A., Batuhtin A.G., Goryachih N.V. <i>Comparative evaluation of efficiency of heat station turbo unit additional power production ways</i>	33
Molodkina L.M., Andrianova M.Yu., Chusov A.N. <i>Effect of ultrasonic and enzymes treatment on biodegradation medium- and slowly degradable waste</i>	44
Bessolitsyn A.V., Novoselova O.A., Popov M.G. <i>Development of methodology for numerical calculation the series parameters of overhead transmission line on the basis of three-dimensional boundary problem</i>	50
Bessolitsyn A.V., Popov M.G., Horoshinina E.N. <i>Using the numerical calculation of three-dimensional electrostatic field to determine self and mutual capacitance wires overhead line</i>	55
Golovin A.N. <i>Optimization and computation technique of transistors switching mode processes in resonant current fed inverter</i>	59
Ignatenok V.V., Borovkov V.M. <i>The analysis of methods of regulation of heat release of thermal energy to consumers</i>	65
Vasilev A.P., Bandurin I.I. <i>Optimization of structure of operative service of electric networks</i>	71
Zaytsev A.V., Karpov A.S. <i>The efficacy automatic systems of limitation rise frequency at the areas with hep ..</i>	75
Kravchenko I.V., Karpov A.S. <i>The advantages of automatic discharge of steam-turbine units for the functions of emergency automation power</i>	82

Mechanical engineering

Shelomov V.B., Dobretsov R.Yu. <i>The engine capacity and the slipping frictional shifting elements capacity on the track-laying vehicle turn</i>	87
Breki A.D., Chulkin S.G., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Maksimov M.Y. <i>Investigation of new constructive lubricants containing fine particles of friction modifiers</i>	92
Sharova N.A., Zhivushkin A.A., Tikhomirov E.A. <i>The estimation of the condition of development and applicability of modern materials for details of the turbine of the perspective aviation engine</i>	97
Maljugin S.G., Shemjakin A.V., Maljugin V.S. <i>Estimation of probability of destruction of a covering of a surface of the sample taking into account variability of a thickness of a substrate</i>	103
Dolgushev D.M., Semenov A.G., Elizov A.D. <i>Transport scooter concept "Aqua" for limited mobility persons</i>	106
Kudriashov F.A., Posevkin A.A., Semenov A.G., Elizov A.D. <i>Electric transport Innovative offers: the hybrid concept based on VAZ-1119 "Kalina" and transport scooter chassis</i>	110

Science of materials. Processing of metals

Barzov A.A., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I., Salnikov S.K. Analysis of an ultrajet kinematic factor influence on efficiency hydrodynamic machining	115
Lakhova E.N., Nosov V.V. Estimation of structure and stress heterogeneity degree of material in lap welded joints by acoustic emission	124
Kirillov N.B., Vasilkov S.D., Novikov V.I. The influence of electrolytic-plasma polishing on the quality of the surface layer of products from alloy steels	130
Elchaninov G.S., Nosov V.V. Features of the condition and not destroying control of durability of non-uniform welded connections	136
Zolotov A.M., Ganin S.V., Parshikov R.A., Smirnov Y.S. Research of process equal channel of angular pressing of preparations from aluminium powders in capsules	146

Metallurgy

Gasanov B.G., Efimov A.D. Activation of diffusion processes during two-stages intering of porous bimetallic materials	154
Natorhin M.I. Hi-tec leaching silver-leaded materials in the chloride solutions	158

Modelling. Mathematical methods

Orlov A.V. To the Substantiation of the sedate method by definition of shares of the residual member	165
Epifanov A.A., Titenskiy V.I. Numerical modeling of viscous flow at the axial blade cascades	172
Anakhov S.V., Pyckin Yu.A., Matushkin A.S. Optimization of low temperature plasma neutralization technology of petrocontaining waste	177
Danilets L.A., Snyatkov G.L. Method for calculating combustion efficiency of gaseous fuel in gas turbine plants by the method of the analysis of test	184
Kondratyev M.A., Ivanovsky R.I., Tsybalova L.M. An application of agent based approach for simulation modeling of the spread of an infectious disease	189

Ecology

Fedorov M.P., Umanets V.N. The Analysis geoecological problems at construction city on example Saint-Petersburg	196
Bogolepov I.I., Stoljarova N.P. Definition of necessary sound insulation of windows of modern buildings ..	202
Al-Ahwal N.S., Semin E.G. The effect of solid waste in the pollution of the environment in Yemen	209

Education issues

Antonov V.I. Fundamental mathematical formation in St.-Petersburg state polytechnical university	216
Comarov V.D. The status and specificity of technological sciences	220
Korbutov I.I., Snopok G.I. The organization of management of high school in emergency situations peace and the wartime	229
Kesamanly F.P. P.S. Erenfest, D.S. Rogdestvenskiy and A.F. Ioffe — founders of first three schools of thought in physics area in Petersburg — Petrograd — Leningrad	233

The humanitarian science

Borisov S.N., Pereverzev E.V. <i>Terrorism: identity and discourse</i>	244
Rukomojnikova E.G. <i>Category formation «a scientific reality»</i>	248
Tselischeva Z.A. <i>Retribution idea in West European medieval culture</i>	252
Sidorenko O.V. <i>World-outlook determination of futurological researches</i>	258

Chronicle of events

Smelov V.A. <i>Pioneers of a radar-location from polytechnical institute</i>	263
<i>About the authors, contact information</i>	267
<i>Abstracts, key words</i>	273

НАШЕМУ ЖУРНАЛУ ПЯТНАДЦАТЬ ЛЕТ

Вы держите в руках юбилейный, сотый номер журнала «Научно-технические ведомости СПбГПУ», а его первый номер вышел в свет пятнадцать лет назад, 24 апреля 1995 года.

Начало выпуска журнала совпало с трудным временем, когда научные периодические издания из-за отсутствия средств резко сократили тиражи, а некоторые прекратили свое существование. Чтобы начать выпуск нового журнала в столь трудных условиях, надо было обладать изрядным запасом оптимизма. И этот оптимизм оправдал себя.

За годы существования журнала на его страницах опубликовали свои статьи более полутора тысяч авторов. Были представлены материалы о законченных исследованиях, крупных изобретениях, открытиях, педагогических и научных технологиях, международной деятельности, общественной жизни и др.

Журналу удалось за прошедшие пятнадцать лет не только сохранить свою деятельность, но и стать одним из ведущих научных изданий России, что официально признано включением его в числе первых в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Это оказалось возможным благодаря тому, что научной и общественно-педагогической базой для журнала является такое высшее учебное заведение России, как Санкт-Петербургский политехнический университет с его всемирно известными научными школами, его уникальной системой образования — «школой физмеха — физтеха», ставшей образцом для системы высшего инженерного образования Советского Союза и России.

«Научно-технические ведомости СПбГПУ» приобрели широкую читательскую аудиторию. Журнал читают преподаватели, научные сотрудники и студенты высших учебных заведений, работники промышленности, специалисты научно-исследовательских институтов, зарубежные ученые. На его страницах публикуют свои статьи ведущие ученые нашей страны — специалисты Российской академии наук, государственных и общественных академий, институтов, организаций, вузов России и зарубежных стран, в том числе академики и члены-корреспонденты РАН Алферов Ж.И., Данилевич Я.Б., Кирпичников М.П., Лопота В.А., Окрепилов В.В., Рудской А.И., Рутберг Ф.Г., Сурис Р.А., Третьяков Ю.Д., Федоров М.П., Финкельштейн А.М., Хохлов Д.Р., профессора Арсеньев Д.Г., Галимов Э.Р., Глухов В.В., Иванов В.К., Коровкин Н.В., Рябова Л.И., Себелезнев Б.И., а также зарубежные ученые Нич Ю.Б. (Германия), Раков В.А. (США), Рашиди Ф. (Швейцария), Рудаев Я.И. (Кыргызстан), Ткаченко С.В. (Германия), Шрефлер Б. (Италия). Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является хорошим дополнением многолетнего издания «Труды СПбГПУ».

Многопрофильность Санкт-Петербургского политехнического университета и разнообразие интересов наших читателей обусловили расширение научных направлений журнала. В настоящее время журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» имеет пять серий: «Наука и образование», «Физико-математические науки», «Информатика. Телекоммуникации. Управление», «Экономические науки», «Гуманитарные и общественные науки». В нем публикуются материалы по следующим основным тематическим направлениям: Metallургия и материаловедение; Энергетика; Информатика, вычислительная техника и управление; Машиностроение; Радиотехника и связь, электроника, измерительная техника; Физика; Экономика; История; Философия; Педагогика;

Культурология; Юридические науки. В России сегодня выходит не столь большое число научных журналов такого широкого профиля. Это стало возможным прежде всего благодаря тому, что в состав редколлегии нашего журнала входят ведущие специалисты по соответствующим направлениям, имеющие исключительно высокий уровень квалификации. От аналогичных вузовских изданий журнал отличается хорошей адресностью, ориентируя читателей на самые актуальные научные и технические проблемы.

Наш журнал — это не только его редколлегия и редакционный коллектив, не только издательство и типография. Это прежде всего авторы статей и наши читатели. Это те, кто обращается к нам со своими идеями, предложениями, проблемами и кто ждет выхода наших очередных номеров.

За прошедшие пятнадцать лет мы никогда не испытывали недостатка вашего внимания, наши дорогие авторы и читатели, всегда чувствовали поддержку ведущих ученых научного сообщества. Надеемся, что наш журнал будет и дальше развиваться так же плодотворно, чтобы оставаться престижным для авторов и интересным для читателей. Со своей стороны мы приложим к этому все усилия.

*Редколлегия, редакционный коллектив журнала
и Издательство СПбГПУ*

СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ УПРАВЛЯЕМОЙ МЕЖСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Особенности повреждений управляемой электропередачи с фазоповоротным трансформатором

Конструктивно фазоповоротный трансформатор (ФПТ) или комплекс состоит из автотрансформатора (АТ) и вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) с электромеханическими переключателями для регулирования коэффициентов трансформации. Регулируемая вторичная обмотка (РО2) ВДТ, а также регулируемая (РО1) и общая (ОО) обмотки АТ образуют последовательную схему суммирования (рис. 1). Номинальная мощность ФПТ составляет $S_{\text{ном}} = 400$ МВА. При этом номинальная мощность АТ $S_{\text{ном}} = 3 \cdot 167$ МВА. Номинальная мощность ВДТ составляет $S_{\text{ном ВДТ}} = 400$ МВА, а его типовая мощность $S_{\text{тип ВДТ}} = 146$ МВА. Диапазон регулирования коэффициентов трансформации АТ $k_{\text{вс}}, k_{\text{сн}}$ равен $\pm 8 \cdot 1,5$ % (число ступеней регулирования равно 16). Диапазон регулирования коэффициента трансформации ВДТ $k_{\text{ВДТ}}$: 0–2, 17 (число ступеней регулирования равно 16).

Первичная схема соединения фазоповоротного трансформатора, приведенная на рис. 1, позволяет исследовать следующие особенности повреждений фазоповоротного трансформатора. Кроме широко известных повреждений, характерных для автономно работающих автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора, при их совместной работе опасными становятся замыкания, возникающие в дополнительных (компенсационных) обмотках. При решении общих вопросов построения системы релейной защиты ФПТ приходится считаться также с повреждениями их соединительных элементов (ошиновки АТ и ВДТ).

В связи с особенностями конструкции и повреждений фазоповоротного комплекса возникла необходимость тщательного исследования его переходных режимов с целью научно-обоснованного формулирования требований к создаваемой оригинальной («нетиповой») системе контроля и защиты. Следует подчеркнуть актуальность разработки принципиально новых методов расчета основных дифференциальных защит отдельных трансформаторов фазоповоротной группы.

Исследование различных повреждений обмоток фазоповоротного комплекса и его ошиновки осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения для расчета электромагнитных переходных процессов, разработанного в ГОУ СПбГПУ¹. При этом наиболее характерными повреждениями (с точки зрения формулирования особых требований к РЗА) являются замыкания на землю в цепи ВО вольтодобавочного трансформатора (см. осциллограммы и комплексные величины сигналов тока, напряжения на рис. 2, 3).

Необходимо подчеркнуть, что при имеющемся подключении ВДТ (питание обмотки возбуждения со стороны НН автотрансформатора) его дифференциальная защита нечувствительна к замыканиям на землю со стороны возбуждающей обмотки при нулевом положении избирателя отпаек регулировочной обмотки.

Однако при ненулевом положении переключателя витков РО ВДТ этот вид повреждения воспринимается как короткое замыкание (см. рис. 2).

¹ Автор разработки — аспирант кафедры «Электрические системы и сети» Р.Н. Николаев (научный руководитель — профессор Г.А. Евдокунин).

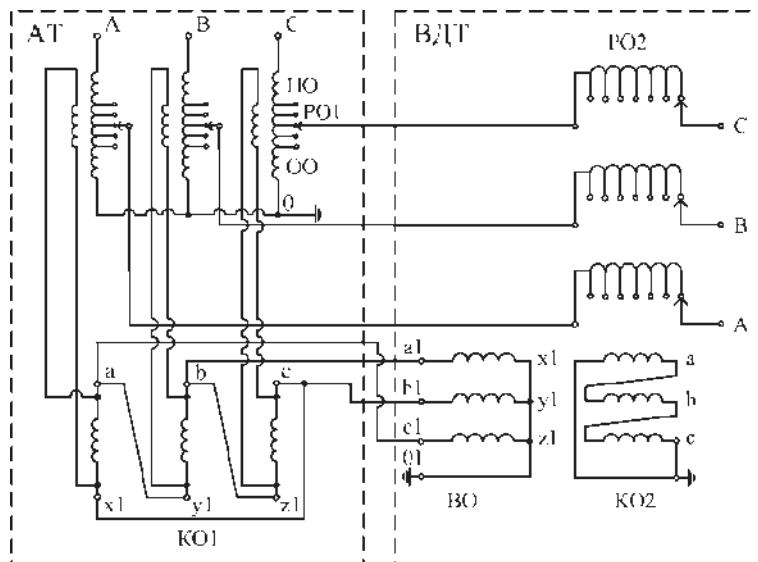


Рис. 1. Схема электрических соединений обмоток фазоворотного трансформатора

ПО — последовательная обмотка АТ; ОО — общая обмотка АТ; РО1, РО2 — регулировочные обмотки соответственно АТ и ВДТ; КО1, КО2 — компенсационные обмотки соответственно АТ и ВДТ; ВО — возбуждающая обмотка ВДТ

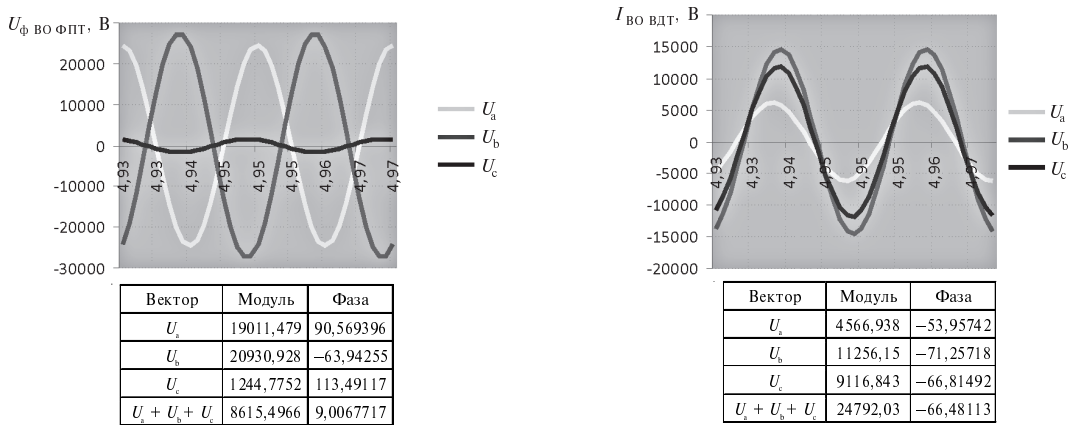


Рис. 2. Режим установившегося однофазного замыкания на землю в цепи 38,5 кВ ФПТ

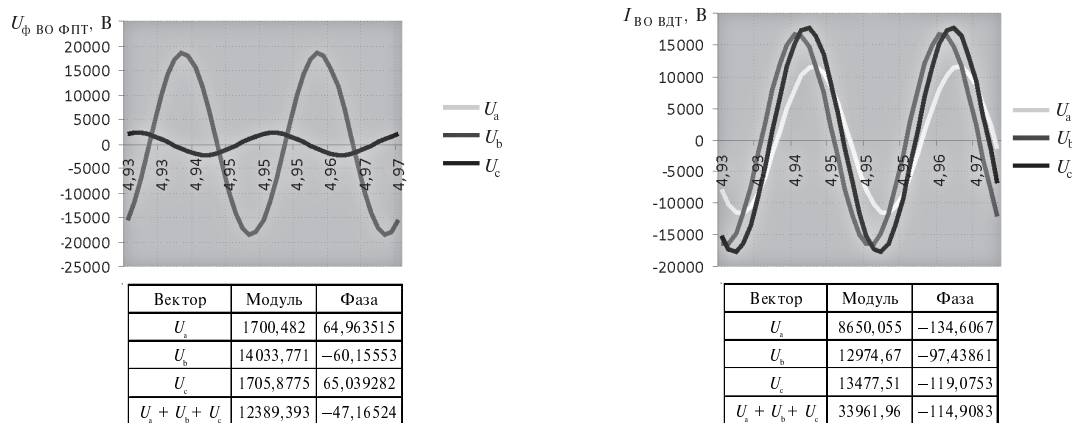


Рис. 3. Режим установившегося двухфазного замыкания на землю в цепи 38,5 кВ ФПТ



Не вдаваясь в особенности расчета параметров срабатывания защит от отмеченных видов повреждений (основы изложены далее), здесь лишь укажем, что для устранения этого недостатка система защиты фазоповоротного трансформатора дополняется защитой от замыканий на землю в цепи низшего напряжения 38,5 кВ с контролем напряжения и тока нулевой последовательности.

Отметим одну из особенностей схемы ФПТ: при появлении многофазных коротких замыканий на участке между АТ и регулируемой вторичной обмоткой ВДТ к последней прикладывается напряжение 220 кВ со стороны сети среднего напряжения, что утяжеляет последствия таких повреждений. В частности, это вызывает значительные перенапряжения со стороны 38,5 кВ. Поэтому целесообразна дополнительная установка на стороне 38,5 кВ защиты от повышения напряжения, действующей на отключение ФПТ.

Общие требования к системе релейной защиты управляемой электропередачи с фазоповоротным трансформатором

Ввиду оригинальности конструкции фазоповоротного трансформатора необходимо по-новому оценить возникающие повреждения электроэнергетического оборудования и режимные особенности их протекания. В свете уже сказанного каждый элемент этого комплекса должен иметь собственные быстродействующие защиты от внутренних повреждений и резервные защиты, которые в основном являются общими.

При организации системы РЗ фазоповоротного комплекса должна быть предусмотрены быстродействующие защиты следующих видов:

- продольные дифференциальные защиты ошиновки (ДЗО) высшего напряжения (ВН) 500 кВ, среднего напряжения (СН) 220 кВ и низшего напряжения (НН) 38,5 кВ;

- продольная дифференциальная защита вольтодобавочного трансформатора от повреждений его обмоток и на выводах;

- газовая защита вольтодобавочного трансформатора от внутренних повреждений и от понижения уровня масла;

- продольная дифференциальная защита автотрансформатора от повреждений его обмоток и на выводах;

- газовая защита автотрансформатора от повреждений внутри кожуха и от понижения уровня масла.

Перечень резервных защит фазоповоротного комплекса включает в себя:

- дистанционную защиту от междуфазных КЗ в сети 500 кВ, осуществляющую к тому же частичное резервирование основных защит автотрансформатора;

- дистанционную защиту от междуфазных КЗ в сети 220 кВ, реализующую частичное резервирование основных защит автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора;

- токовую защиту АТ с комбинированным пуском по напряжению от междуфазных КЗ, включенную со стороны ВН АТ;

- токовую защиту от перегрузки АТ;

- токовую направленную защиту нулевой последовательности от КЗ на землю в сети 500 кВ, охватывающую ошиновку ВН АТ;

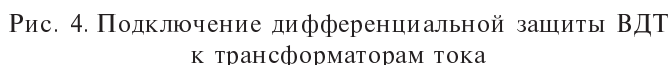
- токовую направленную защиту нулевой последовательности от КЗ на землю в сети 220 кВ, охватывающую ошиновку СН АТ;

- защиту с контролем напряжения и тока нулевой последовательности от замыканий на землю в цепях 38,5 кВ автотрансформатора, вольтодобавочного трансформатора и трансформатора собственных нужд.

В целом общая система релейной защиты фазоповоротного трансформатора представляет объединение указанных подсистем РЗА ошиновки, автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора. При этом наибольший интерес представляет методика расчета дифференциальной защиты [2] вольтодобавочного трансформатора в силу последовательного подключения в сеть среднего напряжения его регулировочной обмотки (рис. 4).

Более того, ввиду наличия шунтирующей вольтодобавочный трансформатор перемычки (см. рис. 4), входящей в ошиновку 220 кВ фазоповоротного трансформатора, выбор параметров срабатывания его защит и проверка чувствительности последних имеют особенности, поскольку должны распространяться на два характерных случая: автономную работу АТ при введении шунтирующей ВДТ перемычки и совместную работу АТ и ВДТ при разомкнутом положении разъединителя QS12 перемычки.

Естественно, что во втором случае может проявляться недостаточная чувствительность ряда защит электроустановок (автотрансформатор, ВДТ, ошиновка) фазоповоротного комплекса из-за некоторого снижения уровня токов внешних



Методика расчета дифференциальной защиты вольтодобавочного трансформатора управляемой электропередачи

ствительности ступеней дифференциальной защиты ВДТ выполняется для режима двухфазного короткого замыкания при минимальной нагрузке электроэнергетической системы.

В целом методика расчета дифференциальной защиты ВДТ идентична методическим указаниям по выбору уставок дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора. Тем не менее в связи с неоднократно отмечавшейся особенностью последовательного включения регулировочной обмотки линейного регулирующего трансформатора в сеть 220 кВ расчетные выражения для определения тока небаланса (как будет показано далее) несколько видоизменены в соответствии с физическими представлениями.

Как известно, величина тока небаланса, контролируемая дифференциальной защитой, определяется неуравновешенностью токов отдельных ее плеч (стороны ВДТ):

$$I_{\mathrm{H6}\Sigma} = I_{\mathrm{H6BO}} + I_{\mathrm{H6PO}},$$

где $I_{\text{нбВО}}$, $I_{\text{нбРО}}$ — составляющие тока небаланса, обусловленные соответственно током ВО и РО, А.

Естественно, что значение отдельно взятой составляющей тока небаланса обусловлено погрешностью соответствующих трансформаторов тока и регулированием напряжений вольтодобавочного трансформатора и автотрансформатора.



Ввиду некоторой неопределенности учета знака отдельно взятых регулирующих эффектов по напряжению при несогласованном регулировании устройствами РПН указанных трансформаторов в разработанной автором методике используется понятие среднеквадратичного эквивалентного регулирующего эффекта напряжения:

$$\Delta U_{\text{ВО}} = \Delta U_{\text{ВДТ}};$$

$$\Delta U_{\text{РО}} = \sqrt{(\Delta U_{\text{АТ}})^2 + (\Delta U_{\text{ВДТ}})^2},$$

где $\Delta U_{\text{ВО}}$, $\Delta U_{\text{РО}}$ — эквивалентные регулирующие эффекты по напряжению токов РО и ВО, о. е.;

$$\Delta U_{\text{ВДТ}} = 0,5 \frac{U_{\text{ВО}}}{U_{\text{ном РО}}} — \text{диапазон регулирования}$$

напряжения относительно среднего положения переключающих устройства ВДТ, приведенный к стороне СН, о. е.; $\Delta U_{\text{АТ}}$ — диапазон регулирования напряжения АТ относительно среднего положения его переключающего устройства, о. е.

Такой подход позволяет применить традиционный расчет составляющих тока небаланса с учетом изменения положения переключающих устройств фазоповоротного комплекса (АТ+ВДТ) в случаях регулирования напряжения при некотором загроулении чувствительного измерительного органа дифференциальной защиты. Составляющие тока небаланса, обусловленные током возбуждающей и регулировочной обмоток ВДТ, определяются по уравнениям

$$I_{\text{нб ВО}} = (k_{\text{пер}} \varepsilon + \Delta U_{\text{ВО}}) I_{\text{ВО}};$$

$$I_{\text{нб РО}} = (k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta U_{\text{РО}}) I_{\text{РО}},$$

где $k_{\text{пер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный процесс, о. е.; ε — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока, о. е.; $k_{\text{одн}}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока, о. е.

Учитывая, что в большинстве устройств микропроцессорных защит осуществляется программная компенсация фазового сдвига, обусловленного группой соединения обмоток ВДТ, величина суммарного тока небаланса находится как результат алгебраического сложения его составляющих:

$$I_{\text{нб } \Sigma} = I_{\text{нб ВО}} + I_{\text{нб РО}}.$$

Применяя вышеописанную методику расчета параметров срабатывания дифференциальной

защиты ВДТ, можно определить величины дифференциального и тормозного токов [2]. Важно также отметить, что при крайних (1-м и 17-м) положениях переключающего ответвления РО2 устройства эквивалентные регулирующие эффекты по напряжению $\Delta U_{\text{ВО}}$ и $\Delta U_{\text{РО}}$ определяются только внешним (по отношению к ВДТ) регулированием напряжения на автотрансформаторе. Как следствие этого в указанных схемно-режимных условиях работы ФПТ дифференциальная защита с торможением обладает лучшей (большей) чувствительностью, поскольку ее параметры срабатывания $I_{* \text{СЗ min}}$, $k_{\text{торм1}}$ и $k_{\text{торм2}}$ имеют меньшие значения (по сравнению с расчетом для среднего положения РПН).

Особенности защиты от замыканий на землю управляемой электропередачи с фазоповоротным трансформатором

Ранее отмечалось, что данная защита относится к основным и предназначена действовать при повреждении изоляции относительно земли. В зону ее действия входят обмотка низкого напряжения АТ, компенсационная обмотка (КО), возбуждающая обмотка ВО ВДТ, соединенная в треугольник обмотка 38 кВ трансформатора собственных нужд (ТЧН), соединительная ошиновка перечисленных элементов с коммутационными аппаратами (разъединители QS9, QSG9, QS13, QSG13 и выключатель ТЧН).

Важность защиты связана с тем, что практически все повреждения сопровождаются замыканиями на землю. Поэтому защита частично резервирует другие основные (дифференциальные) защиты ФПТ, предупреждая развитие аварий.

Защита контролирует напряжение нулевой последовательности, подаваемое с выводов разомкнутого треугольника первичного преобразователя напряжения TV1 (рис. 5). Как уже указывалось, особенностью схемы подключения ВДТ является то, что повреждения относительно земли в цепях с изолированной нейтралью воспринимаются со стороны РО2 ВДТ как однофазные короткие замыкания в зависимости от положения переключателя. Поэтому защита дополнительно должна осуществлять контроль тока нулевой последовательности в цепи с помощью включенного в нейтраль ВО ВДТ трансформатора тока ТА 22 (см. рис. 5).

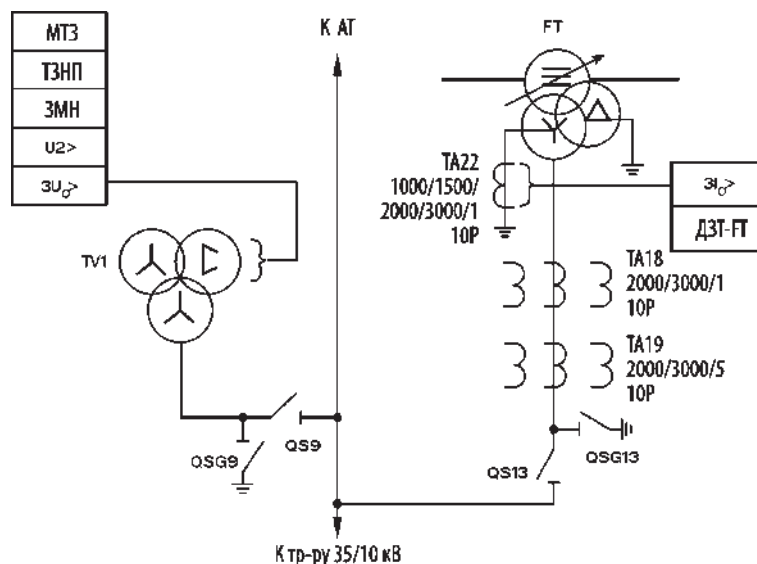


Рис. 5. Схема подключения защиты от замыканий на землю ФПТ

Защита имеет два параметра срабатывания: $U_{0\text{сз}}$, $I_{0\text{сз}}$. Их расчет заключается в следующем. $U_{0\text{сз}}$ отстраивается от напряжения небаланса на выходе фильтра $3U_0$ TV1, что обусловлено возможным появлением напряжения нулевой последовательности с высокой и средней стороны АТ при однофазных и двухфазных с землей КЗ и наличием в напряжении $U_{\text{нн}}$ составляющей тройной частоты U_{3f} :

$$3U_{*0\text{сз}} \geq 3U_{*0\text{нб}},$$

где $3U_{*0\text{нб}}$ — величина напряжения небаланса, о. е.

Учитывая малые значения межобмоточной емкости АТ и составляющей U_{3f} отстройка обеспечивается при $3U_{*0\text{сз}} = 0,05-0,12$. Однако напряжение нулевой последовательности $3U_0$ на выходе фильтра (с выводов обмотки “разомкнутого” треугольника) трансформатора напряжения обусловлено еще и путем его трансформации со стороны регулировочной обмотки (РО2) ВДТ при названных КЗ относительно земли на стороне ВН и СН автотрансформатора и ненулевом положении переключателя РО2 ВДТ.

Для согласования действия защит от замыканий относительно земли необходимо отстроить их по времени срабатывания друг от друга, а также ввести взаимные блокировки по логическому входу. Так, первые ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности

(ТНЗНП) автотрансформатора блокируют по логическому (дискретному) входу описанную выше защиту от замыканий на землю со стороны НН АТ (контроль $3U_0$), реализуя тем самым логическую селективность. В последней необходимо также предусмотреть выдержку времени $\Delta t_{\text{сз}} = 0,5-1,0$ с. Кроме того, ток срабатывания $I_{0\text{сз}}$ отстраивается от тока небаланса в нейтрали ВО при внешних КЗ со стороны ВН и СН автотрансформатора:

$$I_{*0\text{сз}} \geq I_{*N\text{нб}},$$

где $I_{*N\text{нб}}$ — относительное значение тока небаланса, контролируемое от трансформатора тока ТА 22 в нейтрали ВО ВДТ, о. е.

Междуфазные КЗ со стороны НН автотрансформатора (включая сюда ВДТ и трансформатор собственных нужд) устраняются дифференциальными защитами АТ и ошиновки низшего напряжения.

Опытно-промышленные испытания управляемой электропередачи

Опытно-промышленные испытания по включению первой на территории СНГ управляемой электропередачи 500 кВ Северный Казахстан — Актюбинская область с ФПТ (ПС 500 кВ Ульке) проводились в период с 26.01.2009 по 02.02.2009.

Включение фазоповоротного комплекса осуществлялось в два этапа: включение АТ в режиме холостого хода со стороны ВН 500 кВ (рис. 6, 7) и последующее включение ВДТ под нагрузку около 20 % со стороны СН 220 кВ (рис. 8). В процессе включения АТ в режиме холостого хода осциллографировался бросок тока намагничивания (см. рис. 6) и контролировался пуск этим током дифференциальной защиты ($I_{C3_min} = 0,2 I_{HOM}$).

Для подтверждения корректности выбора уставки органа блокировки дифференциальной защиты выполнен расчет тока торможения

(рис. 7) при броске намагничивающего тока автотрансформатора с интервалом усреднения 20 мс. Анализ полученных результатов показал достаточную чувствительность органа блокировки к броску тока намагничивания по второй гармонике с уставкой, равной 15 % (по отношению к основной гармонике). При этом уставка дифференциальной отсечки принималась $6,0 I_{HOM}$.

В результате анализа осциллограмм установлено, что пиковое значение токов включения АТ составляет 2,263 кА (см. рис. 6), это отвечает кратности 3,91 ($I_{HOM} = 578,51$ А). Спектральный анализ сигналов фазных токов включения

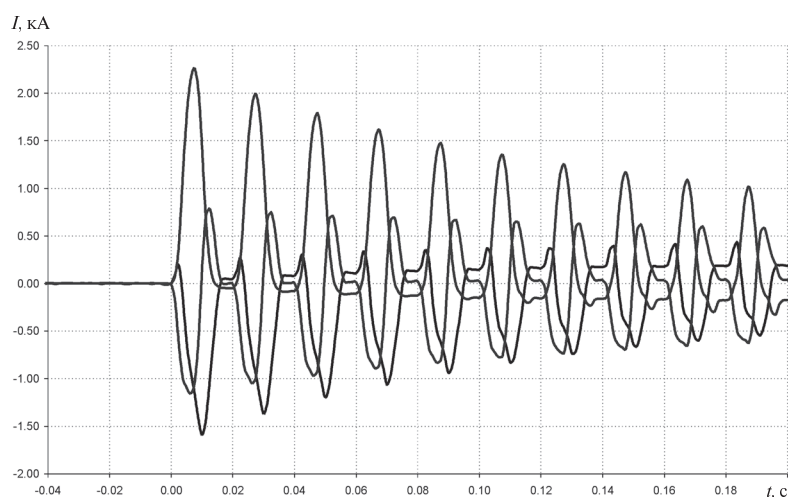


Рис. 6. Осциллограмма включения АТ в режиме холостого хода
 — — T_a ТА15 (500 кВ); — — — T_b ТА15 (500 кВ); — — — T_c ТА15 (500 кВ)

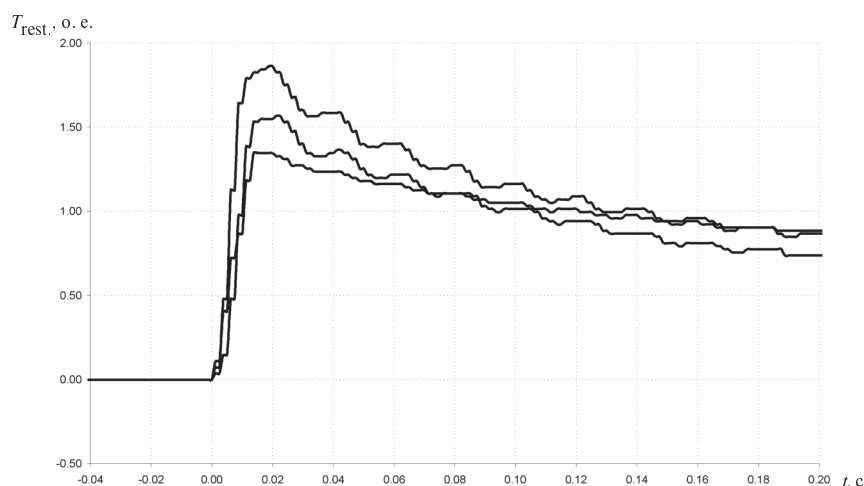


Рис. 7. Изменение токов торможения дифференциальной защиты АТ при его включении в режиме холостого хода
 — — — $T_{a\ rest.}$ — — — $T_{b\ rest.}$ — — — $T_{c\ rest.}$

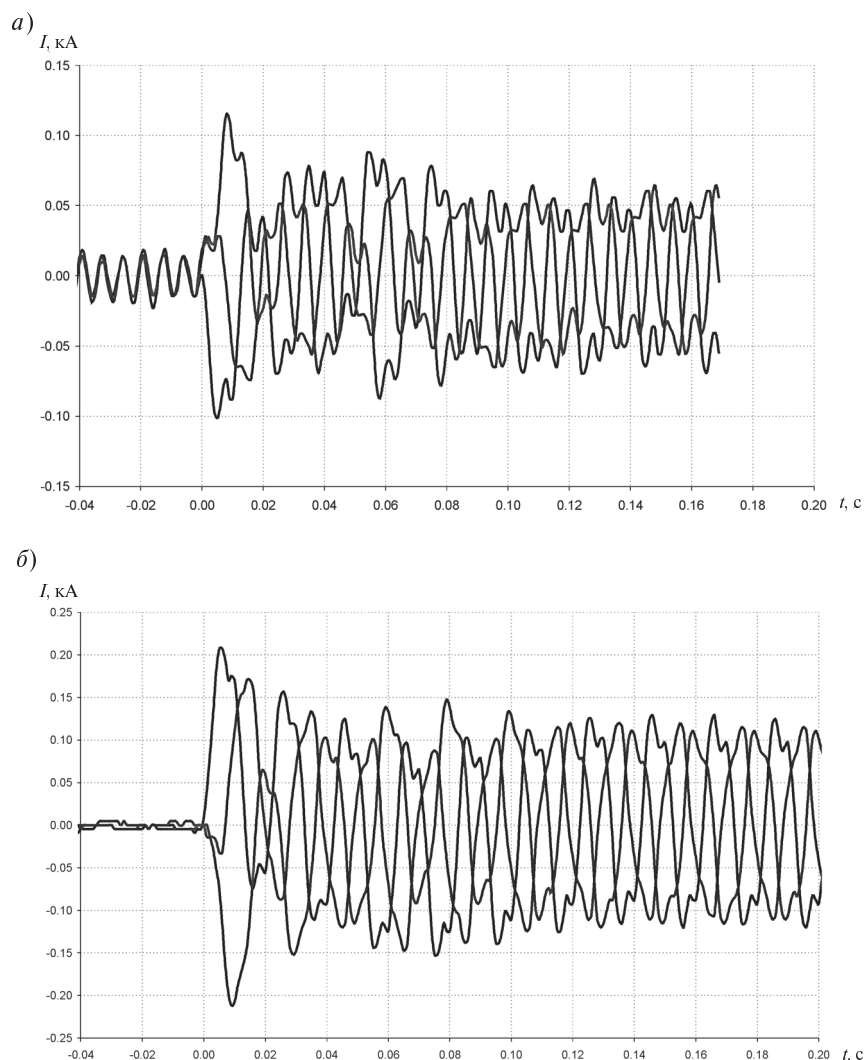


Рис. 8. Осциллограммы токов при включении ВДТ под нагрузку
(a — на стороне 500 кВ, b — на стороне 220 кВ)
— — T_a ТА15 (220 кВ); — — — T_b ТА15 (220 кВ); — — — T_c ТА15 (220 кВ)

показал наличие второй гармонической составляющей (22–24 %), а также незначительный уровень (около 2 %) пятой и высших гармонических составляющих.

К основным результатам работы можно отнести следующее:

1. Выявлены особенности повреждений управляемой межсистемной электропередачи с фазоворотным трансформатором в цепях его низшего напряжения 38,5 кВ.

2. Установлено, что дифференциальная защита нечувствительна к замыканиям на землю со стороны возбуждающей обмотки при нулевом

положении избирателя отпаек регулировочной обмотки. Для устранения этого недостатка система защиты фазоворотного трансформатора должна быть дополнена защитой от замыканий на землю в цепи низшего напряжения 38,5 кВ с контролем напряжения и тока нулевой последовательности.

3. Предложена концепция создания системы релейной защиты фазоворотного комплекса управляемой межсистемной электропередачи. Предложенный принцип построения системы защиты позволяет обеспечить необходимую чувствительность и селективность с учетом схемно-режимных условий ее работы.



4. Разработана качественно новая методика расчета параметров срабатывания дифференциальной защиты линейного регулировочного

трансформатора, подключаемого по схеме последовательного суммирования для управления мощностью межсистемной электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокунин, Г.А. и др. Фазоповоротный трансформатор. Впервые в СНГ применен в Казахстане [Текст] / Г.А. Евдокунин и др. // Новости электротехники. — 2008. — №6(48).

2. Ванин, В.К. Фазоповоротный трансформатор. Особенности релейной защиты [Текст] / В.К. Ванин, М.Г. Попов // Новости электротехники. — 2009. — № 2(56).

УДК 621.311.4

Н.В. Силин, Н.В. Коробкин, И.С. Шамкин

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проводимая в России реорганизация системы диагностики состояния электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи предполагает совершенствование применяемых для этого технических средств, методологии, а также организационной структуры этой системы [1]. Действующие директивные документы не только разрешают, но и рекомендуют руководителям электроэнергетических предприятий организовать собственную систему эксплуатации электротехнического оборудования исходя из его состава, сроков и опыта эксплуатации с учетом условий работы в данном регионе и других индивидуальных факторов, присущих конкретному предприятию.

Организация эффективной эксплуатации электрооборудования должна базироваться на достоверной информации о причинах повреждений. Не выяснив действительную причину аварийных ситуаций оборудования, невозможно принять меры по их исключению в дальнейшем. В решении второго научно-практического семинара специалистов Сибири и Дальнего Востока по диагностике электрических установок (г. Красноярск, 2007) всем заинтересованным организациям рекомендовано продолжать как поиск эффективных форм организации диагностирования силового электрооборудования

с большим сроком службы, так и работы по совершенствованию методов анализа и оценки эффективности систем, методов и средств технического диагностирования.

Опыт эксплуатации и технического обслуживания высоковольтного электроэнергетического оборудования (ВВЭО) позволяет сделать вывод, что общей причиной повреждений служат нерасчетные эксплуатационные воздействия на оборудование, т. е. такие, на которые электрооборудование не было рассчитано при разработке и проектировании, либо такие воздействия, которые возникают в процессе изготовления, монтажа или эксплуатации оборудования и приводят к изменению расчетных характеристик [2].

Эффективная система диагностики ВВЭО должна [1]:

обеспечивать выявление дефектов на ранней стадии их появления, что предполагает получение информации о начале развития опасного дефекта за время, достаточное для принятия персоналом мер по его устранению (путем ремонта или замены);

выдавать информацию о степени опасности и месте нахождения дефекта;

проводить оценку технического состояния оборудования на основе критериев, имеющих детерминированную ценность;

обеспечивать прогнозирование остаточного ресурса.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что процесс перехода на эффективную систему эксплуатации целесообразно осуществлять, проводя следующие мероприятия:

выявление несоответствия уровня изоляции, заложенного проектировщиками, условиям работы и регулярно возникающим эксплуатационным воздействиям;

выявление оборудования, эксплуатирующегося в нерасчетных режимах или подвергнувшегося влиянию импульсных воздействий;

техничко-экономическое обоснование вводимой системы диагностирования в зависимости от типа контролируемого оборудования и его роли в решении социально-экономических задач обслуживаемого региона;

выбор числа параметров, необходимых для получения надежной оценки технического состояния и определения остаточного резерва;

определение технических средств контроля диагностических параметров в режиме интервального обследования, а в случае необходимости и в режиме непрерывного контроля;

отбор методик регистрации диагностических параметров, способов хранения и передачи полученной информации;

выбор способов анализа диагностической информации, а также моделей оценки технического состояния оборудования.

За рубежом в настоящее время стратегия планового технического обслуживания и ремонта (ТОиР) практически не используется, а почти повсеместно развивается обслуживание по техническому состоянию [3]. При этом активно осуществляется переход к стратегии ТОиР по прогнозируемому техническому состоянию: по результатам обследований техническими экспертами разрабатываются сценарии ТОиР, а менеджеры корректируют их на основе теории управления рисками.

С 2005 года ведущие зарубежные специалисты предлагают трехуровневый процесс принятия решения по выдвигаемой стратегии эксплуатации оборудования, который для России можно интерпретировать следующим образом [3]:

на первом уровне на основе технической информации (срок службы оборудования, нагрузочные режимы, нештатные воздействия, резуль-

таты предыдущих испытаний и диагностики) предприятия разрабатывают несколько сценариев ТОиР, оценивают их техническую эффективность и возможность реализации;

на втором уровне технические специалисты прогнозируют остаточный ресурс, а экономисты рассчитывают затраты, которые необходимы для ТОиР в течение расчетного срока службы и выбирают возможные варианты решений;

на третьем уровне менеджеры департаментов на основе механизма управления рисками и с учетом социальной обстановки выбирают оптимальную стратегию и принимают решение: продолжать эксплуатацию или менять оборудование на новое, проводить диагностику или ставить систему мониторинга, делать ремонт и в каком объеме.

В России, по мнению специалистов, под оптимизацией диагностики ВВЭО следует понимать переход на многоступенчатую процедуру оценки технического состояния, причем количество ступеней зависит от степени ответственности оборудования, его функций и сроков эксплуатации [3].

На первой ступени должны быть проведены мероприятия, относящиеся к функциональной диагностике. Ее итогом должно стать разбиение оборудования на группы. Например, первая группа не требует продолжения диагностических действий, вторая требует продолжения обследований или вывода в текущий ремонт.

На второй ступени проводится ранжирование ВВЭО по техническому состоянию оборудования, попавшего по результатам функционального диагностирования во вторую группу. Итогом ранжирования является разделение оборудования на следующие подгруппы:

нет проблем;

требуется комплексное обследование;

требуется замена отдельных компонентов;

требуется вывод в капитальный ремонт.

Опыт показывает [3], что стоимость и затраты на проведение работ по ранжированию оказываются в 4–5 раз меньше по сравнению с комплексным обследованием силовых трансформаторов по утвержденным директивным документам.

На третьей ступени проводится комплексное обследование оборудования, попавшего в группу риска. По результатам комплексного обследования принимаются управленческие решения,



сочетающие экономические и технические аспекты: небольшой ремонт или замена компонентов для продления срока службы; постановка на интервальное (периодическое) обследование; осуществление непрерывного мониторинга; вывод в капитальный ремонт или замена оборудования на новое.

Предварительные оценки показывают [1], что до 80 % дефектов, обуславливающих выход из строя оборудования подстанций и линий электропередачи, могут быть своевременно выявлены современными методами и аппаратурой для диагностирования и мониторинга, поскольку связаны с ростом электротермических процессов. Одним из методов, позволяющих фиксировать дефекты электротермического характера, является электромагнитный способ контроля ВВЭО, который рассматривается как перспективный способ раннего обнаружения факта появления и развития дефектов.

Этот способ, основанный на анализе спектров электромагнитного излучения (ЭМИ) в информативных частотных диапазонах, позволяет получать информацию о наличии дефектов во вводах, внутренней изоляции и элементах конструкций ВВЭО [4]. В качестве критериев оценки технического состояния используются квалификационные характеристики спектров: уровень спектральных линий, интегральная мощность электромагнитного излучения, коэффициент интегральной мощности, его эффективное значение и т. д. Сравнение на текущий момент значений интегральных мощностей излучения (или уровней спектральных линий) с соответствующими величинами, полученными при предыдущих обследованиях, позволяет получить информацию о факте появления и темпах развития дефектов как для отдельных узлов, так и для единицы оборудования в целом.

Включение электромагнитного способа в комплексную систему диагностики позволит в полной мере использовать его достоинства, заключающиеся в следующем:

информация о появлении локальных дефектов немедленно проявляется в спектральном составе собственного ЭМИ — в изменении уровня спектральных линий как на отдельных частотах, так и в пределах информативных частотных полос;

обследование проводится дистанционно, без вмешательства в технологический процесс;

фиксацию факта появления дефекта можно считать ранней, поскольку в этом случае имеется резерв времени для оценки степени опасности дефекта и принятия соответствующих мер.

Таким образом, с учетом приведенных выше принципов перехода к новой стратегии ТОиР оборудования и достоинств электромагнитного способа ранней диагностики можно предложить следующий вариант оптимальной системы диагностики ВВЭО, состоящей из нескольких ступеней.

Первая ступень — функциональное диагностирование, включающее:

анализ паспортных данных трансформаторов и условий работы для оценки запаса электрической прочности изоляции;

составление перечня возможных эксплуатационных и нерасчетных воздействий;

электромагнитную паспортизацию;

анализ возможных последствий нерасчетных воздействий на эксплуатируемое оборудование;

формирование перечня критериев предельного состояния обмоток и сердечников как совокупности признаков предельного состояния на основании данных нормативно-технической документации;

формирование перечня предельных показателей состояния для вводов, переключателей, насосов, маслоохладителей и т. д.

Итогом работы первой ступени должно стать выделение группы оборудования, требующего дальнейшей углубленной диагностики.

Вторая ступень — ранжирование оборудования, включающее:

проведение электромагнитного контроля с целью определения вида, места возникновения и опасности развития дефекта, а также оценки уровня электротермических явлений;

оценку обратимых изменений состояния изоляции по данным физико-химического анализа масла (увлажнение, загрязнение, засорение масла механическими примесями, шламом);

тепловизионный контроль или расчет температуры обмотки, верхних слоев масла, наиболее нагретой точки;

выявление деструкции твердой части изоляции обмоток трансформаторов по концентрации фурановых соединений;

хроматографический анализ растворенных в масле газов;

выявление признаков предельного состояния оборудования при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособности невозможно или нецелесообразно.

Итогом работы второй ступени диагностики должно стать разделение оборудования на подгруппы, для каждой из которых будут приниматься решения, обозначенные на третьей ступени диагностики.

Третья ступень — комплексное обследование с целью принятия решений:

об учащенном хромотографическом анализе растворенных газов;

о проведении минимального ремонта и замены компонентов для продления срока службы с последующим комплексным обследованием;

о постановке оборудования на постоянный мониторинг технического состояния;

о проведении капитального ремонта или замене оборудования на новое.

Итогом диагностики на третьей ступени должно стать принятие решение о дальнейшей эксплуатации оборудования, основанное на экономических и технических критериях.

Приведенная трехступенчатая система диагностики ВВЭО, включающая в себя электромагнитный контроль, может быть положена в основу разрабатываемых на электроэнергетических предприятиях современных диагностических комплексов, обеспечивающих создание экономически выгодных и надежных систем технического обслуживания и ремонта высоковольтного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция диагностики электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи электрических сетей [Текст] / ОАО «ФСК ЕЭС». М. — 2004. — 172 с.

2. Поляков, В.С. Оценка эффективности эксплуатации и диагностики высоковольтного электрооборудования [Текст] / В.С. Поляков / ПЭИПК // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. СПб. 2009. — Вып. 32. — 250 с.

3. Овсянников, А.Г. Стратегии ТОиР и диагностика оборудования [Текст] / А.Г. Овсянников // Новости электротехники. — 2008. — № 2. — С. 21–28.

4. Силин, Н.В. Контроль состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам его электромагнитного излучения [Текст] / Н.В. Силин // Энергетика. — 2008. — № 3. — С. 86–91.

УДК 620.9:662.92:658.264

А.А.Середкин, М.С. Басс, С.А. Иванов

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭНЕРГООБСЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ г. ЧИТЫ

Низкая энергоэффективность российской экономики стала одной из главных причин напряженности в энергоснабжении страны. На всех последовательных этапах добычи, переработки, преобразования и распределения энергии первичных источников и на всех ступенях использования энергии в материальном производстве, сфере услуг в целом теряется более половины энергии.

Основная часть научных исследований по проблеме энергосбережения посвящена конкрет-

ным объектам (ТЭЦ, котельные, тепловые сети, теплообменные аппараты и т. п.), в то время как рассмотрение больших комплексов и взаимного влияния входящих в них элементов практически отсутствует. Однако именно комплексный подход (например, исследование проблемы энергосбережения применительно к комплексу «ТЭЦ — потребитель») может дать наибольший энергосберегающий эффект.

В рамках исследования данной проблемы были выполнены энергоаудиты нескольких десят-



ков потребителей, тепловых сетей, проанализированы параметры работы ТЭЦ по отпуску тепла. Подавляющая часть потребителей г. Читы — это жилые, общественные и административные здания, подключенные к теплоснабжению от ТЭЦ (у которых технологическая нагрузка в виде отпуску пара отсутствует). Все потребители, подключенные к теплоснабжению от ТЭЦ, имеют следующие схемы подсоединения:

отопление — зависимая схема;
горячее водоснабжение — закрытая одно- или двухступенчатая схемы.

Автоматическое групповое и местное регулирование практически отсутствует. В качестве подогревателей горячего водоснабжения в большинстве случаев используются кожухотрубные теплообменники.

Присоединенная тепловая нагрузка (МВт) по категориям потребителей характеризуется следующим образом:

Жилые здания	— 470
Промышленность (отопление и ГВС)	— 14
Другие объекты	— 251
Всего	— 735

В соответствии с ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ основными целями энергетического обследования было:

получение объективных данных об объеме используемых энергетических ресурсов;

определение показателей энергетической эффективности;

определение потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

разработка перечня типовых, общедоступных мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности с проведением их стоимостной оценки.

Наиболее ярким детальным примером энергоаудита потребителей тепловой энергии стал энергоаудит объектов Читинского государственного университета. ЧитГУ включает в себя 9 учебных корпусов и 4 общежития, подключенные к теплоснабжению в различных частях города. Структура затрат на энергоресурсы и воду в рассматриваемый период 2008–2009 годов представлена на рис. 1. Затраты на все энергоресурсы растут по отношению к предыдущим годам. Это связано с постоянным увеличением тарифов на все виды энергоресурсов. Преобладают затраты

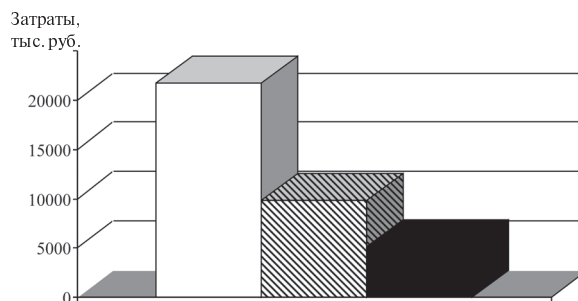


Рис. 1. Структура распределения финансовых затрат ЧитГУ на энергоресурсы и воду

□ — тепловая энергия; ▨ — электроэнергия;
■ — водопроводная вода

на тепловую энергию, что связано в основном с климатической зоной расположения (продолжительность отопительного периода по СНиП — 238 суток). Учитывая постоянную, относительно пропорциональную тенденцию к росту тарифов на все виды ресурсов, данное распределение будет сохраняться и в дальнейшем. Соответственно при проведении энергоаудита основное внимание было уделено тепловой энергии.

Суммарная расчетная нагрузка системы теплоснабжения — 7,333 Гкал/ч, из которой на отопление приходится 6,519 Гкал/ч (89 %), на горячее водоснабжение — 0,814 Гкал/ч (11 %). Годовое фактическое теплопотребление вуза в 2008 году составило 18347 Гкал. Расчетные оценки нормативного потребления тепловой энергии позволяют отметить, что расход тепловой энергии на отопление составляет большую часть — 83 % (15580 Гкал), а на горячее водоснабжение 17 % (3156 Гкал) от общего расчетного теплопотребления ЧитГУ. Соответственно приоритетным направлением сбережения тепловой энергии является отопление.

В ходе энергоаудита был выполнен анализ теплопотребления учебных корпусов и общежитий. Расчетное теплопотребление с учетом потерь в теплосетях составляло 20540 Гкал/год. Фактическое теплопотребление за тот же период — 18347 Гкал/год, или 89 % от расчетного значения. Величина фактического теплопотребления составила 87 % от расчетного значения по учебным корпусам и 94 % по общежитиям (рис. 2).

Отклонение от расчетного теплопотребления свидетельствует о погрешностях в расчете тепловых нагрузок и нарушениях в эксплуатации систем теплоснабжения. Как следствие — отклонение температур внутреннего

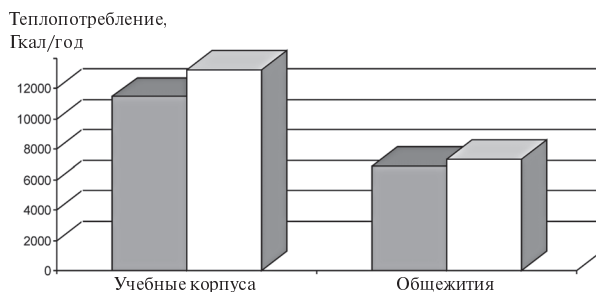


Рис. 2. Фактическое и расчетное теплопотребление объектов ЧитГУ
■ — факт; □ — расчет

воздуха и обратной сетевой воды от нормативов. Из-за отсутствия приборного учета не возможно определить фактическое потребление горячей воды и, следовательно, долю из общего количество тепловой энергии, идущую на ее приготовление.

Ранее был выполнен более представительный анализ теплопотребления в г. Чите (рис. 3). Проанализировано теплопотребление 100 потребителей, что составляет около 1/5 от количества объектов, оборудованных приборами учета. Среди них жилые (20) и административно-общественные (80) здания.

Анализ теплопотребления по рассматриваемым 100 объектам показал:

1. При суммарном расчетном годовом теплопотреблении 181521 МВт·ч фактическое потребление составило 132989 МВт·ч, или 73 % от расчетного.

2. У 28 потребителей, из которых 16 (более половины) составили жилые здания, в течение определенного времени (в основном осенне-весенние месяцы) отмечалось превышение фактически потребленного тепла относительно расчетного на величину до 76 %, что свидетельствует о низкой эффективности энергоиспользования на данных объектах.

3. У 72 потребителей (из них 4 — жилые здания) превышения фактически потребленного тепла относительно расчетного не наблюдалось. Эти объекты потребляли тепла меньше расчетного в среднем на 30 % в течение всего отопительного сезона, что либо свидетельствует об относительно хорошей эффективности энергоиспользования, либо (наиболее вероятно) объясняется следующими причинами:

при заключении договора на теплоснабжение осуществляется приблизительный (на большинстве объектов) расчет теплопотерь здания по удельным тепловым характеристикам;

состояние внутренней и наружной поверхностей нагревательных приборов, особенно в старых зданиях (отложение шлама, солей жесткости, многократная окраска и т. д.), приводит к пониженному теплосъему;

у потребителей в силу сложной экономической ситуации наблюдается переориентация назначения помещений и сокращение численности сотрудников, что влечет уменьшение потребления тепла на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение.

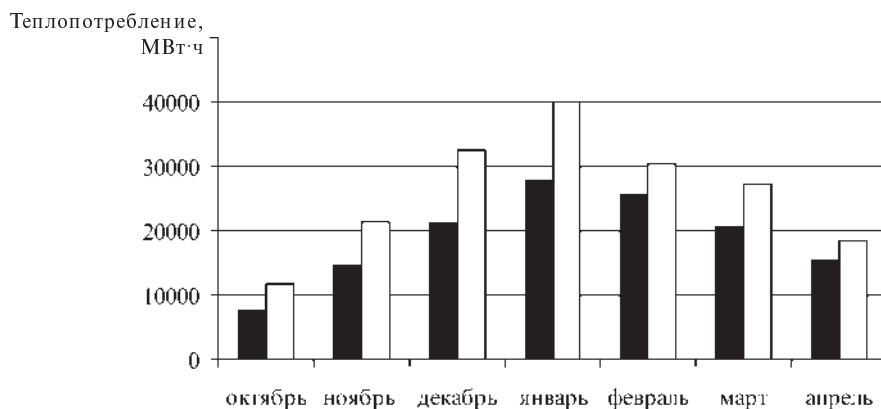


Рис. 3. Статистические данные по фактическому и расчетному теплопотреблению 100 объектов г. Читы, оборудованных приборами учета тепловой энергии, за один отопительный период
■ — фактическое теплопотребление; □ — расчетное потребление



Для анализа состояния ограждающих конструкций были проведены тепловизионные обследования учебных корпусов и общежитий ЧитГУ. По их результатам можно сделать вывод: реальные тепловые потери по некоторым ограждениям превышают нормативные до 70 % (окна, наружные двери). Следует отметить, что проведенные аналогичные обследования для нескольких новостроек Читы показывают превышение нормативных теплопотерь в среднем на 10 %. В большинстве случаев причинами сверхнормативных потерь можно назвать некачественные строительно-монтажные работы и использование низкокачественных строительных материалов.

По результатам энергетического обследования ЧитГУ было определено и намечено следующее:

1. В общей структуре финансовых затрат в 2008 году на долю тепловой энергии приходится 59 %, на электрическую энергию — 27 %, на холодную воду — 14 %. Соответственно наибольший экономический эффект можно получить при внедрении мероприятий по экономии тепловой энергии.

2. В качестве основных направлений повышения энергоэффективности системы теплоснабжения и снижения финансовых затрат предлагаются:

дальнейшая автоматизация тепловых пунктов семи учебных корпусов. По выполненной оценке затраты составят 4,7 млн руб., ожидаемый срок окупаемости по разным корпусам 2,8–4,6 года, ожидаемая экономия тепловой энергии — 1200 Гкал/год, или около 1,3 млн руб. (Установленная в 2003 году система автоматики на тепловом пункте учебного корпуса “Э” позволила сэкономить за первый же отопительный сезон финансовые средства, сопоставимые со стоимостью оборудования автоматики). Если учесть, что срок службы оборудования автоматики — в среднем 15 лет, то за весь этот период экономия средств при оплате тепловой энергии будет весьма значительна;

замена кожухотрубных теплообменников ГВС на пластинчатые в тепловых пунктах учебных корпусов (три теплообменника). По выполненной оценке затраты составят 650 тыс. руб., ожидаемый срок окупаемости по разным корпусам — 1,5–3,6 года, ожидаемая экономия тепловой энергии — 225 Гкал/год, или около 250 тыс. руб.

3. Внедрение мероприятий по повышению эффективности использования тепловой энергии позволит сократить ее потребление ориентировочно на 1400 Гкал/год, или 1,5 млн руб. Ожидаемые сроки окупаемости разработанных энергосберегающих мероприятий составляют 1,5–4,6 года. Для энергосберегающих мероприятий эта величина вполне приемлема.

Можно с достаточной достоверностью предположить, что аналогичная вышеописанной картина с энергопотреблением и эффективностью энергоиспользования имеет место на большинстве объектов города. В потери, перекладываемые на потребителей, не оборудованных приборами учета тепловой энергии, попадает разница между расчетным и фактическим потреблением. На некоторых объектах Читы эта цифра доходит до 30 % от расчетного теплопотребления. Учитывая, что приборами учета тепловой энергии в городе оснащены еще далеко не все объекты, оценить фактическое значение теплопотребления по всему городу затруднительно. Потенциал энергосбережения сосредоточен соответственно либо в тепловых сетях, либо на источниках теплоснабжения.

Технико-экономические показатели ТЭЦ находятся в пределах установленных для них нормативов (удельный расход топлива и КПД).

Проведенные испытания тепловых сетей Читы показали, что фактические тепловые потери превышают расчетные нормативные на 24–28 %, при этом брались расчетные нормы за 1959–1990 годы, которые уже давно не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к тепловой изоляции. В значительной мере это относится к внутриквартальным тепловым сетям. Потери теплоты с утечками сетевой воды превышают установленные нормативы (рис. 4). Соответственно после потребителей наибольшее внимание должно быть сосредоточено на тепловых сетях.

Кроме ТЭЦ источниками централизованного теплоснабжения в некоторых районах Читы служат котельные. Проведенные обследования ряда котельных показали, что КПД их лежит в пределах 49–64 % при норме 70–75 %. Для демонстрации низкой экономичности работы котельного агрегата возьмем 1 котел мощностью $Q = 1,16 \text{ МВт}$ (1 Гкал/ч), работающий на харанорском угле с теплотой сгорания $Q_p^H = 11467 \text{ кДж/кг}$

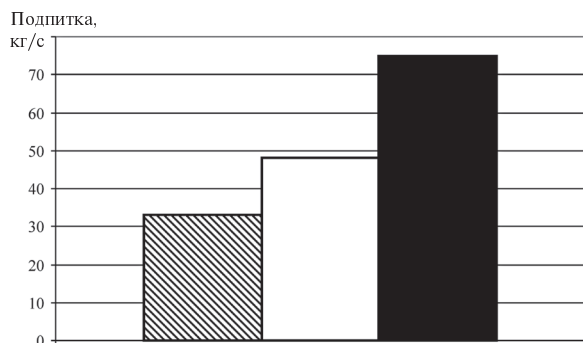


Рис. 4. Подпитка тепловой сети
“ТЭЦ-1 — город”

■ — расчетная; □ — фактическая среднечасовая;
■ — фактическая максимальная

(≈ 2730 ккал/кг) с паспортным КПД 75 %. Цена топлива 700 руб./т. Если фактический КПД (после испытания) равен 60 %, то документально не обоснованный пережог топлива составляет 87,4 т в месяц или свыше 60 тыс. руб. в месяц с одного котла:

$$\Delta B = \frac{Q}{\Delta \eta_k Q_p^H} = \frac{1,16 \cdot 10^6}{0,15 \cdot 11,467 \cdot 10^6} = 0,135 \text{ кг/с } (\approx 87,4 \text{ т/мес.}).$$

Основные выявленные недостатки:

ни один котел не несет номинальную нагрузку (нагрузка меньше на 30–90 %);

у всех котлов на всех режимах завышены расходы воздуха, что приводит к снижению нагрузки и к увеличению потерь с уходящими газами;

по причине неудовлетворительного режима горения наряду с повышенным расходом воздуха фиксировались значительные концентрации монооксида углерода. С одной стороны, воздуха много, а с другой, — его не хватает для полного сгорания топлива по причине плохого перемешивания;

в ряде случаев выявлено неудовлетворительное состояние обмуровок котлов;

на некоторых котлах температура уходящих газов превышает допустимые значения, что приводит к существенному снижению КПД. Вместе с тем наблюдались случаи, когда температуры уходящих газов были ниже точки росы (на небольших нагрузках), что является причиной коррозии хвостовых поверхностей нагрева, газоходов, дымососов и дымовой трубы;

отсутствие топливopодготовки;

отсутствие водоподготовки, что отрицательно сказывается как на поверхностях нагрева котлоагрегатов, так и на состоянии тепловых сетей и внутренних коммуникаций зданий.

Все это подтверждает, что проблемы с эффективностью использования тепловой энергии лежат как на источнике теплоснабжения, так и в тепловых сетях и у потребителя. Соответственно и решать проблему энергосбережения для системы теплоснабжения необходимо комплексно. Возможно, положительные изменения в решении данной проблемы произойдут после начала реальной работы закона “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности”. Один из предлагаемых способов оценки энергоэффективности и потенциала энергосбережения описан ниже.

Полноценная оценка энергоэффективности комплекса “ТЭЦ — потребитель” невозможна без организации учета у подавляющего числа потребителей. Для полномасштабной организации учета тепла у потребителей можно предложить использовать в качестве критериев оценки энергоэффективности КПД рассматриваемого комплекса “ТЭЦ — потребитель” и удельный расход условного топлива на полезно использованную теплоту у потребителя.

Расчетный КПД комплекса “ТЭЦ — потребитель” по использованию тепла определяется выражением

$$\eta_{\text{ТЭЦ-потр}}^p = \frac{Q_{\text{п}}^p}{b_{\text{т}}^p Q_{\text{т}}^p Q_{\text{н}}^p} = \frac{Q_{\text{п}}^p}{b_{\text{т}}^p Q_{\text{т}}^p 8,14},$$

а его фактический КПД по использованию тепла описывается формулой

$$\eta_{\text{ТЭЦ-потр}}^{\Phi} = \frac{Q^{\Phi}}{b_{\text{т}}^{\Phi} Q_{\text{т}}^{\Phi} Q_{\text{н}}^p} = \frac{Q^{\Phi}}{b_{\text{т}}^{\Phi} Q_{\text{т}}^{\Phi} 8,14},$$

где $Q_{\text{п}}^p$ — расчетное теплопотребление, МВт·ч, определяемое как сумма расчетных значений количества тепловой энергии на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения зданий за рассматриваемый период (месяц, отопительный период, год); Q^{Φ} — количество теплоты, доведенной до потребителя, МВт·ч, определяемое по показаниям приборов учета тепловой энергии



у потребителей за рассматриваемый период (при 100 % оснащенности системами учета тепловой энергии); b_t^p, b_t^ϕ — расчетный и фактический удельный расход условного топлива на отпуск

тепловой энергии на ТЭЦ, $\frac{T}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$; b_t^p определится как средний нормативный, а b_t^ϕ — как средний фактический за рассматриваемый период; Q_t^p — расчетное количество теплоты, МВт·ч, отпущенной по графику отпуска тепла с ТЭЦ за рассматриваемый период; Q_t^ϕ — фактическое количество теплоты отпущенной с ТЭЦ, МВт·ч, определяемое по показаниям приборов учета тепловой энергии на ТЭЦ за рассматриваемый период; $Q_H^p = 8,14$ — низшая теплота сгорания условного топлива, $\frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{T}$.

Расчетный удельный расход условного топлива на полезно использованную теплоту у потребителя, $\frac{T}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$:

$$b_{\text{ТЭЦ-потр}}^p = \frac{1}{Q_H^p \eta_{\text{ТЭЦ-потр}}^p} = \frac{b_t^p Q_t^p}{Q_H^p}.$$

Фактический удельный расход условного топлива на полезно использованную теплоту у потребителя, $\frac{T}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$:

$$b_{\text{ТЭЦ-потр}}^\phi = \frac{1}{Q_H^\phi \eta_{\text{ТЭЦ-потр}}^\phi} = \frac{b_t^\phi Q_t^\phi}{Q_H^\phi},$$

где $Q_H^p = 8,14$ — низшая теплота сгорания условного топлива, $\frac{\text{МВт} \cdot \text{ч}}{T}$;

На основании разницы значений $b_{\text{ТЭЦ-потр}}^\phi$ и $b_{\text{ТЭЦ-потр}}^p$ при низкой энергоэффективности комплекса определяется потенциал энергосбере-

жения — рассчитывается величина перерасхода топлива на ТЭЦ, т:

$$\Delta B = (b_{\text{ТЭЦ-потр}}^\phi - b_{\text{ТЭЦ-потр}}^p) Q^\phi.$$

Для повышения энергоэффективности рассматриваемого комплекса “ТЭЦ — потребитель” города Читы можно предложить следующие направления работы:

организацию учета тепловой энергии на вводах в существующие здания; в новостройках необходимо дополнительно предусматривать проектом поквартирный учет;

проведение энергоаудита как можно большего числа потребителей тепла, особенно в бюджетной сфере;

составление и регулярное обновление энергетических паспортов новостроек и существующих зданий с указанием фактических теплотехнических показателей, ограждающих конструкций и удельного теплопотребления;

установку систем автоматического регулирования и замену теплообменного оборудования систем ГВС у потребителей тепла;

постепенную модернизацию ограждающих конструкций существующих зданий для повышения класса их энергоэффективности (капитальный ремонт с утеплением, устройство вентилируемых фасадов и т. п.);

устранение утечек сетевой воды и сверхнормативных потерь тепла через изоляцию в тепловых сетях;

повышение КПД основного и вспомогательного оборудования ТЭЦ и котельных, увеличение доли комбинированной выработки электроэнергии.

Реализация перечисленных мероприятий позволит практически полностью исключить сверхнормативные потери тепла. Дальнейший рост тарифов на тепловую энергию создаст потребителям экономические стимулы к энергосбережению. А от теплоснабжающих организаций необходимо требовать соблюдения расчетных нормативов энергоэффективности в комплексе с установлением оптимальных тарифов для потребителей. Контроль за теплоснабжающими организациями в этом вопросе могут выполнять соответствующие энергонадзорные структуры, ответственные за энергосбережение.

УДК 620.9:662.92:658.264

А.Г. Батухтин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Число работающих тепловых насосов в зарубежных странах составляет около 17 млн шт. По прогнозам Мировой энергетической комиссии к 2020 году в передовых странах до 75 % нагрузки отопления и горячего водоснабжения будет покрываться с помощью технологий, использующих тепловые насосы. Из-за значительной длительности отопительного сезона и вследствие больших отопительных нагрузок применение тепловых насосов в России более интенсивно и характеризуется большими коэффициентами использования установленной мощности, чем в западных странах, что делает их применение в системах децентрализованного теплоснабжения более привлекательным. Однако в РФ преимущественно распространены централизованные системы теплоснабжения, и это определяет низкую эффективность использования тепловых насосов по стандартным схемам вследствие высоких температур теплоносителя, а также высокой эффективности комбинированной выработки в них тепловой и электрической энергии.

В рыночных условиях при неполной загрузке промышленного отбора (из-за спада промышленности) изыскиваются возможности его использования для повышения тепловой и электрической мощности станции. Наиболее распространены следующие варианты использования промышленного отбора:

в качестве пикового источника; работа турбины по данному способу экономически целесообразна при низких температурах наружного воздуха;

в качестве источника пара для турбопривода питательного насоса;

для нужд централизованного теплоснабжения [1].

Один из вариантов — использование промышленного отбора в качестве источника пара для турбопривода, вращающего тепловой насос. Традиционное использование электродвигателя

в качестве привода теплового насоса снижает коэффициент преобразования энергии (КОП) от 5 до 15 % и более. Предложена схема использования теплового насоса [2] в качестве первой ступени подогрева сетевой воды турбины с противодавлением, подключенной противодавлением ко второй ступени сетевого подогревателя, а испаритель теплового насоса подключен к циркуляционному водоводу конденсационной турбины. Такое схемное решение, по заявлению автора [2], позволяет на каждую тонну сожженного топлива подавать в систему централизованного теплоснабжения энергетический эквивалент двух тонн. Данное решение для российских условий слабо применимо ввиду того, что на большинстве станций эксплуатируются теплофикационные турбины конденсационного типа. Кроме того, вытеснение отработавшего пара турбины с противодавлением в ряде случаев не оправдано из-за снижения выработки электрической мощности на тепловом потреблении.

На рис. 1 показана схема, которая позволяет повысить тепловую мощность и экономичность станции путем загрузки промышленного отбора турбины. ТЭЦ имеет в своем составе теплофикационную турбину 1, турбину 2 для привода теплового насоса 3. Испаритель теплового насоса соединяют с циркуляционным водоводом турбины 1 после конденсатора. Конденсатор теплового насоса служит сетевым подогревателем, работающим параллельно с основным сетевым подогревателем турбины 2.

Очевидно, что нагрев сетевой воды в конденсаторе теплового насоса целесообразно проводить как можно ниже. Для примера примем нагрев сетевой воды до 80 °С, а температуру сбросной циркуляционной воды 30 °С. Коэффициент преобразования энергии (КОП) при этих температурах по циклу Карно [2] составит 7,06, а по реальному циклу [2] — 3,69. Таким образом, получаем на 1 кВт мощности, потребляемой тепловым насосом, 3,69 кВт тепловой энергии.

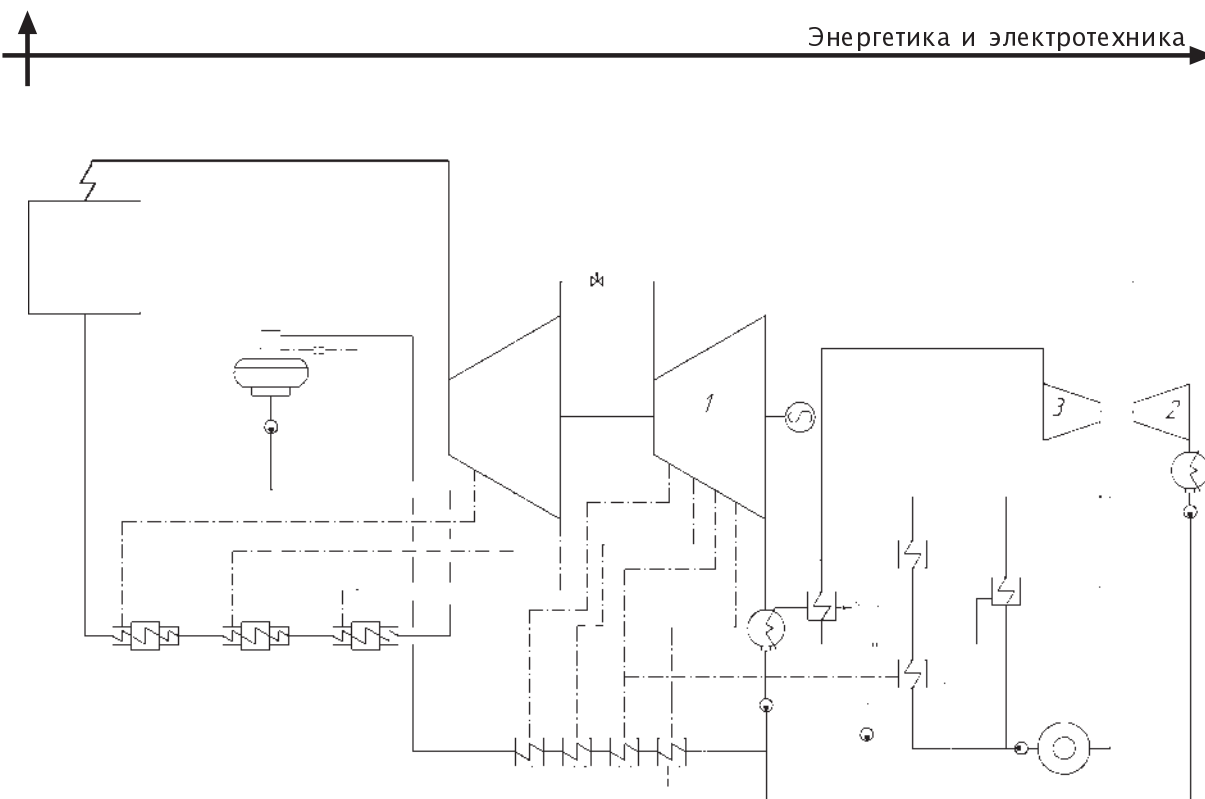


Рис. 1. Схема включения теплового насоса

При таком варианте включения тепловая мощность станции возрастает, и нагрузка промышленного отбора используется более эффективно. Использование теплового насоса целесообразно и в летнее время при минимальной выработке на станциях электроэнергетики, так как в этот период температура нагрева сетевой воды ниже и КОП теплового насоса возрастает. Кроме того, в летний период экономичность ТЭЦ ниже, чем конденсационной станции, поэтому можно разгрузить турбины по тепловой, и — как следствие — электрической нагрузкам.

Проведем сравнение с другими способами повышения тепловой мощности станции. Предлагаемый вариант использования теплового насоса со схемой включения в качестве параллельной ступени электрического котла более эффективна при КОП больше единицы.

Сравним тепловой насос с водогрейным котлом и с вариантом нагрева сетевой воды паром производственного отбора в теплообменнике. Нагрузку примем равной 60 МВт, температурный график — 80/50, КПД водогрейного котла — 0,85, КПД энергетического котла 0,9, КПД теплообменников, электромеханический и транспорта тепла 0,99. Расчет ведем по условному топливу. Расход топлива в варианте с водогрейным котлом был 2,41 кг/с. В варианте с полной утилизацией в теплообменнике увеличение

расхода пара на турбину составило 22 кг/с, а топлива — 2,02 кг/с. При использовании схемы с тепловым насосом расход пара на турбину увеличился до 18,8 кг/с при расходе пара на привод теплового насоса 25 кг/с, увеличение расхода топлива составило 1,73 кг/с [3]. При сравнении вариантов не учитывалась большая стоимость топлива для мазутных водогрейных котлов.

Применение теплового насоса с турбоприводом в качестве сетевого подогревателя дает более значительную по сравнению с другими вариантами экономию топлива. Кроме того, данное схемное решение позволяет значительно увеличить располагаемую тепловую мощность ТЭЦ.

В условиях реструктуризации и перехода к рыночным механизмам в энергетике России приоритетными в развитии энергетической науки становятся направления, связанные со снижением себестоимости отпускаемой тепловой и электрической энергии. Особенно актуален вопрос повышения конкурентоспособности существующих ТЭЦ. При этом сложная экономическая ситуация и отсутствие свободных финансовых ресурсов у генерирующих компаний вызывает необходимость изыскивать малозатратные методы энергосбережения. Основное преимущество ТЭЦ перед конденсационными станциями заключается в экономически более выгодной выработке электроэнергии на тепло-

вом потреблении. К числу возможных действий по энергосбережению на ТЭЦ и соответственно повышению их конкурентоспособности можно отнести мероприятия по оптимизации отпуска теплоты от ТЭЦ потребителю — это самые малозатратные энергосберегающие технологии. Наметившийся рост потребления как электрической, так и тепловой энергии при практически полном отсутствии ввода новых энергетических мощностей ставит вопрос о возможном дефиците тепловой энергии. Строительство новых станций требует больших капитальных вложений, оптимизация же отпуска тепловой энергии от ТЭЦ позволит высвободить существующие мощности для присоединения новых потребителей.

Большинство городов и поселков РФ отапливаются от местных котельных или ТЭЦ, работающих по графикам центрального качественного регулирования отпуска теплоты, рассчитанным по методикам пятидесятих годов прошлого века. Рост городов значительно увеличивает количество потребителей теплоты, подсоединенных к местной системе централизованного теплоснабжения. Новые же нагрузки покрываются за счет повышения мощностей источников теплоснабжения как правило без учета изменения характеристик тепловых сетей. Все это приводит к неоптимальному использованию топливных ресурсов и повышению стоимости энергии. Сложившаяся ситуация с завышенными по сравнению с нормативными значениями температурами обратной сетевой воды у источников централизованного теплоснабжения (особенно в утренние часы) общеизвестна. Это вызвано тем, что нагрузка систем горячего водоснабжения (ГВС) потребителей в течение суток колеблется в значительных пределах и в ночное время снижается до уровня 5–10 % от расчетного значения. Кроме изменения нагрузки ГВС к основным причинам, определяющим неравномерность потребления теплоты системами теплоснабжения в течение суток, относится изменение температуры наружного воздуха, а также корректировка настроек по расчетной температуре внутри помещений потребителей, оборудованных электронными системами автоматического регулирования.

Необходимо разработать механизм, который бы позволил производить расчет оптимального суточного графика отпуска теплоты от источника теплоснабжения при условии обеспечения

всех потребителей необходимым количеством теплоты на отопление и горячее водоснабжение. При этом существующие тепловые сети отличаются разной протяженностью отдельных участков и, как следствие, разной тепловой инерционностью. Это существенно ограничивает применение оптимального суточного графика отпуска теплоты и определяет низкую эффективность современных систем централизованного теплоснабжения вследствие невозможности корректировать температуру теплоносителя по лучам тепловых сетей. Оптимизация отпуска теплоты от источника теплоснабжения с учетом функционирования тепловых сетей и потребителей тепловой энергии относится к разряду беззатратных методов повышения конкурентоспособности предприятий энергетики и поэтому может считаться одним из приоритетных направлений энергосбережения при работе теплоэнергетического оборудования. Данный способ снижения себестоимости производства тепловой энергии требует определять график отпускаемой теплоты так, чтобы все потребители были обеспечены необходимым количеством теплоты на отопление и горячее водоснабжение и при этом сам график отпуска теплоты был наиболее экономически выгоден предприятию энергетики.

С целью нормализации температуры обратной сетевой воды в [4] предложено осуществлять суточное регулирование тепловой нагрузки на ТЭЦ, учитывающее резкое и продолжительное снижение ее в ночное время (в основном из-за уменьшения нагрузки ГВС), а также изменение температуры наружного воздуха в течение суток, которое для многих континентальных районов Сибири достигает 20 °С. Функционирование потребителей тепловой энергии и производителя имеет взаимосвязанный характер: температурное воздействие одного оказывает влияние на работу другого. Для оптимизации отпуска теплоты от ТЭЦ необходимо построение взаимосвязанной оптимизационной модели функционирования источника и потребителя тепловой энергии.

Поскольку потребители тепловой энергии реальных ТЭЦ расположены на разном расстоянии от источника теплоснабжения, то при оптимизации отпуска теплоты необходимо разделять потребителей по географическому признаку. В районах теплоснабжения необходимо вычленивать потребителей, принадлежащих к группам



административных и жилых. Кроме того, необходимо разделить потребителей по способу присоединения установок горячего водоснабжения. Для оптимизации отпуска теплоты в режиме реального времени предлагается разделить сутки на ряд промежутков. Для каждого из временных промежутков находят усредненные параметры, характеризующие теплопотребление: нагрузки ГВС для каждого из типов потребителей, а также температуру наружного воздуха.

Первый этап оптимизации состоит в нахождении необходимой для покрытия нагрузки отопления и ГВС температуры прямой сетевой воды для каждого из видов потребителей. Потребители делятся по принадлежности к району теплопотребления, к группам административных и жилых объектов, а также по способу присоединения установок ГВС. При расчете отдельных видов потребителей необходимо учитывать: нагрузки отопления и ГВС, соответствующие рассматриваемому временному промежутку, а также вид присоединения установки ГВС. Расчет необходимых температур сетевой воды у всех видов потребителей ведется для каждого временного диапазона, на которые предварительно делятся рассматриваемые сутки. Нагрузка ГВС любого потребителя находится с учетом ее снижения по суточным графикам исходя из принадлежности к группам административных или жилых зданий, причем для каждого рассматриваемого временного промежутка.

На втором этапе оптимизации находят температуры прямой сетевой воды на ТЭЦ в предшествующий временной промежуток, необходимые для того, чтобы в рассматриваемый временной промежуток температура сетевой воды на каждом из учитываемых потребителей была равна расчетной. Температуру прямой сетевой воды на ТЭЦ определяют с учетом аккумулярующих свойств тепловых сетей, а также транспортного запаздывания.

Диапазон температур прямой сетевой воды на ТЭЦ (в котором находится оптимальная для конкретного временного промежутка) ограничивается разной протяженностью отдельных участков тепловых сетей: участки тепловых сетей имеют разные характеристики тепловой изоляции, при этом скорость изменения температуры прямой сетевой воды на ТЭЦ не должна превышать $30\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$; районы теплопотребления различаются составом потребителей тепловой энергии

и соответственно требованиями к изменению температур прямой сетевой воды в течение суток. Снять (удовлетворить) эти ограничения позволит изменение температуры теплоносителя по лучам тепловых сетей. Такое изменение температуры — по оптимизированным графикам центрального регулирования (в зависимости от оптимального суточного графика и потребностей конкретных потребителей) для каждого направления тепловых сетей — позволит уменьшить перерасходы тепловой энергии, а также снизить температуру обратной сетевой воды и соответственно увеличить выработку на тепловом потреблении на ТЭЦ. Решением этой задачи может служить применение установок, перераспределяющих потоки теплоты по разноинерционным ветвям теплосетей в зависимости от оптимального суточного графика и потребностей конкретных потребителей. Перераспределение потоков теплоты предполагается осуществлять с применением технологии тепловых насосов [5].

Результат достигается тем, что комплекс теплоснабжения обладает источником тепла и имеет не менее двух трубопроводов прямой и двух трубопроводов обратной сетевой воды. В качестве пикового источника теплоты комплекс снабжен тепловым насосом, а также установленными на каждом трубопроводе сетевой воды конденсаторами и на каждом трубопроводе обратной сетевой воды испарителями. На рис. 2 изображена схема установки, где 1 — источник теплоснабжения; 2, 3 — конденсаторы теплового насоса; 4, 5 — испарители теплового насоса; 6 — тепловой насос; 7 — привод; 8 — первый потребитель; 9 — второй потребитель; 10–13 — регуляторы расхода; 14 — трубопровод прямо сетевой воды; 15 — трубопровод обратной сетевой воды.

При отсутствии транспортного запаздывания комплекс теплоснабжения работает следующим образом: воду, подогретую в источнике теплоснабжения 1 направляют по трубопроводу 14; она разделяется на два потока, первый из которых направляется потребителю 8, второй поток — потребителю 9. Поток, направленный потребителю 8, нагревают в конденсаторе теплового насоса 2 хладагентом, которому передается тепло от испарителя теплового насоса 5 или 3 после сжатия в тепловом насосе 6, приводимом в движение приводом 7. Поток, направленный потребителю 9, нагревают в конденсаторе теп-



При наличии транспортного запаздывания теплоносителя, направляемого потребителям, комплекс теплоснабжения работает следующим образом: воду, подогретую на источнике теплоснабжения I , направляют по трубопроводу 14 , она разделяется на два потока, первый из которых направляется потребителю 8 , второй — потребителю 9 . Потоки, направленные потребителям 8 , 9 имеют транспортные запаздывания соответственно t и t_1 . Тогда поток, направленный потребителю 8 , нагревают на время t раньше момента, когда необходимы соответствующие параметры у рассматриваемого потребителя. А поток, направленный потребителю 9 , нагревают на время t_1 раньше того момента, когда необходимы соответствующие параметры у данного потребителя. При этом повышение температуры по направлению к каждому потребителю осуществляется индивидуально с учетом аккумулирующей способности тепловых сетей и снижения температуры теплоносителя из-за потерь тепла. Снижение нагрева теплоносителя осуществляется по направлению потребителя 8 на время t раньше необходимого момента, а у потребителя 9 снижают температуру на время t_1 раньше необ-

Применение данной схемы позволит осуществить новую технологию перераспределения тепловых потоков между лучами тепловых сетей с использованием тепловых насосов и даст возможность модернизировать действующую либо создать новую схему отпуска теплоты в системах централизованного теплоснабжения при незначительных капитальных затратах. Это приведет к снижению эксплуатационных расходов и повышению тепловой мощности за счет оптимизации суточных графиков отпуска теплоты, снижения перетопа потребителей, а также снижения температуры обратной сетевой воды. Кроме того, расширит методы оптимизации систем централизованного теплоснабжения, а также позволит отказаться от распространенного сей-



час метода построения графиков центрального регулирования с применением одной температуры прямой сетевой воды для всех потребителей тепловой энергии и перейти к исследованиям режимов работы системы централизованного теплоснабжения по персонализированным графикам качественного регулирования для групп потребителей.

Разработка и технико-экономическое обоснование новой схемы использования преимуществ технологии тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения для перераспределения тепловых потоков по лучам тепловых сетей за счет снижения температуры обратной сетевой воды в комплексе с методиками

оптимизации отпуска теплоты по скорректированным графикам центрального регулирования в течение суток соответствуют критической технологии — “Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии” — и позволят решить задачи приоритетного направления развития науки РФ “Энергетика и энергосбережение”.

Работа по повышению эффективности современных систем централизованного теплоснабжения с учетом невозможности корректировки температуры теплоносителя по лучам тепловых сетей проводится в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыжкин, В.Я.** Тепловые электрические станции: учебник для вузов [текст] / В.Я. Рыжкин; Под ред. В.Я. Гришфельда. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 328 с.: ил.
2. **Рейд, Д.** Тепловые насосы: пер. с англ. [Текст] / Д. Рейд, Д. Макмайл. — М.: Энергоиздат, 1987. — 328 с.: ил.
3. **Сафронов, П.Г.** Использование теплового насоса в тепловых схемах тепловых электростанций [Текст] / П.Г. Сафронов, А.Г. Батухтин, С.А. Иванов // Научные проблемы транспорта Сибири

и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 202–204.

4. **Батухтин, А.Г.** Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ на основе математического моделирования с учетом функционирования различных типов потребителей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук // А.Г. Батухтин; Восточно-Сибир. госуд. техн. ун-т. — Улан-Удэ.: Изд-во ВСГТУ, 2005. — 16 с.

5. **Патент 91620 РФ U1, МПК, Кл. F01K 13/00.** Комплекс теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин, М.С. Басс., П.Г. Сафронов. — Опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.

УДК 621.1

С.А. Иванов, А.Г. Батухтин, Н.В. Горячих

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ОТ ТУРБОАГРЕГАТОВ ТЭЦ

Проблеме покрытия переменной части графиков электрической нагрузки уделялось много внимания. В последние 10–15 лет в энергосистемах нашей страны вследствие ряда объективных факторов все больше проявляется тенденция к разуплотнению суточных и недельных графиков электрической нагрузки. Эта проблема особенно остра в период значительной загрузки теплофикационных отборов турбин ввиду их

значительной доли в большинстве энергосистем России. Разуплотнение электрических графиков нагрузки энергосистем требует, кроме создания специальных пиковых агрегатов и пиковых электрических станций, использования различных резервов мощности энергосистем.

Вопросы резервирования электрической мощности необходимо рассматривать при непрерывном условии полного обеспечения тепловой

нагрузки. Можно выделить три основных способа получения дополнительной мощности ТЭЦ:

ограничение тепловой нагрузки турбины и покрытие недоотпуска тепла от пикового водогрейного котла (ПВК);

ограничение нагрузки турбины и покрытие пиковым подогревателем недоотпуска тепла от основных сетевых подогревателей;

ограничение нагрузки турбины и использование аккумулирующих свойств зданий и тепловых сетей.

Определен критерий для компетентного сравнения вариантов, как тех, которые требуют капитальных вложений, так и не требующих. В качестве экономического критерия выбора оптимальных теплофикационных систем в этих условиях служит минимум годовых затрат, руб/год, [1]:

$$Z = E \cdot K + И = \min, \quad (1)$$

где K — капитальные затраты, руб.; $И$ — производственные издержки, руб/год; E — уровень эффективности затрат.

Уже длительное время применяются два коэффициента эффективности: 0,12 — для вновь сооружаемых объектов и 0,15 — для оценки эффективности новой техники и модернизации [2].

При сравнении вариантов получения дополнительной мощности целесообразно рассматривать удельные затраты, отнесенные к величине дополнительной мощности. Приведенные затраты зависят от ставки дисконтирования, страховых выплат, суммы годового налога и др. Таким образом формула (1) получает вид

$$Z = (a + v + s + r) K + И = \min, \quad (2)$$

где a — коэффициент, соответствующий ставке дисконтирования, принимаемый обычно равным 0,1; v , s — страховые выплаты и сумма годового налога, принимаются равными соответственно 2 и 1 %; r — затраты на текущий ремонт и техобслуживание, для ПТУ их можно принять в размере 3 % от стоимости объекта [3].

Рассмотрим все три этих метода на примере систем теплоснабжения Читы.

Способ с ограничением нагрузки турбины и использованием аккумулирующих свойств зданий и тепловых сетей

Поскольку потребители тепловой энергии реальных ТЭЦ расположены на разном расстоянии от них, то при оптимизации отпуска теплоты не-

обходимо разделять потребителей по географическому признаку. В районах теплоснабжения необходимо вычленив потребителей, принадлежащих к группам административных и жилых. Кроме того, необходимо разделить потребителей по техническим характеристикам зданий.

Для оптимизации отпуска теплоты в режиме реального времени предлагается разделить сутки на 8 промежутков. В каждом из временных промежутков находится характерный абонент, относительно которого и производится регулирование с учетом температуры наружного воздуха.

На первом этапе среди всех потребителей сети определяется характерный абонент. Для этого по приводимым ниже формулам (3) и (4) [4] производится расчет и определяется температура внутреннего воздуха всех абонентов при заданной температуре прямой сетевой воды от источника, а затем по этим полученным данным выбирается абонент с минимальной температурой внутреннего воздуха.

$$t''_{пс} = \frac{A}{1 + \frac{l(1+\beta)}{2R_{ср}v_{в}c_{рв}}} + t_{пс}^H e^{-\varphi_{пс}\tau \left(1 + \frac{l(1+\beta)}{2R_{ср}v_{в}c_{рв}}\right)}, \quad (3)$$

$$A = \left[t'_{пс} \left(1 - \frac{l(1+\beta)}{2R_{ср}v_{в}c_{рв}} \right) + t_H \frac{l(1+\beta)}{R_{ср}v_{в}c_{рв}} \right] \times \left(1 - e^{-\varphi_{пс}\tau \left(1 + \frac{l(1+\beta)}{2R_{ср}v_{в}c_{рв}}\right)} \right);$$

где $t''_{пс}$ — температура прямой сетевой воды у потребителя, °C; β — коэффициент местных потерь теплоты в трубопроводе прямой сетевой воды; l — длина трубопровода прямой сетевой воды, м; $R_{ср}$ — термическое сопротивление трубопровода прямой сетевой воды (среднее по всей длине), м·C/Вт; $c_{рв}$ — теплоемкость прямой сетевой воды, кДж/кг·°C; $\rho_{в}$ — плотность сетевой воды, кг/м³; τ — время, с; t_H — температура на-

ружного воздуха, °C; $\varphi_{пс} = \frac{v_{в}}{V_{пс}}$; $V_{пс}$ — емкость

труб подающей магистрали теплосети, м³; $v_{в}$ — объемный расход прямой сетевой воды, м³/с;



$t'_{\text{пс}}$ — температура возмущения на источнике, °C;
 $t_{\text{пс}}^{\text{H}}$ — температура прямой сетевой воды на источнике до возмущения, °C.

$$t_{\text{в}} = \frac{t_{\text{в}}^{\text{H}} \chi_0 V - \chi_0 V t_{\text{н}} - v_{\text{в}} c_{\text{рв}} (t_{\text{пс}}^{\text{H}} - t_{\text{ос}}'')}{e^{\frac{\tau \chi_0 V}{\theta}} \chi_0 V} + t_{\text{н}} + \frac{v_{\text{в}} c_{\text{р}} (t_{\text{ср}}^{\text{лог}} - t_{\text{ос}}'')}{\chi_0 V}; \quad (4)$$

где $t_{\text{в}}$ — температура внутреннего воздуха, °C;

$t_{\text{в}}^{\text{H}}$ — температура внутреннего воздуха в начальный момент времени, °C; χ_0 — удельная отопительная характеристика зданий, кДж/м³·°C; V — наружный объем зданий, м³; $t_{\text{пс}}'$, $t_{\text{ос}}''$ — температуры прямой и обратной сетевой воды у потребителя, °C; $t_{\text{ср}}^{\text{лог}} = \frac{t_{\text{пс}}' - t_{\text{пс}}''}{2,3 \lg \frac{t_{\text{пс}}'}{t_{\text{пс}}''}}$ — среднелогариф-

мическая температура прямой сетевой воды, °C;

$\theta = \frac{1}{2} FS \rho c \left(1 + \frac{L - K}{K + N + L} \right)$ — коэффициент, учи-

тывающий аккумулирующую способность зданий; F — суммарная поверхность конструкций, м²; ρ — плотность материала стен, кг/м³; S — толщина стен, м; c — теплоемкость материала стен, кДж/кг·°C; $K = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}$, $L = \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}$ — тер-

мические сопротивления, м²·°C/кВт; $N = \frac{S}{\lambda}$ — тер-

мическое сопротивление теплопроводности, м²·°C/кВт; $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности стены, кВт/м²·°C; S — толщина стенки, м; λ — коэффициент теплопроводности, кВт/м·°C;

Задавая для конкретного характерного потребителя расчетную температуру воздуха, по этим же формулам определим нужную температуру возмущения на источнике. Расчет температуры внутреннего воздуха производится с учетом аккумулирующей способности зданий, а расчет температуры прямой сетевой воды на источнике — с учетом запаздывания температурных возмущений.

Результатом расчета будет интервал температур прямой сетевой воды, при использовании которых характерный потребитель обеспечен расчетным расходом теплоты (расчетной температурой внутреннего воздуха), а все другие потребители — расходом теплоты, равным расчетному или выше.

На втором этапе производится увеличение регулировочного диапазона на ТЭЦ. Выполненные на первом этапе расчеты и экспериментальное подтверждение достоверности представленных формул свидетельствуют о возможности использовать пониженный температурный график на ТЭЦ.

Найденные интервалы температур прямой сетевой воды позволяют определить регулировочный диапазон.

На рис. 1 приведена расчетная зависимость тепловой нагрузки от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ и по продолжительности отопительного периода для климатических условий г. Читы, а также коэффициента теплофикации $\alpha_{\text{т}} = 0,75$. При работе ТЭЦ в базовом режиме площадь $bcdeO$ характеризует производство теплоты на отборах турбины; при учете аккумулирующих свойств тепловых сетей и зданий производство теплоты на отборах уменьшится и будет характеризоваться площадью $kldeO$.

Использование пониженного температурного графика позволяет снизить расход пара на сетевые подогреватели, что ведет к увеличению расхода пара в ЧНД турбины. При увеличенном расходе пара в ЧНД турбины происходит увеличение конденсационного потока, что приводит к дополнительной выработке турбиной электрической мощности.

Поскольку график электрической нагрузки неоднородный и может иметь несколько пиков в течение суток, а температура наружного воздуха в зимнее время может изменяться на 10–15 °C, то регулирование тепловой нагрузки следует производить восемь раз в течение суток. Учащенное регулирование позволяет корректировать температурный график, тем самым предотвращая перетоп абонентов.

Обсуждаемая здесь возможность позволяет повысить регулировочный диапазон, не требуя при этом каких-либо капитальных вложений.

Экономический эффект от применения изложенного выше метода расширения регулировочного диапазона для покрытия пиков элект-

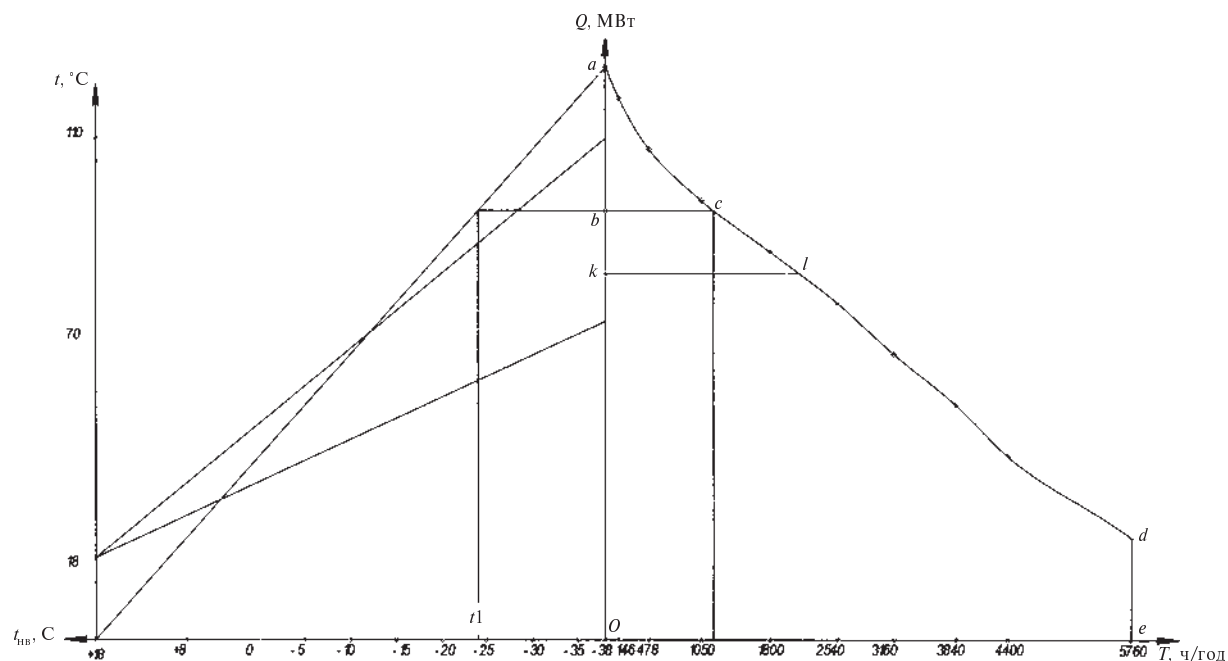


Рис. 1. Величина и продолжительность тепловой нагрузки для условий г. Читы

рических нагрузок складывается из исключения необоснованно завышенного отпуска тепловой энергии в течение суток и более гибкого графика регулирования тепловой нагрузки путем увеличения числа регулировок. Снижение температуры прямой сетевой воды обуславливает повышение конденсационной мощности турбин. И, наоборот, повышение конденсационной мощности ограничивается температурой внутреннего воздуха, удовлетворяющей потребителей тепловой энергии.

Методика ограничения тепловой нагрузки турбин с использованием аккумулирующих свойств тепловых сетей и зданий требует некоторого перетопа потребителей тепловой энергии до начала ограничения нагрузки.

При определении экономической целесообразности используем зависимость (2) для расчета затрат. Данный способ не требует каких-либо капитальных вложений. Для эффективного ограничения тепловой нагрузки необходимо определенное время повышать температуру прямой сетевой воды от источника, чтобы создать перетоп у абонентов во время пониженной электрической нагрузки. Обеспечив у потребителя тепловой энергии завышенную температуру внутреннего воздуха, определяют возможность снижения температуры прямой сетевой воды для

получения дополнительной электрической мощности в пики электрических нагрузок. При обеспечении завышенной температуры внутреннего воздуха у потребителя увеличиваются затраты на топливо.

Интервалы времени суток (всего их восемь), для которых производится регулирование отпуска теплоты от ТЭЦ: 0–3, 3–6, 6–9, 12–15, 15–18, 18–21, 21–24 часа.

Пик электрической нагрузки будет наблюдаться с 9 до 21 часа, и ограничение тепловой нагрузки будет происходить в это же время. Но граничный уровень, до которого можно снижать нагрузку, определяет температура внутреннего воздуха у потребителя. Перетоп же абонентов можно проводить в остальное время, причем суточный отпуск тепла не должен изменяться.

Временные интервалы недотопов и перетопов абонентов могут меняться. Исследуем различные интервалы перетопов и недотопов.

Пусть температура внутреннего воздуха в течение часа поднялась с 20 до 22 °С. Тогда можно определить температуру возмущения прямой сетевой воды от источника.

Предварительные расчеты показали, что при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -31$ °С и перетопе абонентов до температуры внутреннего воздуха $t_{\text{в}} = 22$ °С за трехчасовой период

Таблица 1

**Расчет тепловой схемы ПТ-60-90 на различные тепловые мощности
при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -31^\circ\text{C}$**

Название показателей	Значения показателей при величинах тепловой мощности Q_t , МВт		
	27,45	29,6	24,6
Расход сетевой воды $G_{\text{св}}$, кг/с	186,77	186,77	186,77
Температура прямой сетевой воды $t_{\text{пс}}$, $^\circ\text{C}$	98,5	105	90
Температура обратной сетевой воды $t_{\text{ос}}$, $^\circ\text{C}$	63,5	67	62
Расход пара на ПСВ 1, $D_{\text{сп1}}$, кг/с	4,64	5,01	3,72
Расход пара на ПСВ 2, $D_{\text{сп2}}$, кг/с	4,75	5,15	3,80
Расход пара на ПВД 1, D_1 , кг/с	4,9	4,92	4,87
Расход пара на ПВД 2, D_2 , кг/с	4,27	4,29	4,24
Расход пара на ПВД 3, D_3 , кг/с	3,83	3,85	3,80
Расход пара на деаэратор, $D_{\text{д}}$, кг/с	4,22	4,14	4,28
Расход пара на ПНД 4, D_4 , кг/с	5,17	4,57	5,86
Расход пара на ПНД 5, D_5 , кг/с	0,32	0,54	—
Расход пара на ПНД 6, D_6 , кг/с	3,97	3,34	3,74
Расход пара на турбину, D_0 , кг/с	80,32	80,73	79,71
Расход пара в конденсатор, $D_{\text{к}}$, кг/с	44,22	43,86	45,45

времени (минимальный интервал времени для регулирования) необходимо повышение температуры прямой сетевой воды от 98 до 105 $^\circ\text{C}$. Для расчета и дальнейшего сравнения с другими способами прием снижения тепловой нагрузки на 5 МВт при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -31^\circ\text{C}$.

Расчеты по формулам (3) и (4) показали, что при снижении тепловой нагрузки на 5 МВт (снижение температуры прямой сетевой воды до 90 $^\circ\text{C}$) можно в течение 3,5 часов поддерживать температуру внутреннего воздуха у абонентов не ниже расчетной. Рассчитаем экономическую эффективность данного метода [4].

Расчет тепловой схемы, имеющей два основных подогревателя сетевой воды, представлен в табл. 2.

При использовании данного метода регулирования тепловой нагрузки при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -31^\circ\text{C}$ и применении таких температурных графиков можно получить дополнительную электрическую мощность турбины ΔN до 2 МВт. Расчет позволяет проследить изменение расхода пара на турбину и определить перерасход или экономию топлива.

$$\Delta B = \frac{\Delta D_0 (i_0 - i_{\text{пв}})}{Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{мн}} \eta_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где $i_0 = 3476,75$ кДж/кг — энтальпия свежего пара; $i_{\text{пв}} = 683,5$ кДж/кг — энтальпия питательной воды, кДж/кг; $z_{\text{тп}} = 0,98$ — КПД теплового потока; $\eta_{\text{к}} = 0,91$ — КПД котла; $Q_{\text{н}}^p = 29330$ кДж/кг — теплота сгорания условного топлива.

Перетоп может длиться по-разному, а потому топливный перерасход на него будет различным. Расчет перерасхода топлива и топливных издержек (при цене условного топлива 1000 руб/т) представлен в табл. 3.

$$И = Ц_{\text{т}} \cdot \Delta B. \quad (6)$$

Проведенный расчет показал, что при снижении тепловой нагрузки на 5 МВт в течение 3,5 часов температура внутреннего воздуха у характерного потребителя будет не ниже расчетного значения.

Капитальные вложения при использовании этого способа не требуются. Таким образом, приведенные затраты будут равны топливным издержкам за вычетом экономии топливных издержек

Таблица 2

Расчет перерасхода топлива и топливных издержек

Длительность перетопа, ч	Перерасход топлива ΔB , т	Топливные издержки I , руб.	Топливные издержки за год I , руб./год
3	0,472	472	113280
6	0,945	945	226800
12	1,891	1891	453840
15	2,364	2364	567360

Таблица 3

Расчет экономии топлива и экономии топливных издержек

Длительность снижения тепловой нагрузки, ч	Экономия топлива ΔB , т	Экономия топливных издержек Θ_i , руб.	Экономия топливных издержек за год Θ_i , руб./год
3	1,176	1176	282240
6	2,352	2352	564480
12	4,705	4705	1129200

при ограничении тепловой нагрузки: $3 = I - \Theta_i$. Расчет удельных затрат приведен в табл. 4.

Знак минус показывает выигрыш от применения регулирования. Из расчета видно, что данный метод регулирования является целесообразным, так как даже при 15-часовом перетопе и ограничении тепловой нагрузки турбин на 3 часа удельные годовые затраты составят 142,56 руб на 1 кВт дополнительной мощности.

Способ, использующий ограничение тепловой нагрузки турбины и покрытие недоотпуска тепла ПВК

Сущность способа заключается в том, что при неизменном расходе пара на турбину увеличивают пропуск пара в ЧНД турбины за счет ограничения теплофикационных отборов пара.

Таблица 4

Удельные затраты

Длительность интервалов регулирования		Удельные затраты 3 , руб./(кВт-год)
Перетоп, ч	Снижение тепловой нагрузки, ч	
3	3	-84,48
6	6	-168,84
12	12	-337,68
15	3	142,56

При этом часть тепловой нагрузки турбины передается на пиковый источник теплоты.

Тепловая нагрузка ТЭЦ характеризуется значительной сезонной неравномерностью и зависит от климатических условий в месте расположения ТЭЦ. На рис. 1 приведены расчетные зависимости величины и продолжительности тепловой нагрузки для г. Читы. Проанализируем возможности получения дополнительной мощности путем ограничения теплофикационных отборов пара. При работе ТЭЦ в базовом режиме площадь abc характеризует производство теплоты пиковым источником, а площадь $bcdeO$ — производство теплоты отборами турбины.

Как следует из приведенного графика, при температурах наружного воздуха $t_{нв} > t_1$, чему соответствует время отопительного периода $\tau > \tau_1$, вся тепловая нагрузка может быть покрыта от основных сетевых подогревателей турбины без использования пикового источника теплоты. Поскольку максимально возможная производительность пикового источника теплоты может быть равна максимальной тепловой нагрузке отборов турбины, принципиально возможен перевод всей тепловой нагрузки на этот источник, т. е. в этот период времени его характеристики не ограничивают диапазон получения дополнительной мощности на ТЭЦ. Однако передача



всей тепловой нагрузки на пиковые источники теплоты означала бы перевод турбины на конденсаторный режим работы, но теплофикационные паровые турбины (за исключением турбин Т-250/300-240 и Т-175/210-130 ПО ТМЗ) [5] не могут развивать максимальной мощности в таких режимах. Поэтому и при $t_{\text{нв}} > t_1$ целесообразно сохранение частичной тепловой нагрузки на отборах турбины.

Предельная мощность, которую можно получить от теплофикационных турбоустановок, зависит от надежности последних ступеней ЧНД и определяется максимально допустимым расходом пара в конденсатор. Чаще всего максимально допустимый расход пара превышает на 10–15 % расход пара в конденсатор при работе в конденсационном режиме с номинальной нагрузкой. Максимальная мощность турбоагрегатов ТЭЦ также ограничивается допустимой нагрузкой генераторов. Обычно величина максимальной мощности на 10–20 % превышает номинальную.

Целесообразность этого метода будет определяться приведенными затратами. Одной из наиболее значительных составляющих производственных издержек будут издержки по топливу на ПВК.

Так, например, для климатических условий г. Читы точка включения ПВК при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -28^\circ\text{C}$. Максимальную мощность турбины можно получать при работе ПВК в номинальном режиме в течение всего максимально отопительного периода. Как показали расчеты, использование ПВК в номинальном режиме среднеотопительного периода нецелесообразно, так как ПВК сможет покрывать большую часть, а некоторый период даже всю тепловую нагрузку, и тогда турбина будет работать по конденсационному режиму, что неэффективно как с экономической точки зрения, так и с технической.

Итак, для равноценности сравниваемых вариантов примем снижение тепловой нагрузки с отборов турбин на 5 МВт и передадим эту нагрузку на ПВК. При изменении нагрузки ПВК происходит форсирование режимов их работы, что ведет к значительному изменению КПД ПВК. В данном случае произойдет снижение КПД ПВК на 0,5 %.

При определении технико-экономического эффекта от использования рассматриваемого

метода необходимо учитывать не только повышение расхода топлива, но и затраты на мероприятия по снижению вредных выбросов до их величины в сравниваемом варианте. Примером такого мероприятия может служить применение присадок цеолитсодержащего сырья Забайкальского края при сжигании углей. Кроме затрат на технологию применения цеолитов в данном случае необходимо рассматривать и снижение КПД котельных агрегатов. В табл. 5 [4] представлен пример применения добавки цеолита Шивиртуйского месторождения при сжигании его в котлах низкотемпературного кипящего слоя. Эффективность использования цеолитов в ПВК отражена в табл. 5.

Рост нагрузки ПВК влечет увеличение выбросов вредных веществ. Добавление 10 % цеолита достаточно, чтобы снизить выбросы оксидов серы до первоначального уровня (до увеличения нагрузки ПВК). В этом случае КПД ПВК будет равен

$$\eta'_{\text{ПВК}} = \eta_{\text{ПВК}} - \Delta\eta_{\text{ПВК}}^{\text{форс}} - \Delta\eta_{\text{ПВК}}^{\text{цеол}}. \quad (7)$$

Тогда КПД для условий выбранного примера снизится на 0,78 %, а перерасход топлива составит

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta'_{\text{ПВК}}} + \left(\frac{Q}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{ПВК}}} - \frac{Q}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta'_{\text{ПВК}}} \right). \quad (8)$$

Как говорилось ранее, ограничение нагрузки может происходить в течение нескольких часов в сутки. Перерасход топлива на ПВК составит 0,193 кг/с. Определим в зависимости от длительности снижения нагрузки перерасход

Таблица 5

Результаты опытов применения цеолита в топках НТКС

Доля цеолита, %	SO ₂ , ppm	Δη _к ^{БР} , %
2	57	0,05
4	58	0,09
6	54	0,12
8	55	0,17
10	51	0,28
20	31	0,91
30	30	1,63
40	30	2,19

Таблица 6

Расчет перерасхода топлива и топливных издержек

Время ограничения тепловой нагрузки отборов турбин, ч	Перерасход топлива ΔB , т	Топливные издержки I , руб.	Топливные издержки за год I , руб./год
3	2,16	2160	518400
6	4,32	4320	1036800
9	6,48	6480	1555200
12	8,64	8640	2073600

топлива на ПВК и удельные общие затраты. Данные приведены в табл. 6.

При покрытии основных пиков электрической нагрузки в течении шести часов в сутки топливные издержки составят 1036800 руб./год.

Снижение платы за выбросы не учитываем (ее доля невелика), но необходимо учесть затраты на цеолит. Рыночная цена цеолита 8000 руб./т.

Необходимо учитывать и капитальные вложения в ПВК. Стоимость котла КВ-ГМ 20–10 млн рублей.

Соответственно затраты будут равны

$$Z = (a + v + s + r) K + I + Z_{\text{цеол}} = (0,1 + 0,02 + 0,01 + 0,03) K + I + 0,1 \Delta B C_{\text{цеол}}.$$

Способ, использующий ограничение нагрузки турбины и покрытие недоотпуска тепла от основных сетевых подогревателей пиковым подогревателем

Дополнительные сетевые подогреватели, обогреваемые паром от энергетических котлов через редукционно-охладительное устройство (РОУ), от производственного отбора вводятся в схемы базово-маневренных ТЭЦ. Они сейчас уже нашли в ряде энергосистем свое применение.

Таблица 7

Удельные затраты при использовании ПВК

Длительность ограничения тепловой нагрузки отборов турбин, ч	Удельные затраты, руб./кВт
3	1060,064
6	1320,128
9	1580,192
12	1840,256

Сущность способа заключается в том, что при неизменном расходе пара на турбину увеличивают пропуск пара в ЧНД турбины за счет ограничения теплофикационных отборов пара. При этом часть тепловой нагрузки турбины передается на пиковый сетевой подогреватель, подключенный по греющей среде к производственному отбору или через РОУ к паропроводу свежего пара.

Рассмотрим схему, применяемую на Читинской ТЭЦ-1 ОАО «ТГК-14» (рис. 2, а), и новые схемы (рис. 2, б, в), позволяющие повысить экономичность станции. Все схемы могут использоваться для покрытия пиков электрических нагрузок, разгружая теплофикационные отборы и передавая нагрузку на пиковый сетевой подогреватель.

Рассмотрим целесообразность использования пикового сетевого подогревателя для покрытия тепловой нагрузки. Критерием будут общие затраты. В одном случае пиковый подогреватель установлен последовательно с основным по ходу сетевой воды (рис. 2, а), в другом — параллельно (схема на рис. 2, б) [6]; греющей средой в обоих случаях является пар из производственного отбора. Представлена также схема, где пиковый подогреватель установлен параллельно основному, а греющей средой служит свежий пар, отпущенный через РОУ (рис. 2, в).

Тепловая экономичность теплофикационных турбин зависит от выработки электроэнергии на тепловом потреблении, которая в свою очередь существенно зависит от давления в теплофикационном отборе [7]. С другой стороны, давление в теплофикационном отборе, определяемое недогревом сетевой воды до температуры насыщения отборного пара (при заданной тепловой нагрузке и температурном графике тепло-

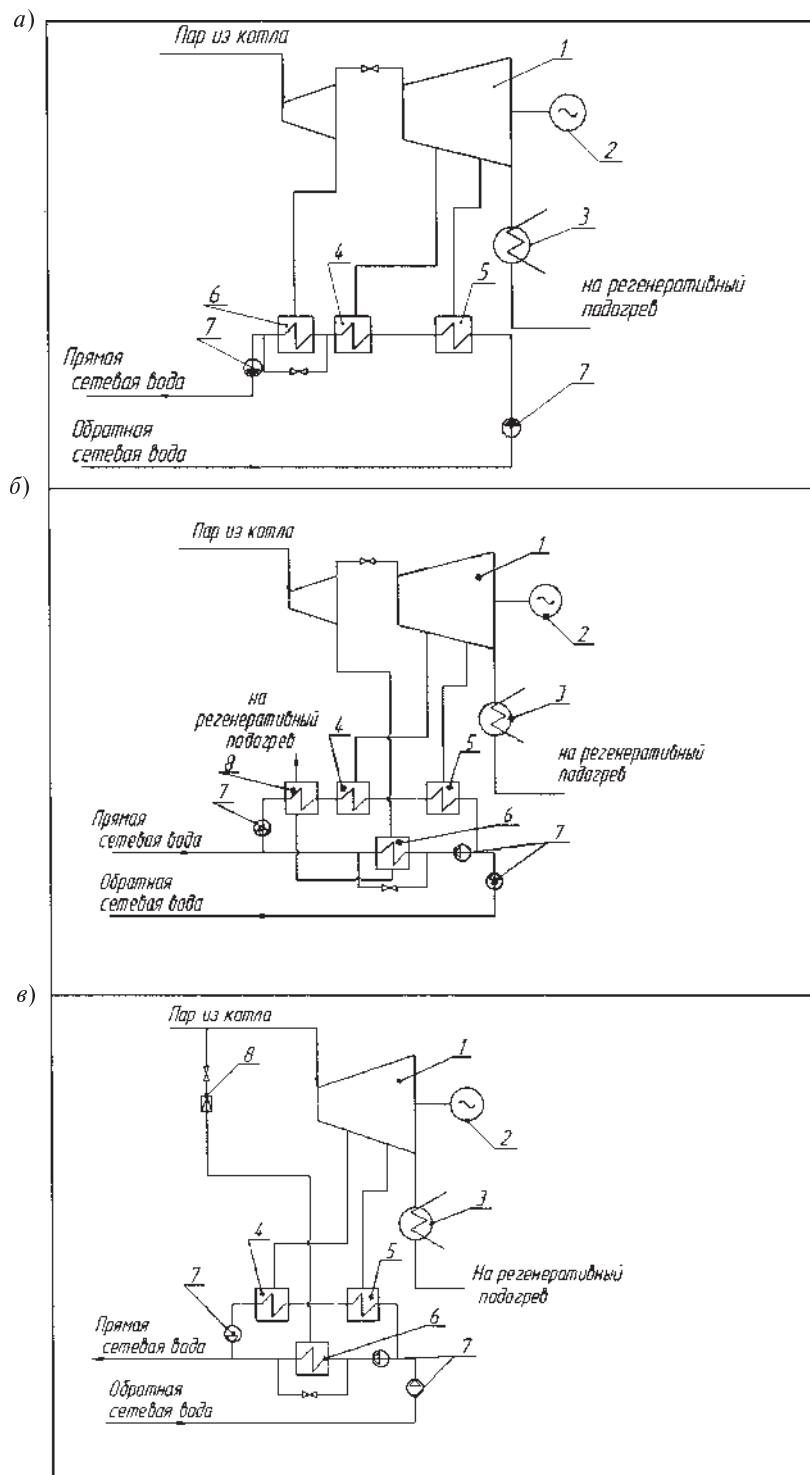


Рис. 2. Схемы, используемые для получения дополнительной мощности на ТЭЦ

сети), влияет на величину электрической мощности турбоустановки.

Величина недогрева зависит от режимов эксплуатации турбины и водного режима теплосети и изменяется в широких пределах. Согласно данным исследований [8, 9] в условиях сложившегося водного режима недогрев увеличивается от 0,8 до 3,0 °С на каждые 1000 часов работы после чистки сетевых подогревателей. На отдельных ТЭЦ величина недогрева достигает 30 °С. Уменьшая недогрев в сетевых подогревателях, можно увеличить располагаемую мощность турбины и повысить ее экономичность.

Величина недогрева в сетевом подогревателе определяется по формуле, использованной в [10]:

$$\vartheta_{\text{н}} = t_{\text{н}} - t_2 = (t_2 - t_1) \exp\left(-\frac{kF}{Wc_{\text{в}}}\right), \quad (9)$$

где $t_{\text{н}}, t_1, t_2$ — температуры насыщения греющего пара, сетевой воды на входе и выходе из сетевого подогревателя, °С; F — площадь поверхности теплообмена, м²; W — расход сетевой воды, кг/с; $c_{\text{в}}$ — теплоемкость воды, кДж/кг °С; k — коэффициент теплопередачи, кВт/м² °С.

Из формулы (9) видно, что недогрев существенно зависит от расхода сетевой воды. Предлагаемые схемы (рис. 2, а и б) позволяют значительно снизить расход сетевой воды через

основные подогреватели, что ведет к снижению величины недогрева. Реализуя подобные схемы, можно уменьшить недогрев в сетевой подогревательной установке, что в свою очередь приведет к понижению давления в теплофикационном отборе и увеличению мощности турбины за счет дополнительной выработки электроэнергии на тепловом потреблении при сохранении требуемого отпуска теплоты. Данная схема требует капитальных затрат, включающих стоимость дополнительного трубопровода и арматуры, дополнительного пикового подогревателя, а также их монтажа, но может быть достаточно легко реализована в условиях любой действующей ТЭЦ.

Расчет общих затрат на каждую из этих схем покажет целесообразность того или другого метода.

Для расчета условимся о снижении нагрузки с теплофикационных отборов на 5 МВт и примем постоянную вырабатываемую электрическую мощность турбины 75 МВт. Расчеты проведены для турбины ПТ-60-90 применительно к условиям г. Читы ($t_{\text{нв}} = -31$ °С) и представлены в табл. 8.

Исследуя график электрической нагрузки, можно сделать вывод, что ее максимальный пик приходится на дневное время и длится около 6 часов в день. Отопительный период для г. Читы

Таблица 8

Расчет топливных издержек при ограничении нагрузки теплофикационных отборов

Названия показателей	Длительность ограничения, ч	Значения показателей для разных схем		
		Схема 1	Схема 2	Схема 3
Снижение нагрузки на теплофикационные отборы ΔQ , МВт	—	5	5	5
Увеличение расхода пара на пиковый подогреватель сетевой воды $\Delta D_{\text{п}}$, кг/с	—	2,38	2,56	2,68
Снижение расхода пара на основные сетевые подогреватели, кг/с: $\Delta D_{\text{с11}}$ $\Delta D_{\text{с12}}$	—	1,11	1,21	1,19
	—	1,17	1,26	1,06
Снижение расхода свежего пара ΔD_0 , кг/с		0,8	0,74	0,44
Снижение расхода условного топлива ΔB , кг/с		0,085	0,079	0,047
Снижение расхода условного топлива ΔB , т, в зависимости от длительности ограничения нагрузки отборов турбин	3	0,918	0,853	0,507
	6	1,836	1,706	1,015
	9	2,754	2,559	1,523
	12	3,672	3,413	2,030

Окончание табл. 8

Названия показателей	Длительность ограничения, ч	Значения показателей для разных схем		
		Схема 1	Схема 2	Схема 3
Снижение топливных издержек ДИ, руб	3	918	853	507
	6	1836	1706	1015
	9	2754	2559	1523
	12	3672	3413	2030
Снижение топливных издержек ДИ, руб./год	3	220320	204720	121680
	6	440640	409440	243600
	9	660960	614160	365520
	12	881280	819120	487200

Таблица 9

Удельные затраты, руб./кВт

Длительность ограничения тепловой нагрузки турбин, ч	Общие затраты, 3, тыс. руб./год		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3
3	110,16	272,64	314,16
6	154,68	170,28	253,62
9	44,52	67,92	192,24
12	–65,64	–34,56	131,4

составляет 240 дней. Приведем все издержки к годовым.

Капитальные вложения в пиковый подогреватель и его монтаж — 750 тыс. руб. Тогда общие затраты составят величины, указанные в табл. 9.

В качестве экономического критерия выбора оптимальных теплофикационных систем приняты общие затраты, складывающиеся из капитальных вложений и издержек производства. Целесообразно сравнивать варианты, как имеющие капитальные вложения, так и не имеющие, по удельным затратам, отнесенным к дополнительно полученной мощности.

Произведенные расчеты общих затрат показали, что рассмотренные три способа имеют раз-

личные удельные затраты. Наиболее экономически целесообразны способы без привлечения капитальных вложений, т. е. основанные на изменении режимов работы, но они имеют малый интервал регулирования. Способ с привлечением ПВК для выработки тепла во время ограничения тепловой нагрузки турбин имеет наибольшие удельные затраты, но в то же время обеспечивает самый большой интервал регулирования нагрузки.

Оптимальным для получения дополнительной мощности ТЭЦ является комбинирование методов (способов). Наиболее целесообразна комбинация с использованием инерционных свойств теплофикационных систем и применение предлагаемых схемных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качан, А.В. Техничко-экономические основы проектирования тепловых электрических станций [Текст] / А.Д. Качан, Н.В. Муковозчик. — М.: Высш. школа, 1983. — 159 с.
2. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст]: учебник для вузов. — 8-е изд., сте-

реот. / Е.Я. Соколов. — М.: Издат. дом МЭИ, 2006. — 472 с.

3. Яковлев, Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения [Текст] / Б.В. Яковлев. — М.: Новости теплоснабжения, 2008. — 448 с.

4. **Иванов, С.А.** Комплексная оптимизация систем централизованного теплоснабжения с учетом динамических характеристик объектов [Текст] / С.А. Иванов, П.Г. Сафронов, Н.В. Горячих // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2009.— № 3.— С. 53–63.

5. **ГОСТ 3618-76.** Турбины паровые стационарные для привода электрических генераторов. Типы, основные параметры [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1976.— 11 с.

6. **Патент 86240 Российская Федерация, МПК F7 01 K 17/00.** Способ работы тепловой электрической станции [Текст] / А.Г. Батухтин, С.А. Иванов, Н.В. Горячих, М.С. Басс.

7. **Бененсон, Е.Н.** Теплофикационные паровые турбины [Текст] / Е.Н. Бененсон, Л.С. Иоффе.—

М.: Энергия, 1976.— 264 с.

8. **Борисова, В.П.** Получение реальных характеристик теплофикационных турбоустановок с отопительными отборами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.П. Борисова.— М.: Изд-во МЭИ, 1985.— 16 с.

9. **Иванов, С.А.** Повышение эффективности выработки дополнительной мощности турбоагрегатами ТЭЦ в отопительный период путем сочетания ограничений отборов пара с передачей части тепловой нагрузки турбины на пиковые источники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.А. Иванов; ЛПИ.— Л.—1986.— 212 с.

10. **Гиршфельд, В.Я.** Режимы работы и эксплуатация ТЭС [Текст] / В.Я. Гиршфельд, А.М. Князев, В.Е. Куликов.— М.: Энергия, 1980.— 288 с.

УДК 577.23:620.95

Л.М. Молодкина, М.Ю. Андрианова, А.Н. Чусов

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО И ФЕРМЕНТАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОДЕСТРУКЦИЮ СРЕДНЕ- И МЕДЛЕННОРАЗЛАГАЕМЫХ ОТХОДОВ

Прогнозы развития энергетики свидетельствуют о неуклонном возрастании доли нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в том числе энергии биомассы. Россия ежегодно накапливает органических отходов до 300 млн т в сухом эквиваленте: 250 млн т — в сельскохозяйственном производстве, 50 млн т — в виде бытового мусора. Эти отходы могут быть сырьем для производства биогаза, потенциальный объем которого может составить 90 млрд м³ ежегодно [1].

Различают теоретический (физически возможный) и технически-реализуемый выход газа. В 1950–70-х годах технически возможный выход биогаза составлял всего 20–30 % от теоретического. Сегодня применение ферментов, искусственной деградации сырья (например, с помощью ультразвуковых или жидкостных кавитаторов) позволяет увеличить выход биогаза до 95 % [2]. Время и эффективность брожения определяются динамикой анаэробного расщепления (динамическим равновесием между стадиями гидролиза, ацидогенеза, ацетогенеза, активного метаногенеза, протекающими с разной

скоростью [3]) и быстротой расщепления субстрата. Чем сложнее структура субстрата, тем дольше длится расщепление. Например, сахар и крахмал, имеющие простую структуру, расщепляются очень быстро, а целлюлоза и гемицеллюлоза, обладающие широко разветвленной структурой, разлагаются медленно.

Цель нашей работы, выполняемой в рамках исследования каталитической пароуглекислотной конверсии метана для разработки реактора получения синтез-газа, — изучение влияния ультразвука и промышленных ферментных препаратов на эффективность биодеградации растительных и бумажных отходов в технологиях получения биогаза.

В качестве объектов исследования были выбраны среднеразлагаемые (листья) и медленно-разлагаемые отходы (газетная бумага), которые характеризуются значениями факторов биоразложения соответственно 0,6–0,72 и 0,22 [4].

Использовали биопрепарат Биотэл (бактериально-ферментная композиция, растительный наполнитель, ароматизатор) для эффективного разложения естественных отходов, жиров, бума-



ги и волокон органического происхождения (производитель Biological Preparation Ltd, Великобритания), а также препарат Хамекозим II (компания Nemeso Agro, Нидерланды), содержащий протеазу (14 ед/г), амилазу (15 ед/г), бета-глюканазу (400 ед/г), ксиланазу (400 ед/г), целлюлазу (600 ед/г).

Деграляция растительного сырья (отходов) под ультразвуковым воздействием происходит в первую очередь за счет акустической кавитации. Для получения ожидаемого эффекта необходимы оптимальные значения интенсивности ультразвука и частоты колебаний. С повышением частоты кавитационный пузырек не достигает конечной стадии захлопывания, что снижает микроударное действие кавитации. Чрезмерное понижение частоты приводит к увеличению уровня воздушного шума и требует увеличения габаритов излучателя. Поэтому оптимален диапазон 18–44 кГц. Повышение интенсивности ультразвука сверх определенного предела приводит к увеличению амплитудного значения давления, и кавитационный пузырек вырождается в пульсирующий. При малых значениях интенсивности слабо выражена кавитация и все вторичные эффекты, определяющие эффективность воздействия. Рабочий интервал интенсивности составляет 0,5–10 Вт/см² [5].

Обработку отходов ультразвуком проводили в аэробных условиях в емкости диаметром 10 см, высотой 7 см, с помощью ультразвукового устройства Ультратон МС-2000 М (диаметр излучателя 7 см, звуковое давление на воздухе на частоте 22 кГц на расстоянии 200 мм от излучателя составляет не менее 90 дБ, акустическая мощность 1,6 Вт). Излучатель погружали в воду, размещая над биомассой плашмя. Периодически проводили перемешивание отходов.

Для проведения анаэробного сбраживания биомассу с водной суспензией добавок и бактериальных затравок загружали во флаконы, после чего собирали системы из трех флаконов, переходников и зажимов, позволяющие производить отбор проб биогаза и фильтрата (рис. 1).

Флаконы с биомассой (1) помещали в термостат электрический суховоздушный ТС-1/80 СПУ, температуру в котором поддерживали на уровне $36,0 \pm 0,2$ °С. Остальные флаконы (2 и 3) с барьерной жидкостью (5 г лимонной кислоты, 200 г хлорида натрия, 1 л деионизованной воды, несколько капель индикатора метилового оран-

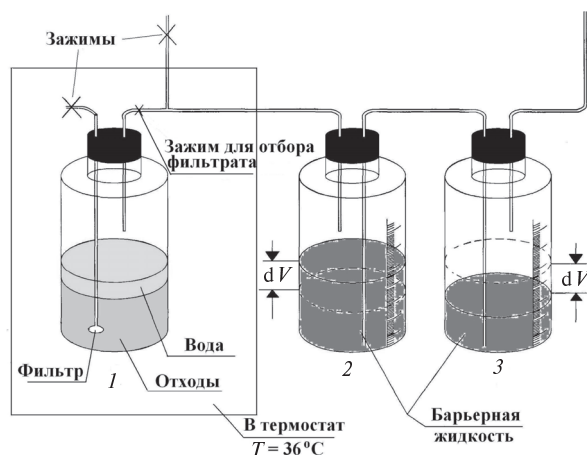


Рис. 1. Схема лабораторной установки для моделирования процесса биодеградации растительных и бытовых отходов в анаэробных условиях

жевого до заметной розовой окраски раствора) находились вне термостата. Во флаконах 2 и 3 ежедневно (или реже) определяли уровни барьерной жидкости. Убыль объема барьерной жидкости во флаконе 2 (или прирост во флаконе 3) соответствовал объему выделенного биогаза. Значения, полученные в разных опытах для каждой пары флаконов 2 и 3, усредняли и строили графики зависимости объема выделенного биогаза от времени инкубации.

Поскольку до закладки в промышленные биореакторы растительные и бытовые отходы могут некоторое время разлагаться в аэробных условиях, отдельные исследования выполнены для аэробных условий (системы 11 и 12). Системы 6 и 7 выдерживали 48 часов в аэробных условиях, затем помещали в анаэробные условия.

Изменение *pH* среды в процессе биодеградации отходов контролировали с помощью преобразователя ионометрического И 500.

Ранее нами было показано, что в процессе разложения бытовых отходов происходит изменение интенсивности люминесценции белкового и гуминового типа (максимумы люминесценции белкового типа наблюдаются при длине волны излучения λ , равной 300 нм (фенольный люминофор), 330–340 (индольный люминофор) и 420–450 нм (люминесценция гуминового типа). Кроме того, нами показана корреляция между интенсивностью люминесценции фенольного люминофора и химическим потреблением кислорода (ХПК) — интег-

ральным показателем содержания органических веществ. Поэтому в работе получали спектры возбуждения и регистрации люминесценции анализируемых проб. Измерения проводили на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (НПФ ЛЮМЭКС) с коррекцией сигнала [6]. При измерении пробы разбавляли в 8 или 15 раз.

На стадии ацидогенеза и ацетогенеза образуются летучие жирные кислоты (преобразующиеся в уксусную кислоту) и бикарбонат-ион (в результате растворения CO_2 и диссоциации угольной кислоты). И поскольку нами ранее показана возможность измерения содержания анионов летучих жирных кислот (ЛЖК) методом капиллярного электрофореза по методике, разработанной для анализа неорганических ионов [7], в работе применен этот метод с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель — 103 Р» (НПФ ЛЮМЭКС).

Газетную бумагу и листья нарезали кусочками размером от 0,5×0,5 до 1×1 см. Навески по 5 или 10 г заливали буферным раствором (350 мл), приготовленным из гидрокарбоната натрия (2 мг-экв/л) на дистиллированной воде; pH доводили до 7,35–7,5.

В табл. 1 приведено описание систем, которые выдерживали в анаэробных и аэробных условиях.

В термостат загружали одновременно по пять систем, поэтому влияние окружающей среды, в частности атмосферного давления, было одинаковым для систем 1–5 и 6–10. На рис. 2 представлены зависимости суммарного объема выделившегося биогаза от времени нахождения систем в анаэробных условиях.

Как видно из рис. 2, только в трех системах из десяти наблюдалось выделение биогаза. Среди первых пяти систем, инкубируемых параллельно, биогаз продуцировался только в третьей системе, которая содержала бактериально-ферментную композицию и растительный наполнитель, т. е. свой легкоразлагаемый субстрат, ферменты и бактерии. По-видимому, в системах 1 и 2 газеты, практически заполнившие весь объем флакона, сыграли роль адсорбента и пространственно разъединили эти компоненты. Предварительная обработка ультразвуком (УЗ) газетной бумаги, являющейся медленно разлагаемым отходом (система 1), не привела к ее деградации, достаточной для метаногенеза. Также недостаточным оказалось действие ферментного препара-

Таблица 1

Характеристики изучаемых систем

№ системы	Субстрат	Объем растворителя, мл	Фермент (препарат), вес (г)	Бактериальная заправка, мл	Длительность обработки ультразвуком,	$pH^{\text{н}}$
1	Газеты, 10 г	350 см ³	Биотэл, 0,25	—	+ 26	4,75
2	Газеты, 10 г	350	Биотэл, 0,25	—	—	5,85
3	—	350	Биотэл, 0,25	—	—	5,25
4	Газеты, 10 г	350	Хамекозим, 0,25	Затр. фекальн., 0,5	—	5,0
5	—	350	Хамекозим 0,25	Затр. фекальн., 0,5	—	7,05
6*	Листья, 5 г	350	—	—	+ 12,5	4,6
7*	Листья, 5 г	350	—	—	—	4,75
8	Газеты, 5 г	350	—	Осадок бытовых сточных вод, 5	—	6,3
9	Газеты, 5 г	350	Хамекозим, 0,25	Осадок бытовых сточных вод, 5	—	6,75
10	Газеты, 5 г	350	Хамекозим, 2,5	Осадок бытовых сточных вод, 5	—	6,85
11	Листья, 10 г	350	—	—	—	5,5
12	Листья, 10 г	350	—	—	+ 24,5	6,05

Примечание: pH в пробах определяли после биodeградации субстрата

рата Хамекозим II, содержащего целлюлазу, при дозе 0,25 г на 10 г газетной бумаги. В то же время существенное закисление среды (см. табл. 1) свидетельствует о начавшемся ацидогенезе.

Для анализа результатов эксперимента привлекали данные, полученные при исследовании проб всех систем методами капиллярного электрофореза (табл. 2) и спектрофлуориметрии (рис. 3).

Результаты анализа содержания в пробах 1–5 ацетат-иона и суммы анионов летучих жирных кислот (табл. 2) и оценка содержания бикарбонат-иона также подтверждают то, что в системах 1, 2 и 4 с газетной бумагой при выбранных режимах воздействия УЗ и концентрации ферментов метаногенез не развивался.

Как видно из рис. 3, а, спектры регистрации флуоресценции систем 1, 2 и 4, содержащих равное количество бумаги, примерно одинаковы, несмотря на разное содержание добавок. При этом спектр люминесценции добавок в систему 4 (кривая 5) существенно отличается от спектра добавок в системы 1 и 2 препарата Биотэл (кривая 3). На наш взгляд, полученный результат может подтвердить предположение об адсорбционных свойствах газетной бумаги по отношению к компонентам ферментных препаратов. Это можно было наблюдать также визуально — после

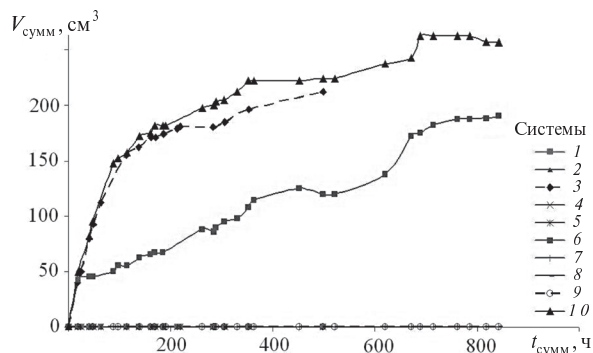


Рис. 2. Зависимости суммарного объема выделившегося биогаза от времени нахождения систем в анаэробных условиях

инкубации жидкость в системе 5 была мутной, а в системе 4 почти прозрачной.

Эксперименты с газетной бумагой во второй серии опытов (с системами 6–10) показали, что ни бактериальная затравка из осадка бытовых сточных вод (система 8), ни сочетание этой затравки с небольшой дозой Хамекозима (система 9) не привели к достаточной для развития метаногенеза биодеградации газетной бумаги. И только добавка большой дозы ферментного препарата (2,5 г на 5 г газетной бумаги) в присутствии бактериальной затравки (осадка бытовых сточных вод) привело к продукции биогаза (кривая

Таблица 2

Концентрации бикарбонат-ионов, ацетат-ионов, суммы ионов летучих жирных кислот и основных катионов в изучаемых системах

№ системы	Концентрация ионов, мг/л							
	HCO_3^-	CH_3COO^-	Ионы ЛЖК	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
1	110	199	308	2,9	4,1	24,3	5,6	12,5
2	110	200	309	0,2	2,8	18,9	3,2	7,1
3	110	199	490	4,2	0,8	17,9	0,0	0,0
4	100	186	650	0,5	3,2	21,3	20,0	160
5	100	176	278	5,0	1,1	20,2	16,5	34,3
6	450	3219	3675	1,3	149	14,8	67	11,8
7	240	1678	2439	14,4	118	16,4	75	141
8	50	0	55	0,0	0,0	17,1	0,0	0,9
9	250	247	567	0,9	1,4	18,0	3,0	10,9
10	800	674	1659	7,5	2,2	18,5	4,0	274
11	400	724	2521	5,4	146	12,0	74	150
12	400	720	2533	1,4	276	16,0	112	196

Примечание: для бикарбонат-ионов данный метод дает только оценочные значения концентраций

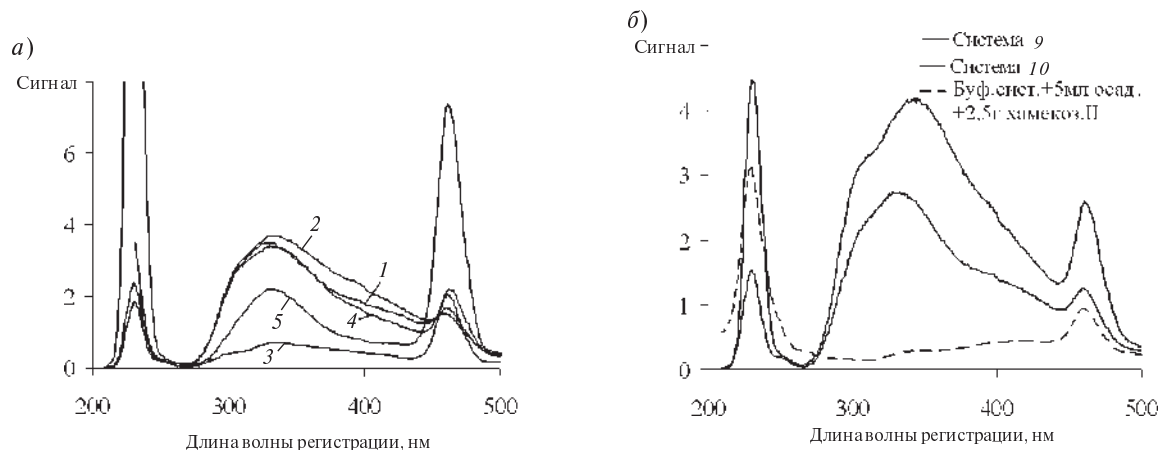


Рис. 3. Спектры флуоресценции систем 1–5 (а), систем 9, 10 и фона (5 мл осадка бытовых сточных вод и 2,5 г Хамакозима II в 350 мл буферной системы) (б); длина волны возбуждения 230 нм

10 на рис. 2), что согласуется с данными капиллярного электрофореза (табл. 2) и спектрофлуориметрии (рис. 3, б): видно, что различие между кривыми для систем 9 и 10 в области флуоресценции белкового типа (при длинах волн 300 и 350 нм) существенно превосходит добавку “фона”.

Полученный эффект от действия больших доз Хамакозима II подтвержден в работе прямым экспериментом по разложению газетной бумаги ферментным препаратом Хамакозим II. Образцы бумаги массой 28–31 мг помещали в пробирки, содержащие по 5 мл раствора Хамакозима II с концентрацией 10 и 40 г/л. Инкубировали двое суток при комнатной температуре и трое суток при температуре 36 °С. В опыте регистрировали потерю массы образцов бумаги за счет их ферментативной деструкции и перехода в растворенное состояние. При концентрации Хамакозима II, равной 10 г/л (1,6 г/г бумаги), потери бумаги составляли 7 мг (из 31 мг), или 22,6 %; при концентрации 40 г/л (6,7 г/г бумаги) — 10 мг (из 30 мг), или 33,3 %. В контрольной пробе (без Хамакозима II) потери отсутствовали.

При расчете отношения дозы ферментного препарата к объему раствора и к массе разлагаемой газетной бумаги в эксперименте по анаэробному разложению отходов получаем: 0,7 г/л р-ра и 0,05 г/г бумаги — для системы 9, 7 г/л р-ра и 5 г/г бумаги — для системы 10. Сравнение этих значений с вышеприведенными результатами

показывает, что количество Хамакозима II, добавленное к системе 10, действительно могло обеспечить разложение существенной доли газетной бумаги.

Ускорение биodeградации среднеразлагаемых отходов на примере листьев проводили только с помощью ультразвука (обоснованной частоты и акустической мощности) в анаэробных (сравнение систем 6 и 7) и аэробных (сравнение систем 11 и 12) условиях. Как видно из рис. 2, в системе 6, обработанной ультразвуком в течение 12,5 часов, происходит заметное выделение биогаза, а в системе 7 биогаз отсутствует. Следует пояснить, что в пробы специально не вводили бактериальную затравку, поскольку основная часть листьев была собрана осенью с газона, и на них должны были находиться факультативные анаэробы. Зафиксированное различие в протекании процесса анаэробного сбраживания обработанных и необработанных ультразвуком листьев подтверждают результаты анализа проб методом капиллярного электрофореза (табл. 2). Видно, что значения концентраций ацетат-иона, суммы ионов ЛЖК для системы 6 заметно выше, чем для системы 7.

Обработка ультразвуком (24,5 ч) системы 12 и последующая длительная выдержка в аэробных условиях (при комнатной температуре) также привела к отличиям ее от системы 11, которые отчетливо видны на спектрах регистрации люминесценции (рис. 4, а, б) и спектрах возбуждения люминесценции (рис. 4, в).

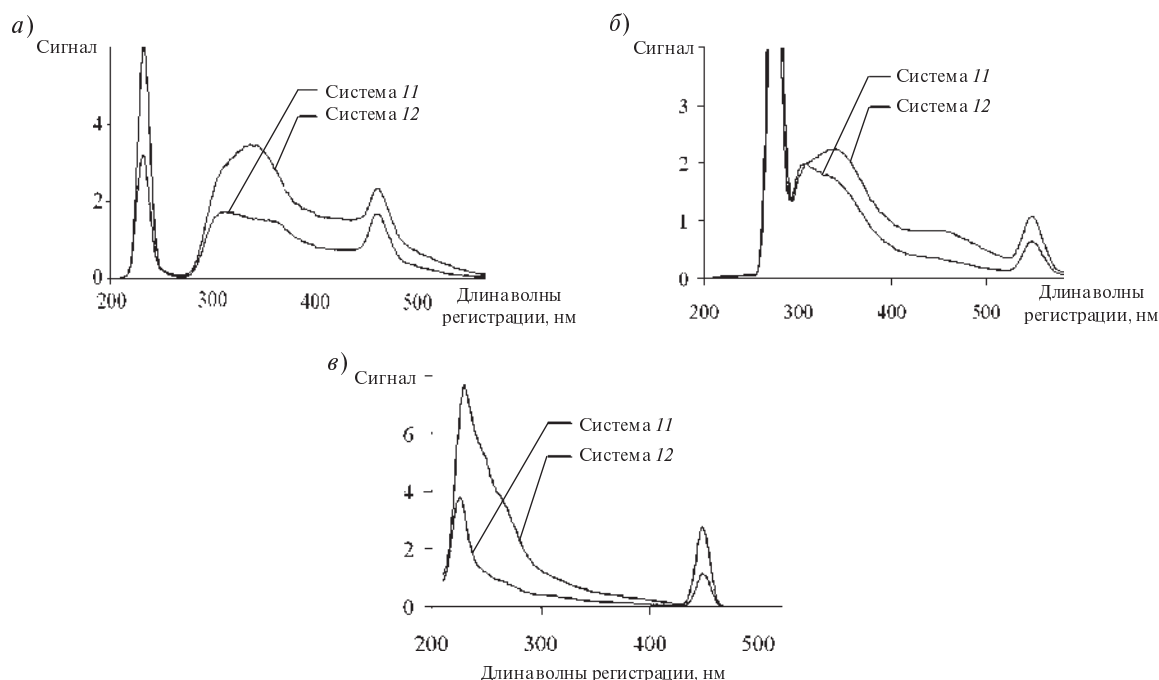


Рис. 4. Спектры регистрации флуоресценции систем 11 и 12 при длинах волн возбуждения 230 нм (а) и 275 нм (б); спектры возбуждения флуоресценции при длине волны регистрации 430 нм (в)

Следует отметить, что воздействие ультразвука (в пределах от 1,5 до 9 ч) без дополнительной инкубации систем с листьями в аэробных или анаэробных условиях не сказывается на спектрах люминесценции.

Для системы 12 было показано повышенное (по сравнению с системой 11) содержание катионов кальция, калия и магния (см. табл. 2). Поскольку на 1 г сухой массы высших растений приходится 5–30 мг кальция, а содержание калия составляет 0,2–1,2 % от сухой массы, магния — 0,02–3,1 % [7], то при полном переходе этих элементов (в виде ионов) из 10 г листьев в 350 мл раствора их концентрация должна составлять соответственно 143–857, 57–343 и 6–886. Результаты, полученные методом капиллярного электрофореза (табл. 2), показывают, что существенная доля этих ионов перешла в раствор, причем для системы 12, обработанной ультразвуком, в большей степени, чем для системы 11.

Для систем с листьями, обработанными и не обработанными ультразвуком и выдержанными в аэробных условиях при комнатной температуре, была отмечена разная динамика изменения pH (табл. 3).

Таким образом, в работе показано, что эффективность биodeградации медленно разлагае-

мых отходов (газетная бумага), сопровождающейся эмиссией биогаза, можно заметно повысить определенными дозами ферментного препарата.

Таблица 3

Значения pH среды в системах с листьями, не обработанными и обработанными ультразвуком, при инкубации в аэробных условиях

Номер эксперимента	Время инкубации в аэробных условиях для обеих систем, ч	Длительность обработки УЗ, ч	Значения pH	
			Листья (без обработки УЗ)	Листья + УЗ
1	0	0	7,9	7,9
	2,5	2,5	7,65	7,45
	21	2,5	6,25	6,10
	26,5	8	6,0	6,0
	43,5	8	5,8	6,1
	48	12,5	5,85	6,15
2	26	9	6,15	6,20
	75	9	5,80	6,20
	194	11	5,50	6,50

рата Хамекозим II, содержащего целлюлазу. Ультразвуковое воздействие с оптимальной для выраженной кавитации частотой и интенсивностью не привело к эмиссии биогаза в системах с газетной бумагой; однако оно существенно повысило эффективность биodeградации средне-разлагаемых отходов (листьев), для которых выход биогаза в анаэробных условиях составил

36 л/кг. Одновременно продемонстрирована информативность таких физико-химических методов анализа, как капиллярный электрофорез и спектрофлуориметрия, которые можно использовать при изучении процессов биodeградации растительного сырья и бытовых отходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-08-12041 офи м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зотов, И.А.** Инновационные направления производства сельскохозяйственной техники на альтернативных источниках энергии [Текст]: матер. науч.-техн. конф. / И.А. Зотов; Ассоциация автомобильных инженеров; МГТУ «МАМИ» // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» [матер. международного научного симпозиума «Автотракторостроение — 2009»]. Кн. 11 — М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2009. — С. 152–154.
2. **Schulz, H.** Biogas-praxis [Текст] / H. Schulz, B. Eder. — Grundlagen — Planung — Anlagenbau — Beispiele — Wirtschaftlichkeit: Verbesserte Auflage 2007. — 238 с.
3. **Яковлев, С.В.** Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. — М.: АСВ, 2002. — 704 с.
4. **Вайсман, Я.И.** Управление метаногенезом на полигонах твердых бытовых отходов [Текст] / Я.И. Вайсман, О.Я. Вайсман, С.В. Максимова. — Пермь, 2003. — 232 с.
5. Ультразвуковая технология [Текст] / Под ред. В.А. Аграната. — М.: Машиностроение, 1974. — 85 с.
6. **Андрианова, М.Ю.** Качественный анализ природных, питьевых и сточных вод спектрофлуориметрическим методом [Текст] / М.Ю. Андрианова, Л.М. Молодкина, Е.В. Хаустова и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2005. № 1 (39). — С. 86–90.
7. **Андрианова, М.Ю.** Возможности капиллярного электрофореза в анализе фильтратов твердых коммунальных отходов [Текст]: материалы науч.-практ. конф. и школы-семинара / М.Ю. Андрианова, Н.Ю. Печеневская, Л.М. Молодкина и др. // Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. — 2006. — С. 7–14.
8. **Полевой, В.В.** Физиология и биохимия растений [Текст] / В.В. Полевой. — М.: Высш шк, 1989. — 464 с.

УДК 621.316

А.В. Бессолицын, О.А. Новоселова, М.Г. Попов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ

При анализе установившихся и переходных режимов работы воздушных линий (ВЛ) электроэнергетических систем требуется их точная математическая модель. В общем случае процессы в линиях с распределенными параметрами описываются системой телеграфных уравнений. Для ее формирования необходимо найти первичные параметры воздушной линии электропередачи (ЛЭП): активные и индуктивные со-

ставляющие собственных и взаимных продольных сопротивлений, а также поперечные емкостные проводимости. При эксплуатации достаточно часто возникает задача расчета характеристик электромагнитного влияния воздушных линий электропередач на линии связи, кабели различного назначения, трубопроводы и т. п., что также требует определения взаимных индуктивностей проводов ВЛ и близкорасполо-

женными протяженными металлическими конструкциями.

Расчет данных величин требует тщательного анализа электрического и магнитного поля, создаваемого проводами ВЛ. Все применяемые при этом методы можно разделить по используемому подходу к расчету характеристик электромагнитного поля на две группы: аналитические и численные. По причине того, что при определении продольных и поперечных параметров ЛЭП следует учитывать геометрические особенности воздушных линий (провес проводов, участки непараллельного прохождения разных линий, пересечение ВЛ между собой и т. п.), аналитические методы не позволяют получить точное решение рассматриваемой задачи из-за существенных допущений, принимаемых при выводе аналитических формул. Применение численных методов дает возможность снизить погрешность решения за счет использования математических моделей, более строго описывающих прохождение проводов ВЛ, структуру подстилающего грунта и различные объекты, которые влияют на распределение электромагнитного поля.

Расчет электромагнитного поля ВЛ

Опыт многих исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, показывает, что для решения задач с бесконечно удаленными границами и резко разномасштабной геометрией, к которым относится и задача расчета магнитного поля воздушной линии, наиболее целесообразно использовать метод конечных элементов, ибо он обеспечивает наибольшую точность при наименьших затратах на разработку алгоритмов и программного обеспечения [1–3].

В основе метода конечных элементов лежит аппроксимирование на рассматриваемой области непрерывной величины, чье распределение следует определить дискретной моделью. Область решения разбивается на совокупность подобластей — конечных элементов, в каждой подобласти искомая величина аппроксимируется своей кусочно-непрерывной функцией от координат. Метод предполагает такое определение значений рассматриваемой величины для совокупности находящихся в области решения точек, чтобы полученное решение наилучшим образом удовлетворяло исходному дифференциальному уравнению и граничным условиям.

В нашей работе при определении параметров магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи, которые проходят над проводящей землей, в качестве рассчитываемой величины выбран векторный магнитный потенциал \vec{A} . Причем этот параметр рассчитывается через определение скалярных величин — проекций векторного потенциала на оси координат. Для разбиения рассчитываемой области на конечные элементы используются простейшие трехмерные фигуры — тетраэдры, узловые точки задаются только в их вершинах (рис. 1).

При этом для аппроксимации распределения искомого потенциала внутри конечного элемента используется линейный полином, записываемый через функции формы N и величины рассчитываемого потенциала в вершинах рассматриваемого конечного элемента. Распределение величины любой из проекций векторного магнитного потенциала внутри e -го конечного элемента описывается матричной формулой (индекс указывающий на координатную ось опущен)

$$\begin{aligned} \dot{A}^{(e)} &= N^{(e)} A^{(e)} = \\ &= \begin{pmatrix} N_i^{(e)} & N_j^{(e)} & N_k^{(e)} & N_l^{(e)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A}_i \\ \dot{A}_j \\ \dot{A}_k \\ \dot{A}_l \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

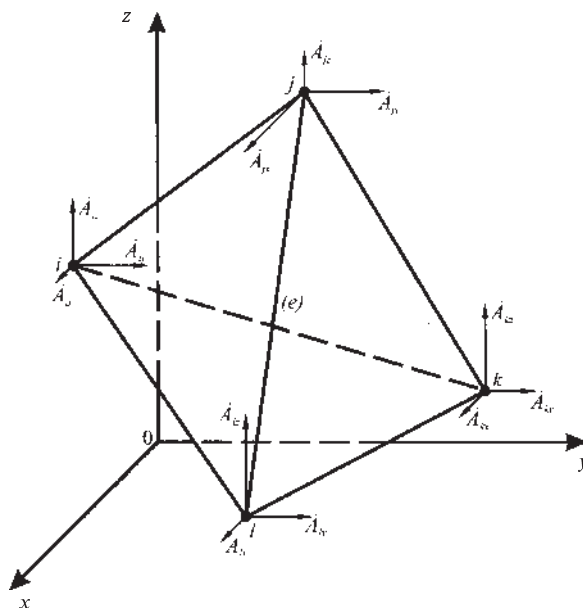


Рис. 1. Трехмерный конечный элемент и значения проекций векторного магнитного потенциала в его узловых точках

Функции формы записываются через координаты вершин рассматриваемого конечного элемента:

$$\mathbf{N}^{(e)} = \begin{pmatrix} N_i^{(e)} & N_j^{(e)} & N_k^{(e)} & N_l^{(e)} \end{pmatrix} = (1 \ x \ y \ z) \begin{pmatrix} 1 & X_i & Y_i & Z_i \\ 1 & X_j & Y_j & Z_j \\ 1 & X_k & Y_k & Z_k \\ 1 & X_l & Y_l & Z_l \end{pmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение, определяющее распределение векторного магнитного потенциала, выводится исходя из закона полного тока, записанного с учетом пренебрежения токами смещения на малых частотах. В результате для проекции векторного магнитного потенциала на ось x может быть получено выражение

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial z^2} \right) - j\omega\gamma_s \dot{A}_x - \gamma_s \frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

где γ_s и μ — соответственно проводимость и магнитная проницаемость среды. Дифференциальные уравнения для проекций векторного магнитного потенциала \dot{A}_y и \dot{A}_z на остальные координатные оси формируются аналогично.

Для формирования системы линейных уравнений относительно узловых значений искомого потенциала целесообразно использовать метод Галёркина. Формально он заключается в приравнивании нулю интеграла по объему конечного элемента $V^{(e)}$ от произведения транспонированной строки функций форм $\mathbf{N}^{(e)}$ на решаемое дифференциальное уравнение (3). После некоторых преобразований выводится следующее линейное уравнение для проекции на ось x векторного магнитного потенциала:

$$\left(\frac{1}{\mu} \mathbf{S}^{(e)} + j\omega \mathbf{T}^{(e)} \right) \mathbf{A}_x^{(e)} = \mathbf{T}^{(e)} \dot{\Phi}_x^{(e)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{S}^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{B}^{(e)} dV$ — матрица, элементы

которой рассчитываются через элементы дополнительной матрицы $\mathbf{B}^{(e)}$, составленной из производных функций формы по координатам;

$$\mathbf{B}^{(e)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial z} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$\mathbf{T}^{(e)} = \gamma_s^{(e)} \int_{V^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{N}^{(e)} dV$ — матрица, элементы

которой вычисляются с использованием интегрирования в естественной системе координат тетраэдра [4]; $\mathbf{A}_x^{(e)T} = (\dot{A}_{ix} \ \dot{A}_{jx} \ \dot{A}_{kx} \ \dot{A}_{lx})$ — вектор, элементами которого являются узловые значения проекции векторного магнитного потенциала на

ось x ; $\dot{\Phi}_x^{(e)T} = \left(\left(\frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial x} \right)_i \ \left(\frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial x} \right)_j \ \left(\frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial x} \right)_k \ \left(\frac{\partial \dot{\Phi}}{\partial x} \right)_l \right)$ —

вектор узловых значений производных по координате x от электрического потенциала в вершинах конечного элемента.

Системы линейных уравнений относительно узловых значений проекций векторного магнитного потенциала на координатные оси y и z формируются аналогично.

Такие уравнения (4), сформированные для каждого отдельного конечного элемента, объединяются в глобальную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно значений искомого потенциала во всех узловых точках рассматриваемой области. Элементы глобальных матриц \mathbf{S} и \mathbf{T} рассчитываются как суммы соответствующих элементов локальных матриц $\mathbf{S}^{(e)}$ и $\mathbf{T}^{(e)}$ для всех конечных элементов области решения. Так как СЛАУ, сформированные для узловых значений трех проекций векторного магнитного потенциала на оси координат, имеют одинаковые матрицы коэффициентов и отличаются только столбцами свободных членов, можно использовать их совместное решение.

Определение продольных параметров линии электропередачи

Для определения продольных собственных и взаимных сопротивлений проводов воздушной линии целесообразно принять предположение о том, что модуль градиента скалярного элект-

рического потенциала одинаков по всей длине проводника, причем направление этого вектора в любой точке любого проводника параллельно оси данного проводника в соответствующем сечении. Для проводов ВЛ, расстояние которых от земли изменяется незначительно по сравнению с длиной рассматриваемых участков, такое предположение не вносит существенных ошибок в расчеты. С учетом данного допущения предлагается следующий алгоритм для определения элементов матрицы продольных сопротивлений участка линии:

1) задается падение напряжения на рассматриваемом участке каждого провода ВЛ;

2) рассчитываются проекции на оси координат градиента скалярного электрического потенциала во всех узловых точках каждого провода;

3) на основе метода конечных элементов формируются и решаются три системы линейных алгебраических уравнений относительно проекций векторного магнитного потенциала на все оси координат, как это описано выше;

4) во всех узловых точках, принадлежащих проводам, по рассчитанным значениям векторного магнитного потенциала и заданным значениям градиента электрического потенциала рассчитывается вектор плотности суммарного тока

$$\dot{\delta} = -j\omega\gamma_s \dot{A} - \gamma_s \text{grad } \phi, \quad (6)$$

где γ_s — проводимость рассматриваемого про-
вода;

5) исходя из рассчитанных плотностей тока определяется средний ток, протекающий вдоль каждого провода системы при заданном в п. 1 алгоритма наборе падений напряжений в проводниках. Например, для m -го проводника

$$\dot{I}_{\text{cpm}} = \frac{\sum (\dot{\delta}_i + \dot{\delta}_j + \dot{\delta}_k + \dot{\delta}_l)}{4L_m} V^{(e)}, \quad (7)$$

где $\dot{\delta}_i, \dot{\delta}_j, \dot{\delta}_k, \dot{\delta}_l$ — вычисленные в предыдущем пункте проекции плотности тока на ось провода в данном сечении для четырех узловых точек e -го конечного элемента; L_m — длина рассматриваемого m -го проводника на рассчитываемом участке. Суммирование в числителе формулы ведется по всем e -ым конечным элементам, принадлежащим проводнику m ;

б) если у рассматриваемой ВЛ имеется n проводов, то пункты алгоритма с первого по пятый выполняются n раз с разными линейнонезави-

симиыми комбинациями падений напряжений в проводниках, задаваемых в первом пункте. По результатам расчетов для первого проводника составляется система из n уравнений, каждое из которых соответствует одному из исходных наборов напряжений, а неизвестными выступают собственное и взаимные сопротивления первого проводника:

[illegible]

где верхний индекс указывает на номер исходного набора падений напряжений;

7) решением данной системы уравнений определяются все собственные и взаимные продольные параметры рассматриваемого участка первого провода. Для второго провода может быть составлена аналогичная система уравнений размерности n , однако, поскольку из расчета параметров первого проводника уже известно Z_{12} (равное Z_{21}), размерность системы уравнений можно сократить на единицу. После расчета параметров второго проводника аналогичные вычисления выполняются для всех остальных проводников системы, причем для каждого следующего провода необходимо решать систему уравнений с размерностью на единицу меньше, чем для предыдущего. После решения n систем линейных уравнений с уменьшающейся на каждом шаге размерностью будут найдены все элементы матрицы \mathbf{Z} сопротивлений проводов ВЛ.

Погрешности предложенной численной методики

Оценить погрешность предлагаемого численного метода с помощью сравнения получаемых результатов с результатами расчета по общепринятым аналитическим методикам удастся только в простейшем случае прямолинейных проводов, расположенных параллельно земле. Это связано с ограниченностью аналитического подхода, не позволяющего учитывать провес проводов и их непараллельное следование. Для учета отличий в расчете как активной, так и реактивной составляющих продольных сопротивлений ВЛ погрешность находится по формуле

$$\delta_Z = \frac{|\dot{Z}_q - \dot{Z}_a|}{|\dot{Z}_a|} 100 \%, \quad (9)$$

где \dot{Z}_q и \dot{Z}_a — соответственно, результаты расчета по предлагаемому численному и аналитическому, основанному на формулах Карсона [5], методам.

Погрешность методики расчета параметров воздушной линии, основанной на методе конечных элементов, прежде всего определяется количеством узловых точек, заданных в области решения. Относительная погрешность расчета продольных сопротивлений ВЛ тем меньше, чем большее число узлов задано в рассматриваемой области. Второй важный фактор, влияющий на точность численного расчета параметров ВЛ, — размер области, в которой рассчитывается магнитное поле. Его влияние на погрешность расче-

та собственных и взаимных сопротивлений ВЛ зависит от частоты (рис. 2), что связано с различной глубиной проникновения электромагнитного поля в землю.

Если радиус расчетной области принимать больше чем 50 км, то погрешность расчетов будет незначительно зависеть от частоты в достаточно широком диапазоне изменения удельного сопротивления грунта (рис. 3).

Малая величина погрешности расчета как собственных, так и взаимных сопротивлений проводов ВЛ в широком диапазоне частот позволяет сделать вывод о высокой точности предлагаемого численного подхода к определению продольных параметров воздушных линий электропередач.

Разработанные методики и соответствующее программное обеспечение могут использоваться при решении научно-исследовательских и экс-

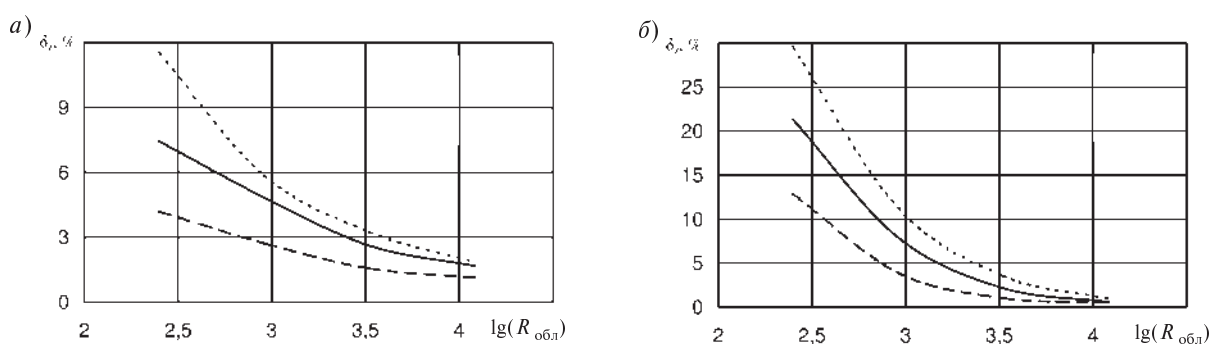


Рис. 2. Зависимости погрешности (а — для собственного сопротивления; б — для взаимного сопротивления) от логарифма радиуса расчетной области, выраженного в метрах, при разных частотах:
- - - $f = 50$ Гц; — $f = 200$ Гц; — — $f = 1000$ Гц

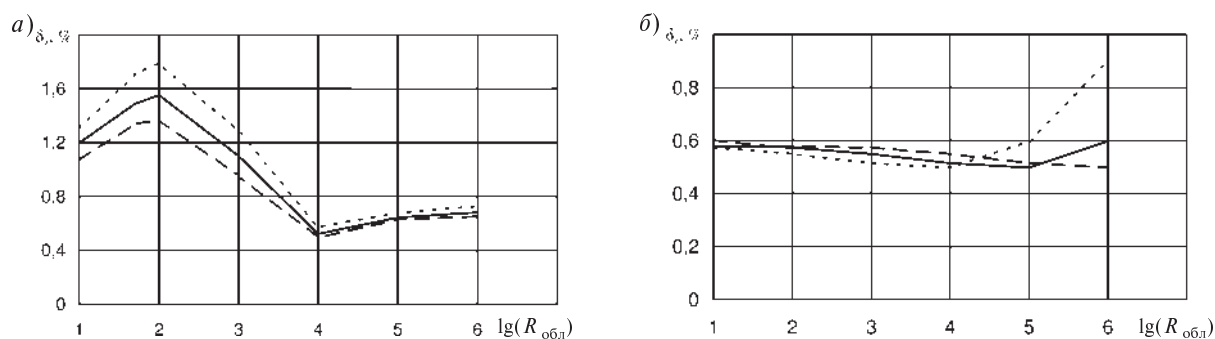


Рис. 3. Зависимость процентной погрешности (а — для собственного сопротивления; б — для взаимного сопротивления) от логарифма частоты, выраженной в герцах, при разном удельном сопротивлении земли:
- - - $\rho_3 = 10$ Ом м; — $\rho_3 = 100$ Ом м; — — $\rho_3 = 1000$ Ом м



платационных задач, связанных с точным расчетом электромагнитных параметров воздушных линий электропередач, в их числе: математическое моделирование ВЛ для расчета установившихся режимов; расчет наведенного напряжения на протяженных конструкциях; определение характеристик высокочастотной связи по проводам линии; исследование волновых процессов, происходящих в ВЛ; определение места повреждения; исследование способов повышения пропускной способности ЛЭП.

Основные результаты следующие:

1. Разработана методика расчета создаваемого воздушными линиями электропередач трехмерного электромагнитного поля, основанная на методе конечных элементов, которая позволяет учитывать провисание проводов, поворот трасс

ВЛ, сложную структуру подстилающего грунта и наличие в непосредственной близости от линии объектов, искажающих картину поля.

2. Разработан способ расчета продольных параметров ВЛ, основанный на численном расчете создаваемого ими трехмерного магнитного поля. Предложенный подход позволяет отказаться от упрощений, принимаемых при расчете параметров линий общепринятыми аналитическими методами.

3. Выполнена оценка влияния на точность численного расчета параметров ВЛ различных факторов, связанных как с условиями решаемой задачи, так и с особенностями реализации предлагаемой численной методики. Установлена взаимосвязь между размерами расчетной области и погрешностью определения продольных сопротивлений проводов ВЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатников, М.В. Определение первичных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередачи на основе расчета электромагнитного поля [Текст] / М.В. Булатников, К.П. Кадомская, С.А. Кандаков [и др.] // Электричество.— 2006.— № 5.— С. 17–24.

2. Дьяков, А.Ф. Методические вопросы расчета зависимости продольных параметров кабельных линий от частоты [Текст] / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Д.А. Матвеев [и др.] // Вестник МЭИ.— 2003.— № 4.— С. 17–25.

3. Christoforidis, G.C. Inductive interference on pipelines buried in multilayer soil due to magnetic fields

from nearby faulted power lines [Текст] / G.C. Christoforidis, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. 2005.— Vol. 47, № 2.— P. 254–262.

4. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков [Текст]: пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари.— М.: Мир, 1986.— С. 229.

5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11: Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ [Текст].— М.: Энергия, 1979.

УДК 621.316:621.314

А.В. Бессолицын, М.Г. Попов, Е.Н. Хорошина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ И ВЗАИМНЫХ ЕМКОСТЕЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

Поперечные сопротивления воздушных линий (ВЛ) электропередач имеют две составляющие — активную, обусловленную несовершенством изоляции между проводами линии и

землей, а также токами короны на ВЛ высокого напряжения, и составляющую, которая связана с емкостями, образованными противостоящими друг другу проводами ВЛ и землей. Из-за высо-

кого совершенства изоляции воздушных линий и конструкций фаз высоковольтных ВЛ, минимизирующего вероятность возникновения короны, активной составляющей поперечного сопротивления в большинстве случаев пренебрегают [1]. По этой причине при моделировании ВЛ в качестве поперечных параметров рассматриваются только собственные и взаимные емкости проводов линии, что делает весьма актуальной разработку методики их точного расчета.

Численный расчет электрического поля

Емкостная составляющая поперечного сопротивления определяется электрическим полем, которое создается проводами линий электропередач, находящимися под высоким напряжением, и влиянием проводящей земли. Электрическое поле на частоте 50 Гц может рассматриваться как квазистатическое, поэтому распределение электрического потенциала описывается уравнением Пуассона

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}. \quad (1)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче отсутствуют свободные заряды, данное дифференциальное уравнение упрощается до уравнения Лапласа с нулем в правой части. Решение этого дифференциального уравнения может быть выполнено методом конечных элементов (МКЭ). На первом этапе реализации данного метода необходимо разбить расчетную область на совокупность подобластей — конечных элементов, в каждом из которых распределение скалярного потенциала электрического поля описывает аппроксимирующими функциями простейшего вида [2]. При решении рассматриваемой задачи целесообразно использовать конечные элементы в виде простейшей трехмерной фигуры — тетраэдра. Цель расчета по МКЭ — определение величин рассматриваемого потенциала в узловых точках области решения. Если применять наиболее простой подход и задавать узловые точки только в вершинах тетраэдральных конечных элементов, то в качестве аппроксимирующей функции, которая моделирует зависимость скалярного электрического потенциала от координат внутри одной минимальной подобласти, можно использовать только линейный полином вида

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z, \quad (2)$$

Для каждого отдельного конечного элемента в данное выражение подставляются свои постоянные коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$. Поскольку искомыми величинами являются узловые значения потенциала, аппроксимирующие полиномы целесообразно записывать относительно них с помощью так называемых функций формы N . Например, для конечного элемента с номером e , вершинами которого являются узловые точки i, j, k, l :

$$\phi^{(e)} = \begin{pmatrix} N_i^{(e)} & N_j^{(e)} & N_k^{(e)} & N_l^{(e)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_k \\ \phi_l \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Для упрощения записи целесообразно ввести вектор-строку функций формы $\mathbf{N}^{(e)}$, которые определяются через координаты вершин $(X_i, Y_i, Z_i), (X_j, Y_j, Z_j), (X_k, Y_k, Z_k), (X_l, Y_l, Z_l)$ рассматриваемого конечного элемента, —

$$\mathbf{N}^{(e)} = \begin{pmatrix} N_i^{(e)} & N_j^{(e)} & N_k^{(e)} & N_l^{(e)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_i & Y_i & Z_i \\ 1 & X_j & Y_j & Z_j \\ 1 & X_k & Y_k & Z_k \\ 1 & X_l & Y_l & Z_l \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & x & y & z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

и вектор-столбец $\boldsymbol{\phi}^{(e)T}$, содержащий значения скалярного электрического потенциала в вершинах i, j, k, l конечного элемента с номером e ,

$$\boldsymbol{\phi}^{(e)T} = \begin{pmatrix} \phi_i & \phi_j & \phi_k & \phi_l \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Если рассмотреть решение дифференциального уравнения (1) на области, состоящей из одного конечного элемента e объемом $V^{(e)}$, то использование метода Галёркина [2] позволяет свести дифференциальное уравнение Лапласа к интегро-дифференциальному уравнению

$$\int_{V^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \left(\frac{\partial^2 \phi^{(e)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi^{(e)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi^{(e)}}{\partial z^2} \right) dV = 0. \quad (6)$$

Исключив вторые производные по координатам и подставив в уравнение формулу (3), после некоторых преобразований можно получить следующую систему линейных алгебраических

уравнений (СЛАУ) относительно узловых потенциалов e -го конечного элемента:

$$\mathbf{S}^{(e)} \boldsymbol{\varphi}^{(e)} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Элементы матрицы $\mathbf{S}^{(e)}$ определяются через координаты вершин e -го конечного элемента и не зависят от граничных условий [3]. Данное уравнение сформировано только для одного конечного элемента. На его основе следует построить глобальную систему уравнений относительно потенциалов во всех узловых точках рассматриваемой области. Элементы глобальной матрицы \mathbf{S} рассчитываются как суммы соответствующих элементов локальных матриц $\mathbf{S}^{(e)}$ для всех конечных элементов области решения. После задания граничных условий путем исключения из глобальной матрицы \mathbf{S} строк и столбцов, соответствующих узлам с известными потенциалами, решение полученной системы уравнений позволит определить величины потенциалов во всех узловых точках области решения. В качестве граничных условий используются потенциалы тех узлов на поверхности проводов, где известны напряжения, а также принимаемые равными нулю потенциалы узлов на поверхности земли и по границе расчетной области.

Определение собственных и взаимных емкостей ВЛ

Для расчета собственных и взаимных емкостей проводов ВЛ целесообразно использовать вторую группу формул Максвелла, которая представляет собой систему линейных уравнений, связывающих потенциалы проводов и их заряды:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \dots + \beta_{1i}\varphi_i + \dots + \beta_{1j}\varphi_j + \dots + \beta_{1n}\varphi_n; \\ \dots\dots\dots \\ q_i = \beta_{i1}\varphi_1 + \dots + \beta_{ii}\varphi_i + \dots + \beta_{ij}\varphi_j + \dots + \beta_{in}\varphi_n; \\ \dots\dots\dots \\ q_j = \beta_{j1}\varphi_1 + \dots + \beta_{ji}\varphi_i + \dots + \beta_{jj}\varphi_j + \dots + \beta_{jn}\varphi_n; \\ \dots\dots\dots \\ q_n = \beta_{n1}\varphi_1 + \dots + \beta_{ni}\varphi_i + \dots + \beta_{nj}\varphi_j + \dots + \beta_{nn}\varphi_n. \end{array} \right. \quad (8)$$

Мы предлагаем потенциальные коэффициенты β для проводов рассматриваемой ВЛ находить по следующему алгоритму:

1) предполагается, что один из проводов (например i -й) имеет потенциал относительно зем-

ли равный единице, а все другие провода и земля — равный нулю;

2) методом конечных элементов следует рассчитать распределение скалярного электрического потенциала, сформировав и решив глобальное матричное уравнение относительно узловых значений этого потенциала с учетом граничных условий, заданных в первом пункте алгоритма;

3) затем необходимо найти проекции на оси координат вектора напряженности электрического поля в конечных элементах, граничащих с поверхностью проводников, по формуле

$$= - \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial z} & \frac{\partial N_l^{(e)}}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\Phi}_i \\ \dot{\Phi}_j \\ \dot{\Phi}_k \\ \dot{\Phi}_l \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $\dot{\phi}_i, \dot{\phi}_j, \dot{\phi}_k, \dot{\phi}_l$ — величины потенциалов в вершинах e -го конечного элемента;

4) для каждого провода следует рассчитать его заряд на рассматриваемом участке ВЛ. После выполнения дискретизации расчетной области на трехмерные конечные элементы боковая поверхность каждого провода формируется совокупностью граней конечных элементов. Причем с поверхностью провода может совпадать не более чем одна грань конечного элемента. Вектор напряженности электрического поля перпендикулярен границе раздела проводника и диэлектрика, а потому для любого провода поток вектора напряженности электрического поля через его боковую поверхность равен сумме произведений площадей граней конечных элементов, образующих эту поверхность, на рассчитанную в предыдущем пункте величину напряженности электрического поля в данных конечных элементах:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \sum \sqrt{E_x^{(e)2} + E_y^{(e)2} + E_z^{(e)2}} S_g^{(e)}, \quad (10)$$

где S_i — площадь боковой поверхности i -го про-
вода; $S_g^{(e)}$ — площадь грани e -го конечного эле-

мента, входящей в боковую поверхность i -го провода; $E_x^{(e)}$, $E_y^{(e)}$, $E_z^{(e)}$ — рассчитанные по формуле (9) проекции на оси координат вектора напряженности электрического поля в e -м конечном элементе. При суммировании в формуле (10) индекс e принимает значения номеров всех конечных элементов, одна из граней которых входит в боковую поверхность i -го провода.

Если пренебречь потоком вектора напряженности электрического поля через торцевые сечения рассматриваемого участка провода, так как их площадь на несколько порядков меньше площади боковой поверхности провода, то согласно закону Гаусса для электрического поля в интегральной форме заряд рассматриваемого участка провода равен

$$q_i = \varepsilon \oint_{S_i} \vec{E} d\vec{S}; \quad (11)$$

5) подставляя принятые на первом этапе алгоритма потенциалы проводов ($\varphi_i = 1$, $\varphi_j = 0$ при $j = 1, \dots, n$, кроме $j = i$) и рассчитанные на предыдущем этапе заряды (q_k при $k = 1, \dots, n$) в систему уравнений (8), получим

$$\begin{cases} q_1 = \beta_{1i}, \\ \dots\dots\dots \\ q_i = \beta_{ii}, \\ \dots\dots\dots \\ q_j = \beta_{ji}, \\ \dots\dots\dots \\ q_n = \beta_{ni}, \end{cases} \quad (12)$$

т. е. рассчитанные заряды, содержащиеся на рассматриваемом участке проводов, численно равны собственным и взаимным емкостным коэффициентам участка i -го провода, потенциал которого был принят равным единице при нулевых потенциалах остальных проводов и земли.

После выполнения расчетов по данному алгоритму емкостных коэффициентов для всех проводов рассматриваемой системы будут получены все элементы матрицы β емкостных коэффициентов для рассматриваемого участка ВЛ. После этого собственные частичные емкости проводов рассчитываются как суммы элементов соответствующих строк матрицы β . Например, для i -го провода собственная емкость равна

$$C_{ii} = \sum_{k=1}^n \beta_{ik}. \quad (13)$$

Взаимные частичные емкости равны взятым с обратным знаком соответствующим элементам матрицы емкостных коэффициентов β :

$$C_{ij} = -\beta_{ij}. \quad (14)$$

Если ВЛ, поперечные параметры которой рассчитываются, имеет n проводов, то при использовании предлагаемого алгоритма требуется n раз рассчитать распределение скалярного электрического потенциала в пространстве вокруг рассматриваемой линии электропередачи. Однако из-за того, что рассчитываемые случаи отличаются друг от друга только граничными условиями (величинами потенциалов на поверхности проводов), матрицы коэффициентов решаемых СЛАУ во всех n вариантах одинаковы. Это позволяет использовать совместное решение систем линейных уравнений при нахождении распределения скалярного электрического потенциала.

Точность предлагаемой численной методики расчета емкостных параметров воздушной линии зависит главным образом от следующих факторов: размера области, в которой рассчитывается электростатическое поле; числа узловых точек в расчетной области; числа узловых точек на поверхности проводов.

Чем больше размер расчетной области, тем точнее моделируется отсутствие границ распространению электрического поля над поверхностью проводящей земли. Число узловых точек в расчетной области определяет точность аппроксимации распределения скалярного электрического потенциала. При увеличении количества узлов в области решения погрешность аппроксимации электрического поля снижается, однако возрастает размерность системы линейных уравнений, сформированной относительно узловых значений скалярного электрического потенциала, что приводит к повышению трудоемкости расчетов.

По причине того, что в основе предлагаемого алгоритма лежит расчет заряда проводов через интегрирование потока вектора напряженности электрического поля по их поверхности, больше всего на точность расчета собственных и взаимных емкостей ВЛ влияет число узловых точек, расположенных на поверхности проводов воздушной линии. Увеличение числа узлов на гра-



нице провода приводит к более точному моделированию формы его поверхности. Следствием же сокращения размеров конечных элементов, прилегающих к проводу, является более точный расчет напряженности электрического поля в непосредственной близости от рассматриваемого проводника.

Рассмотрен способ использования метода конечных элементов для численного расчета трехмерного электрического поля воздушных

линий электропередач, находящихся под высоким напряжением.

Предложен алгоритм определения собственных и взаимных емкостей проводов ВЛ, основанный на численном расчете создаваемого ими электростатического поля.

Данную методику расчета поперечных параметров ВЛ целесообразно использовать при больших стрелах провеса проводов или наличии в непосредственной близости от ЛЭП объектов, искажающих картину поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов, Ю.Г. Учет емкости линий электропередач в расчетах энергораспределения и потерь энергии в электрических сетях [Текст] / Ю.Г. Кононов, В.М. Пейзель // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Технические науки.— 2008.— № 3. — С. 63–69.

2. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст]: пер. с англ. / Л. Сегерлинд.— М.: Мир, 1979.— 392 с., ил.

3. Сильвестер, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков [Текст]: пер. с англ. / П. Сильвестер, Р. Феррари.— М.: Мир, 1986.— 229 с., ил.

УДК 621.341.572

А.Н. Головин

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В РЕЗОНАНСНОМ ИНВЕРТОРЕ ТОКА

Постановка задачи и цель работы

В научных публикациях, посвященных вопросам повышения эффективности мощных преобразователей электрической энергии, и в практических разработках этих устройств четко прослеживается тенденция все более широкого применения резонансных инверторов, работающих в режимах мягкого переключения (soft switching) силовых транзисторов [1–4], когда напряжение на транзисторе или ток через него в моменты переключений близки к нулю. Этим обеспечивается минимизация потерь мощности и, следовательно, более высокие КПД и частота коммутации, чем в режиме класса D с прямоугольной формой напряжения и тока на транзисторном ключе. Новое, перспективное направление исследований в этой области — разработка

так называемых распределенных систем питания переменным током высокой частоты (High Frequency Alternating Current Power Distributed Systems) [5–7]. Основу таких систем также составляют резонансные инверторы, параллельно работающие на общую высокочастотную и высоковольтную шину, напряжение которой подвергается преобразованию с помощью местных (локальных) AC-DC конверторов, питающих оконечные нагрузки. Актуальна также научно-техническая проблема создания высокоэффективных сверхмощных транзисторных резонансных инверторов с электронным регулированием мощности электродвигателей транспортных средств [8].

Одно из главных условий рационального проектирования и надежного использования

резонансных инверторов — достоверный расчет потерь мощности в них и обоснованная оценка возможностей конкретного типа IGBT или MOSFET транзисторов для требуемого уровня выходной мощности и частоты переключения. В преобразовательной технике известны два основных типа резонансных инверторов: напряжения и тока. Наиболее широкое применение на практике получили резонансные инверторы напряжения.

Однако, обладая более сложной топологией, инверторы тока в силу определенных свойств имеют ряд следующих преимуществ над инверторами напряжения:

скачок напряжения при переключении тока в инверторе напряжения приблизительно равен напряжению источника питания, а в инверторе тока он в режиме максимальной мощности в десятки или сотни раз меньше и равен остаточному напряжению на транзисторе в стационарном режиме. В результате потери на фронтах (основные на достаточно высоких рабочих частотах колебаний) во много раз снижаются, улучшаются на 1–2 порядка частотные свойства инвертора тока по сравнению с инвертором напряжения, существенно снижаются потери в транзисторах и, соответственно, повышается КПД;

в инверторе тока коммутируется почти постоянный ток дросселя, т. е. дроссель обладает значительным фильтрующим действием для тока высокой частоты, что позволяет уменьшить фильтрующую емкость источника питания;

амплитуда высокочастотного напряжения не зависит от нагрузки, она в 1,57 раза выше, чем эквивалентное напряжение источника питания, в то время как в инверторе напряжения эта амплитуда зависит от добротности нагрузки.

Несмотря на указанные преимущества инверторов тока, их расчет даже для классических топологий недостаточно полно освещен в специальной литературе. Цель данной статьи — восполнить пробел в части разработки инженерной методики расчета потерь мощности в мостовом инверторе тока и оценки частотных свойств современных транзисторных ключей типа IGBT и MOSFET.

Принцип работы и временные диаграммы инвертора тока

Будем считать оптимальным режим с минимальными коммутационными потерями. Исследуемая схема приведена на рис. 1. В режиме максимальной мощности обеспечивается полное использование генератора (преобразователя) по напряжению питания ($U_{\max} = 1,57 E_0$; рис. 2, в, г). Напряжение $u_1 = U_{\max} \sin(\omega t + \theta)$ на контуре L_k , C_k , R_n имеет синусоидальную форму (рис. 2, в), а напряжение u_0 на входе моста М в результате переключений моста имеет форму, показанную на рис. 2, б.

В исходном состоянии ($t \leq t_1$ рис. 2, а–д) напряжением $u_{61,3}$ (рис. 2, а) открыты транзисторы T_1 и T_3 , при этом $i_1 = i_{12}$ (см. рис. 1). Переключение моста М целесообразно начать с включения

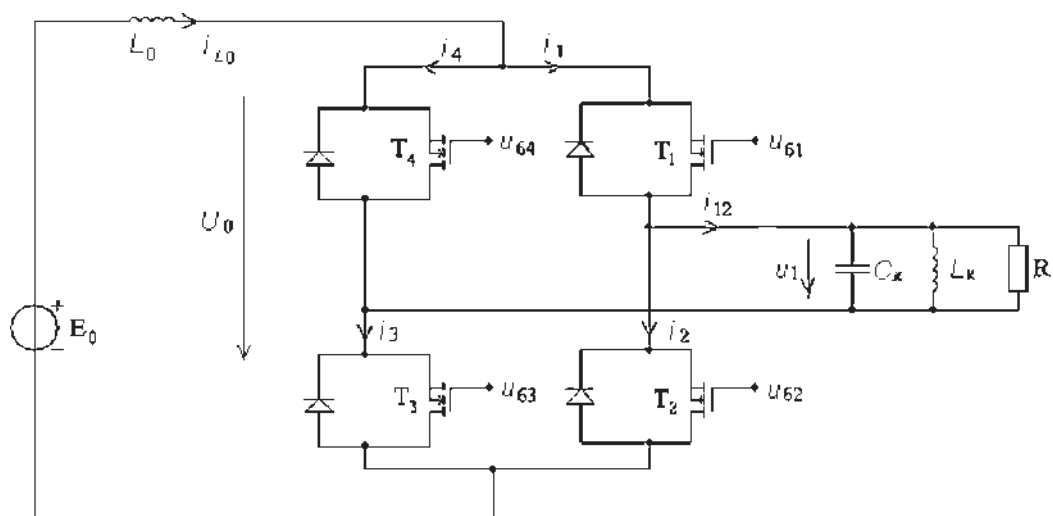


Рис. 1. Мостовая схема резонансного инвертора тока

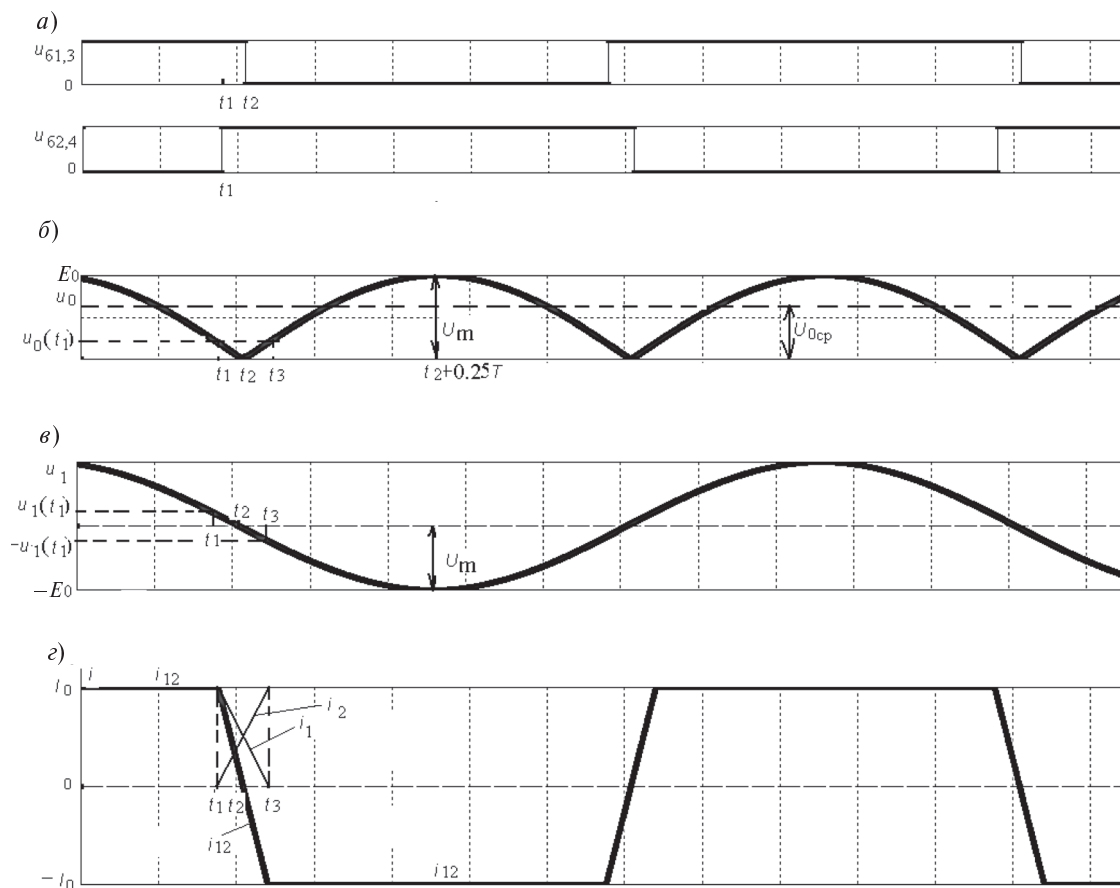


Рис. 2. Временные диаграммы инвертора

транзисторов T_2, T_4 напряжением $u_{62,4}$ (рис. 2, а). Это включение следует осуществить в момент $t = t_1$, когда u_1 и $u_0 \gg u_1$ (рис. 2, в, г) положительны и достаточно малы по значению:

$$u_1(t_1) = U_{\max} \sin[\omega(t_2 - t_1)] = U_{\max} \sin(\omega t_{\text{опер}}); \quad t_{\text{опер}} = t_2 - t_1, \quad (1)$$

т. е. с некоторым опережением $t_{\text{опер}} = t_2 - t_1$ относительно нулевой точки напряжения u_1 .

На интервале времени $t_1 \leq t \leq t_2$ напряжение $u_1 \gg u_0$ приложено к открытым транзисторам T_2, T_4 в прямом направлении, вследствие чего через них начинает течь ток i_2 (см. рис. 2). При этом $I_{L0} = I_0 = \text{const}$, ток $i_1 = I_{L0} - i_2$ открытых транзисторов T_1 и T_3 убывает по мере возрастания i_2 . К моменту $t = t_2$ будет $i_1 = i_2 = 0,5 I_{L0} = 0,5 I_0$, $i_{12} = i_1 - i_2 = 0$. В этот момент напряжением $u_{61,3}$ (рис. 2, а) диагональ T_1, T_3 запирается, и ток i_1 продолжает уменьшаться при $t > t_2$, когда напряжение u_1 приложено к этим транзисторам уже в прямом направлении. Ток $i_2 = I_0 - i_1$ увеличи-

вается, и в момент $t = t_3$ получается $i_1 = 0$, $i_2 = I_0$. На этом процесс переключения тока i_{12} мостом М завершается. Во избежание излишних потерь в транзисторах T_2 и T_4 приложенное к ним при их включении напряжение $u_1(t_1)$ (рис. 2, в) и напряжение u_1 при $t_1 \leq t \leq t_3$, а также соответствующее время опережения $t_{\text{опер}} = t_2 - t_1$ должны быть как можно меньше, но достаточны для обеспечения процесса переключения.

Расчетная скорость возрастания тока i_2 на интервале $t_2 \leq t \leq t_3$ должна быть выше, чем скорость спада тока i_1 . В противном случае может оказаться $i_1 + i_2 < I_0$, что вызовет резкий скачок напряжения u_0 под действием ЭДС самоиндукции индуктивности L_0 .

Практически в (1) можно принять

$$t_{\text{опер}} = t_2 - t_1 = \gamma t_{\text{вкл}}, \quad \gamma = 2-3. \quad (2)$$

Здесь $t_{\text{вкл}}$ — время включения транзистора при номинальном напряжении и росте тока i_1 от нуля до $0,5 I_0$:

$$t_{\text{вкл}} = 0,5 I_0 / S_{\text{вкл}};$$

$$S_{\text{вкл}} = i_{\text{ном}} / t_{\text{вклном}}; \quad t_1 \leq t \leq t_2, \quad (3)$$

где $i_{\text{ном}}$ и $t_{\text{вклном}}$ — номинальные паспортные значения тока и времени включения транзистора.

Коэффициент запаса γ следует выбирать больше единицы, поскольку включение транзисторов T_2 и T_4 происходит при малых напряжениях на них $u_1(t)$, $t_1 \leq t \leq t_2$ (рис. 2, з), причем это напряжение делится пополам между последовательно соединенными транзисторами T_2, T_4 .

Если контур нагрузки L_k, C_k, R_n настроен в резонанс на частоту преобразования ω , то первая гармоника тока i_{12} , подводимого к контуру, должна быть синфазна с напряжением u_1 (рис. 2, в) на нем. При принятой линейной аппроксимации тока i_{12} (рис. 2, г) это означает, что моменты $t_2 + nT/2$ прохождения через нуль напряжения $u_1(t)$ и тока $i_{12}(t)$ совпадают.

При фиксированном интервале переключения $t_1 \leq t \leq t_3$ потери коммутации минимальны, поскольку напряжение $u_1(t_1)$ (рис. 2, б) мало по абсолютному значению. Сдвиг этого интервала времени по оси t ведет к увеличению одного из граничных напряжений и увеличению потерь, так как они пропорциональны квадрату напряжения.

Существенно, что в нормальном режиме в работе генератора не участвуют обратные диоды транзисторов. Это снижает коммутационные потери и улучшает частотные свойства генератора.

Основные уравнения

Для определения выходной мощности необходимо определить первую гармонику I_{m1} тока i_{12} (рис. 2, з), подводимого к контуру нагрузки L_k, C_k, R_n с амплитудой напряжения $U_m = U_{m1} = E_0$ (рис. 2, в). Первая гармоника периодического колебания трапецеидальной формы выражается известной формулой, которая применительно к i_{12} с учетом (1) и (2) имеет вид

$$I_{\text{maxl}} = \frac{4I_0}{\pi} \frac{\sin(\omega\gamma t_{\text{вкл}})}{\omega\gamma t_{\text{вкл}}} \cong \frac{4I_0}{\pi} \left[1 - \frac{(\omega\gamma t_{\text{вкл}})^2}{6} \right], \quad (4)$$

где приближенное равенство получено путем разложения синусоидальной функции в ряд и дает высокую точность вычисления, поскольку на практике фазовый угол $\omega\gamma t_{\text{вкл}}$ обычно значительно меньше единицы (одного радиана). Без учета поправочного члена в квадратных скобках фор-

мула (4) дает значение первой гармоники для прямоугольных колебаний (меандров), значит, фронты трапецеидальных колебаний i_{12} , если они относительно малы, весьма слабо влияют на значение амплитуды первой гармоники I_{maxl} .

Таким образом, мощность в нагрузке (настроенный на резонанс контур) можно найти по формуле

$$P_n = \frac{1}{2} U_{\text{maxl}} I_{\text{maxl}} = \frac{1}{2} E_0 \frac{4I_0}{\pi} \frac{\sin(\omega\gamma t_{\text{вкл}})}{\omega\gamma t_{\text{вкл}}} \cong \frac{2E_0 I_0}{\pi} \left[1 - \frac{(\omega\gamma t_{\text{вкл}})^2}{6} \right]. \quad (5)$$

Потери энергии при включении двух последовательно соединенных транзисторов T_2, T_4 на участке $t_1 - t_2$ (рис. 2, з) при $\gamma t_{\text{вкл}} = t_2 - t_1$ можно оценить согласно рис. 2, з и с учетом (1), (2) так:

$$i_{12}(t) = I_0 \frac{\tau}{t_2 - t_1} = I_0 \frac{\tau}{\gamma t_{\text{вкл}}};$$

$$u_1(t) = E_0 \sin(\omega t) \approx E_0 \omega t;$$

$$\tau = t_2 - t_1, \quad \gamma t_{\text{вкл}} \geq \tau \geq 0; \quad (6)$$

$$W_{\text{вкл}} = \int_0^{\gamma t_{\text{вкл}}} i_{12}(\tau) u_1(\tau) d\tau =$$

$$= \frac{E_0 I_0 \omega}{\gamma t_{\text{вкл}}} \int_0^{\gamma t_{\text{вкл}}} \tau^2 d\tau = E_0 I_0 \frac{(\gamma t_{\text{вкл}})^2}{3} \omega. \quad (7)$$

Для принятой линейной симметричной аппроксимации тока $i_{12}(t)$ и напряжения $u_1(t)$ потери энергии $W_{\text{выкл}}$ при выключении пары транзисторов T_1, T_3 на участке $t_2 \leq t \leq t_3$ приближенно равны $W_{\text{вкл}}$ по (7).

Таким образом, полную мощность коммутационных потерь четырех транзисторов на частоте $f_n = \omega/2\pi$ можно оценить по формуле

$$P_{\text{ком}} = (W_{\text{вкл}} + W_{\text{выкл}}) f_n =$$

$$= \frac{4\pi}{3} E_0 I_0 (\gamma t_{\text{вкл}})^2 f_n^2. \quad (8)$$

Коммутационные потери влияют на КПД согласно (5) и (8):

$$\Delta \eta_{\text{ком}} \cong \frac{P_{\text{ком}}}{P_n} \cong \frac{2\pi^2}{3} (\gamma t_{\text{вкл}})^2 f_n^2. \quad (9)$$

Эти потери очень малы на относительно низких частотах f_n и резко возрастают с увеличени-



ем $f_{\text{п}}$. Если ограничить динамические потери на уровне не более 1 %, то предельная частота

$$f_{\text{п пред}} = \sqrt{\frac{0,03}{2\pi^2}} \frac{1}{\gamma t_{\text{вкл}}} = \frac{0,04}{\gamma t_{\text{вкл}}}. \quad (10)$$

Например, если согласно (3) при $t_{\text{вкл}} = 0,15$ мкс (для тока $0,5i_{\text{ном}} = 0,5I_0$) $\gamma = 2$, то получим $f_{\text{п пред}} = 133$ кГц. На частоте $f_{\text{п}} = 20$ кГц эти потери уменьшаются в 40 раз и составят 0,025 %. Однако при этом на относительно низких частотах необходимо, чтобы $u_1(t_1)$ (см. рис. 2, б) было значительно больше напряжения $u_{\text{ост кл}}$ в установившемся ключевом режиме. В данном случае, при $f_{\text{п}} = 20$ кГц, $U_m = 500$ В, $u_{\text{ост кл}} = 4$ В, согласно (1) на один из двух последовательно соединенных транзисторов приходится напряжение

$$\frac{1}{2} u_1(t_1) = \frac{1}{2} U_{\text{max}} \sin(\omega \gamma t_{\text{вкл}}) \approx \approx 10 \text{ В} \geq u_{\text{ост кл}} = 4 \text{ В}.$$

Если этого напряжения (10 В) недостаточно для быстрого включения транзисторов T_2, T_4 , то можно увеличить коэффициент запаса γ . Таким образом, можно считать, что коммутационные потери на частотах $f_{\text{п}} \ll f_{\text{п пред}}$ составляют малые доли процента, т. е. пренебрежимо малы.

С другой стороны, при работе на $f_{\text{п пред}}$ следует проверить сколь велико $0,5u_1(t_1)$. В данном случае при $f_{\text{п пред}} = 133$ кГц величина $0,5u_1(t_1)$ возрастет почти в 7 раз и составит около 70 В. За время $\gamma t_{\text{вкл}} = 0,3$ мкс это напряжение спадает до нуля, вследствие чего оно вряд ли опасно для высоковольтного транзистора ($u_{\text{ном}} > 500$ В), тем более, что ток в процессе этого включения не превышает $0,5I_0 = 0,5i_{\text{ном}}$ (при напряжениях меньших, чем 100 В).

Если в процессе работы генератора нагрузочный контур не расстраивается, а требуемая частота $f_{\text{п}} < f_{\text{п пред}}$, то коммутационные потери составят менее 1 %, и практически можно считать, что нет необходимости усложнять схему и режим возбуждения транзисторов.

Стационарные потери в транзисторах моста состоят из потерь на вершине I_0 импульса тока и из потерь на его фронтах. Эти потери можно вычислить исходя из следующих соображений. У биполярных транзисторов крутизна вольт-амперной характеристики на начальном участке резко возрастает и при токах близких к максимальному $u_{\text{ост кл}}$ сравнительно мало изменяется

с изменением тока. В то же время участок с большими токами определяет основную мощность потерь. Если считать приближенно, что $u_{\text{ост кл}} = u_{\text{нас кл}}$ постоянно, то мощность потерь определяется произведением $u_{\text{ост кл}}$ на среднее значение тока на фронте, т. е. $0,5I_0$, и тогда

$$P_{\text{фр}} = 0,5I_0 u_{\text{нас кл}} \frac{t_3 - t_1}{T}.$$

В действительности для этого типа транзисторов (биполярные)

$$P_{\text{фр}} = \left(\frac{1}{2} \frac{1}{3}\right) I_0 u_{\text{нас кл}} \frac{t_3 - t_1}{T} \approx 0,4I_0 u_{\text{нас кл}} \frac{t_3 - t_1}{T}.$$

Стационарные потери мощности на вершине I_0 импульса тока (см. рис. 2, г) протяженностью $0,5T - (t_3 - t_1)$ определяются усредненной за период мощностью $u_{\text{ост кл}} I_0$, т. е. для одного транзистора

$$P_{\text{верш}} = I_0 u_{\text{ост кл}} \frac{0,5T - (t_3 - t_1)}{T}.$$

Суммируя эти виды стационарных потерь при $\hat{t} = t/T$, получаем их величину на один IGBT транзистор

$$P_{\text{стац}} = I_0 u_{\text{ост кл}} [0,5 - 0,6(t'_3 - t'_1)] = = I_0 u_{\text{ост кл}} (0,5 - 0,62\gamma t_{\text{вкл}} f_{\text{п}}). \quad (11)$$

В результате таких расчетов можно оценить возможности рассматриваемого типа транзисторов и в соответствии с поставленными требованиями выбрать их число или тип, чтобы обеспечить надежные условия эксплуатации. Запас расчетной мощности по отношению к требуемой можно использовать для снижения тока I_0 и повышения КПД либо для увеличения $f_{\text{п}}$ и снижения массы, габаритов и стоимости источника.

При использовании транзисторов типа MOSFET, для которых паспортом задается сопротивление насыщения транзистора $R_{\text{нас}}$, стационарные потери на вершине I_0 импульса тока для одного транзистора определяются так:

$$P_{\text{верш}} = I_0^2 R_{\text{нас}} \frac{0,5T - (t_3 - t_1)}{T}.$$

Потери на линейных фронтах тока с суммарной протяженностью $t_3 - t_1$ для этого типа транзистора (MOSFET) составляют

$$P_{\text{фр}} = \frac{1}{3} I_0^2 R_{\text{нас}} \frac{t_3 - t_1}{T}.$$

Суммируя последние два выражения, получаем соотношение для стационарных потерь мощности в полевом транзисторе:

$$P_{\text{стац}} = I_0^2 R_{\text{нас}} [0,5 - 0,6(t'_3 - t'_1)] = I_0^2 R_{\text{нас}} (0,5 - 0,62\gamma t_{\text{вкл}} f_{\text{п}}) \quad (12)$$

при $\hat{t} = t / T = t f_{\text{п}}$.

Пример расчета

Рассмотрим возможности транзисторов Toshiba IGBT MG600Q1US41 с параметрами (по паспорту):

Максимальное напряжение	$u_{\text{max}} = 1200 \text{ В}$
Номинальный ток	$I_{\text{ном}} = 600 \text{ А}$
Максимальный ток (при $t < 1 \text{ мс}$)	$i_{\text{max}} = 1200 \text{ А}$
Остаточное напряжение в ключевом режиме	$u_{\text{ост кл}} \text{ от } 2 \text{ В до } 4 \text{ В}$
Максимально допустимая мощность потерь на коллек- торе при токе 600 А	$P_{\text{пот}} = 3,6 \text{ кВт}$
Полное время включения	$t_{\text{вкл}} = 0,4 \text{ мкс}$
Полное время выключения	$t_{\text{выкл}} = 0,45 \text{ мкс}$

Параметры и значения электрических величин транзисторного генератора: частота генерации $f_{\text{п}} = 66 \text{ кГц}$, частота ключевого усилителя (регулятора) — 20 кГц .

Принимая $E_0 = 500 \text{ В}$ (выпрямленное напряжение трехфазной сети), $I_0 = I_{\text{ном}} = 600 \text{ А}$, частоту генератора $\omega = 2\pi f = 415000 \text{ рад/с}$, время включения $t_{\text{вкл}} = 0,2 \text{ мкс}$ (при токе 300 А) и коэффициент запаса для этого времени $\gamma = 3$, согласно (5) найдем мощность в нагрузке $P_{\text{н}} \cong 190 \text{ кВт}$.

Коммутационные потери согласно (8) и (9) $P_{\text{ком}} = 1970 \text{ Вт}$, $\Delta\eta_{\text{ком}} \cong 1\%$.

Стационарные потери в четырех транзисторах моста согласно (11) $P_{\text{стац}} = 4,34 \text{ кВт}$, т. е. $1,08 \text{ кВт}$ в каждом.

Потери электронного КПД: $\Delta\eta_{\text{стац}} = 2,3\%$.

Общие потери электронного КПД: $1 + 2,3 = 3,3\%$ (здесь коммутационные потери составляют малую часть потерь).

Максимальные напряжения на каждом транзисторе моста в момент его включения

$$\frac{1}{2} u(t_1) = \frac{1}{2} U_{\text{max1}} \sin(\omega \gamma t_{\text{вкл}}) \approx \frac{1}{2} E_0 \omega \gamma t_{\text{вкл}} = 62 \text{ В}$$

при нулевом токе. Затем напряжение u_1 спадает за $0,4 \text{ мкс}$ до нуля по мере повышения тока i_2 от нуля до $1/2 I_0 = 300 \text{ А}$.

При мощности 60 кВт это напряжение вместе с $t_{\text{вкл}}$ и током уменьшается в $3,18$ раза.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

Исследована задача оптимизации режима транзисторного мостового резонансного инвертора тока. Выбор данной схемы продиктован тем, что в ней реализуется режим переключения транзисторов при нулевом напряжении, а также отсутствуют сквозные токи транзистор—диод или транзистор—транзистор. Указанные преимущества позволяют минимизировать коммутационные потери и существенно улучшить частотные показатели резонансных инверторов.

В работе введено понятие коэффициента запаса γ и показано, что для исключения коммутационных потерь в инверторе тока при включении транзисторов моста эту величину в зависимости от типа силовых транзисторов достаточно выбирать в пределах $\gamma = 1,5 - 2,5$.

Получены простые соотношения, позволяющие рассчитать суммарные коммутационные потери в транзисторах моста инвертора тока, а также при заданной частоте переключения оценить максимально возможную для выбранного типа транзистора и его паспортных данных мощность преобразователя.

Предложена инженерная методика расчета инвертора тока. В результате таких расчетов можно оценить возможности рассматриваемого типа транзисторов и в соответствии с поставленными требованиями выбрать их число или тип, чтобы обеспечить надежные условия эксплуатации. Запас расчетной мощности можно использовать для снижения тока и повышения КПД либо для увеличения частоты переключения транзисторов и снижения массы, габаритов и стоимости инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артым, А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании [Текст] / А.Д. Артым. — М.: Связь, 1980. — 209 с., ил.
2. Grebennikov, A. Switchmode RF Power Amplifiers [Текст] / A. Grebennikov; N.O.A. Sokal. — ELSEVIER, 2007. — 424 p.



3. **Мэк, Р.** Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению [Текст]: пер. с англ. / Р. Мэк.— М.: ИД «Додэка XXI», 2008.— 272 с.: ил.

4. **Erickson, R.** Fundamentals of Power Electronics [Текст] / R. Erickson, D. Maksimovic, M.A. Norwell, Kluwer, 2000.

5. **Morimoto, K.** Next Generation High Efficiency High Power DC-DC Converter incorporating Active Switch and Snubbing Capacitor Assisted Full-Bridge Soft-Switching PWM inverter with High Frequency Transformer for Large Current Output [Текст] /

K. Morimoto, T. Doi, H. Manabe [и др.] // Proceedings of IEEE—APEC. March, 2005. — P. 1549–1555.

6. **Hui, S.Y.R.** Analysis of a quasi-resonant circuit for soft-switched inverters [Текст] / S.Y.R. Hui, S. Gogani, J. Zhang, // IEEE Trans. Power Electron.— 1996.— № 11.— P. 106–114.

7. **Drobnik, J.** High frequency alternating current power distribution [Текст] / J. Drobnik // Proc. IEEE INTELEC'94. — Vancouver (BC, Canada). — 1994. — P. 292–296.

8. **Chen, S.** A novel soft switched PWM inverter for AC motor drives [Текст] / S. Chen, T.A. Lipo // IEEE Trans. Power Electron.— 1996.— № 11.— P. 653–659.

УДК 697.34

В.В. Игнатёнок, В.М. Боровков

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ

Для реализации программы повышения энергоэффективности российской экономики (что определяется эффективностью функционирования топливно-энергетического комплекса), а также рационального энергоснабжения потребителей особое значение имеет теплофикация на базе централизованного теплоснабжения.

Теплофикация — наиболее совершенный технологический способ производства электрической и тепловой энергии и один из основных путей снижения расхода топлива на выработку указанных видов энергии [1]. Ее термодинамической основой служит полезное использование отработавшей в тепловом двигателе и отводимой из теплосилового цикла теплоты.

Уровень централизации теплоснабжения зависит от ряда факторов: плотности тепловых нагрузок (их мощность на единицу площади снабжаемого района); вида топлива, на котором работают энергоустановки; экологических требований, диктуемых текущим состоянием воздушного бассейна; наличия избытков теплоты на промышленных предприятиях, которые расположены на рассматриваемых территориях.

В СССР в период планового регулирования экономики наибольшее развитие получили достаточно крупные городские и промышленные

теплофикационные системы, базирующиеся на централизованном теплоснабжении городов и промышленных зон. В результате чего при теплофикации в нашей стране были реализованы два основных принципа:

комбинированная выработка электроэнергии и теплоты, осуществляемая на ТЭЦ. Здесь необходимо отметить, что с целью выравнивания годового графика тепловой нагрузки ТЭЦ весьма целесообразно использовать в летний период отработавшую теплоту, например, для выработки холода в эжекционных и абсорбционных холодильных установках кондиционирования воздуха в промышленных и общественных зданиях;

централизация теплоснабжения, т. е. передача теплоты от одного или нескольких источников, работающих на одну тепловую сеть, многочисленным тепловым потребителям.

Передача теплоты в конечные нагреваемые среды осуществляется нагревательными приборами местных систем теплопотребления, по теплоотдаче которых судят о качестве всего централизованного теплоснабжения. Совокупность мероприятий по изменению теплоотдачи приборов в соответствии с изменением потребности нагреваемых ими сред называется регулирова-

нием отпуска тепла. От правильной организации и надлежащего осуществления регулирования во многом зависит качество и экономичность всего теплоснабжения [2].

Сегодня теплофикация и централизованное теплоснабжение применяются во многих странах — в Австрии, Болгарии, Венгрии, Германии, Китае, США, Дании, Финляндии, Швеции и др.

Необходимо понимать, что развитие теплофикации способствует решению многих важных народнохозяйственных и социальных проблем, таких, как увеличение тепловой и общей экономичности энергетического производства, повышение качества и надежности тепло- и электроснабжения жилищно-коммунальных и промышленных комплексов, снижение трудозатрат в тепловом хозяйстве, обеспечение высоких экологических показателей работающего энергетического оборудования.

Существующие виды регулирования отпуска тепловой энергии

Известно, что тепловая нагрузка абонентов непостоянна. Она изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха с соответствующими поправками на влияние ветра, солнца и изменения абсолютной влажности воздуха, режима расхода воды на горячее водоснабжение, режима работы технологического оборудования и ряда других факторов. Расход теплоты на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха на промышленных предприятиях в значительном числе случаев составляет в среднем 60–70 % их суммарного расхода теплоты, в то время как затраты теплоты на отопление и вентиляцию жилых, административных и общественных зданий составляют 50–90 % суммарных максимальных часовых потреблений тепловой энергии. Таким образом, основным является расход теплоты на три перечисленных вида теплового потребления. А для обеспечения надежного и высокого качества теплоснабжения данных групп абонентов, а также экономичных режимов выработки теплоты на ТЭЦ или в котельных и транспортировки ее по тепловым сетям выбирается соответствующий метод регулирования теплоотпуска.

В зависимости от пункта осуществления регулирования различают центральное, групповое, местное и индивидуальное регулирование. Центральное регулирование выполняется на ТЭЦ или

в котельной; групповое — на групповых тепловых подстанциях; местное — на местных тепловых подстанциях, часто называемых абонентскими вводами, а индивидуальное — непосредственно на теплопотребляющих приборах. В большинстве случаев тепловая нагрузка в районе разнородна. В одном и том же районе, даже на одном и том же абонентском вводе к тепловой сети присоединяется разнородная тепловая нагрузка, например: отопление и горячее водоснабжение; отопление, вентиляция, кондиционирование и горячее водоснабжение и т. д. Кроме того, в крупных городах с протяженными тепловыми сетями абоненты, расположенные на разном расстоянии от ТЭЦ, из-за транспортного запаздывания теплоносителя находятся в неодинаковых условиях.

Для обеспечения высокой экономичности теплоснабжения следует применять комбинированное регулирование, которое должно быть рациональным сочетанием по крайней мере трех ступеней регулирования — центрального, группового или местного и индивидуального. Что, собственно говоря, сегодня и применяется при теплоснабжении крупных городов: тепло, произведенное на ТЭЦ либо в котельной, подается по магистральным сетям в районы и кварталы, где расположены ЦТП, от которых по распределительным тепловым сетям отправляется в элеваторные узлы (или ИТП), расположенные непосредственно в зданиях абонентов [3].

Однако индивидуальное регулирование непосредственно на теплопотребляющих приборах требует применения большого количества индивидуальных регуляторов. На сегодняшний день это не всегда выполняется, так как требует довольно больших капиталовложений на реконструкцию действующих тепловых энергоустановок. Особенно затруднена реконструкция систем, которые выполнены по одноконтурной схеме, когда работа одних нагревательных приборов жестко связана с работой других. В связи с этим регулирование систем теплоснабжения и режимов отпуска теплоты ограничивается только двумя-тремя ступенями — центральным, групповым и (или) местным, а в системах теплоснабжения малой мощности — одной ступенью на источнике соответствующих систем автоматического (а не ручного, как это имело место в начальный период развития централизованного теплоснабжения) регулирования.



Центральное регулирование

Центральное регулирование ведется по типовой тепловой нагрузке, характерной для большинства абонентов района. Ею может быть как один вид нагрузки, например отопление, так и два разных вида при определенном их количественном соотношении (например, отопление и ГВС при заданном отношении расчетных значений этих нагрузок).

В 1970–1980 годах нашло широкое применение центральное регулирование по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения, так как эти нагрузки — основные в современных городах. При рассматриваемом методе регулирования можно удовлетворять нагрузку горячего водоснабжения без дополнительного увеличения или с незначительным увеличением расчетного расхода воды в сети по сравнению с расчетным расходом воды на отопление. Снижение расчетного расхода воды в сети приводит к уменьшению диаметров трубопроводов тепловых сетей, что приводит к снижению затрат, необходимых при их сооружении.

Известно, что основное количество теплоты в абонентских системах расходуется на нагревание, поэтому тепловая нагрузка зависит в первую очередь от режима теплоотдачи установленных у потребителей нагревательных приборов. Несмотря на значительное конструктивное разнообразие применяемых нагревательных приборов, все они, как правило, являются теплообменниками поверхностного типа, теплоотдачу которых в переменных режимах наиболее целесообразно определять при помощи следующего уравнения:

$$Q = kF\Delta t = W_n(\tau_1 - \tau_2)n, \quad (1)$$

где Q — количество теплоты, отданное за время n ; kF — произведение коэффициента теплопередачи нагревательных приборов на их поверхность нагрева; Δt — средняя разность температур между греющей и нагреваемой средой; W_n — эквивалент расхода первичной (греющей) среды; τ_1 и τ_2 — температуры первичной (греющей) среды на входе в нагревательный прибор и на выходе из него.

Средняя разность температур может быть представлена в первом приближении как разность между среднеарифметическими температурами греющей и нагреваемой среды:

$$\Delta t = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{cp}, \quad (2)$$

где t_{cp} — средняя температура нагреваемой среды; t_2, t_1 — температуры вторичной (нагреваемой) среды на входе в нагревательный прибор и на выходе из него.

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$\tau_2 = \tau_1 - \frac{Q}{nW_n};$$

$$Q = kF \left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{cp} \right) n.$$

Из совместного решения находим

$$Q = \frac{(\tau_1 - t_{cp})n}{\frac{1}{kF} + \frac{0,5}{W_n}}. \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), тепловая нагрузка принципиально может регулироваться за счет изменения пяти параметров: коэффициента k теплопередачи нагревательных приборов, площади F включенной поверхности нагрева, температуры τ_1 греющего теплоносителя на входе в прибор, эквивалента расхода W_n греющего теплоносителя и времени n работы прибора.

При практическом осуществлении центрального регулирования применение находят всего два параметра — это τ_1 и W_n , причем не стоит забывать, что возможный диапазон изменения τ_1 и W_n в реальных условиях ограничен рядом обстоятельств.

При разнородной тепловой нагрузке нижний предел τ_1 — обычно температура, требуемая для горячего водоснабжения (65 °С). Верхний предел τ_1 определяется допустимым давлением в подающей линии тепловой сети из условия не вскипания воды. Верхний предел W_n (МПа) определяется располагаемым напором на групповых или местных тепловых подстанциях и гидравлическим сопротивлением абонентских установок [4].

В водяных системах централизованного теплоснабжения принципиально можно использовать три метода центрального регулирования: качественный, количественный и комбинированный. Здесь необходимо более подробно разобрать каждый из перечисленных методов, так как система теплоснабжения любого крупного мегаполиса построена именно на них.

Качественный, количественный и количественно-качественный методы. Что же выбрать?

Для начала дадим краткую характеристику каждому из перечисленных методов. Итак, качественный метод заключается в регулировании отпуска теплоты за счет изменения температуры на входе в прибор при сохранении постоянного расхода теплоносителя, подаваемого в регулируемую установку; количественный — в регулировании отпуска теплоты путем изменения расхода теплоносителя при постоянной температуре его на входе в регулируемую установку; наконец, качественно-количественный метод предполагает регулирование отпуска теплоты посредством одновременного изменения расхода и температуры теплоносителя. В качестве наглядного примера приведем температурные графики регулирования отопительной нагрузки (рис. 1, 2 и 3).

Теперь посмотрим на существующие системы теплоснабжения и попробуем разобраться, какой из перечисленных методов наиболее эффективен.

При автоматизации абонентских вводов основное применение в городах получило центральное качественное регулирование, дополняемое на групповых или местных тепловых подстанциях количественным регулированием.

Качественная работа отопительных установок жилых и общественных зданий при применении количественного регулирования возможна только в случае присоединения этих установок к тепловой сети по двум схемам. Одна из них — независимая, вторая — зависимая со смесительным насосом. Только при подобных схемах присоединения в местных отопительных установках может поддерживаться расчетный расход воды независимо от ее расхода из тепловой сети.

В случае присоединения отопительных установок к тепловой сети по зависимой схеме с элеватором без дополнительного смесительного насоса снижение расхода сетевой воды вызывает пропорциональное изменению ее расхода в местной системе. При уменьшении расхода воды в отопительной установке увеличивается перепад температур воды в отопительных приборах и возрастает гравитационный перепад, что приводит к вертикальной разрегулировке отопительных систем. Это обстоятельство ограничивает

использование количественного регулирования в двухтрубных отопительных установках жилых зданий, имеющих, как правило, значительную высоту и небольшую потерю напора при расчетном расходе воды.

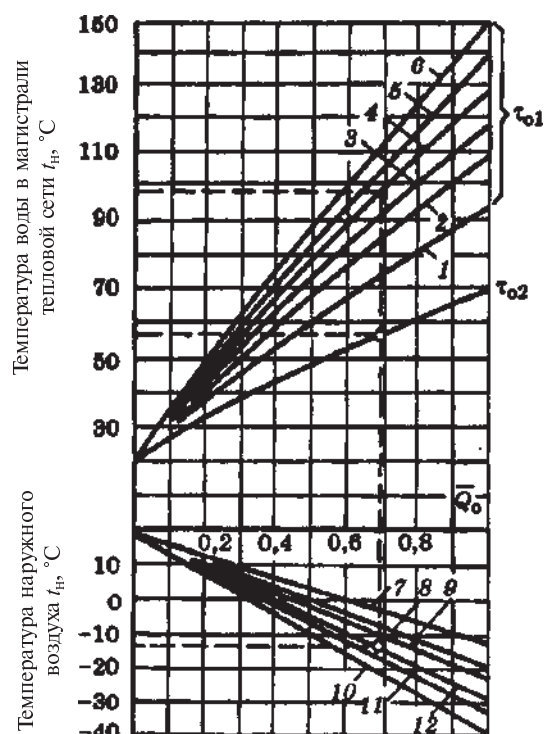


Рис. 1. Температурные графики качественного регулирования отопительной нагрузки

($\bar{Q} = Q / Q'$ — относительная отопительная нагрузка при наружной температуре $t_{вн}$, °C; $\delta t' = t' - t'_1$ — расчетный перепад температур в тепловой сети, °C; t' — расчетная температура наружного воздуха для отопления, °C):

- 1 — $\delta t' = 25$ °C; 2 — $\delta t' = 40$ °C; 3 — $\delta t' = 50$ °C;
- 4 — $\delta t' = 60$ °C; 5 — $\delta t' = 70$ °C; 6 — $\delta t' = 80$ °C;
- 7 — $\delta t' = 15$ °C; 8 — $\delta t' = 20$ °C; 9 — $\delta t' = 25$ °C;
- 10 — $\delta t' = 30$ °C; 11 — $\delta t' = 35$ °C; 12 — $\delta t' = 40$ °C

При теплоснабжении от ТЭЦ комбинированная выработка электрической энергии в случае центрального качественного регулирования больше, чем при других методах центрального регулирования. Центральное количественное регулирование уступает качественному в плане стабильности теплового режима отопительных установок, присоединенных к тепловой сети по зависимой схеме с элеваторным смешением без установки дополнительного смесительного насоса. Вследствие переменного расхода воды в сети рас-

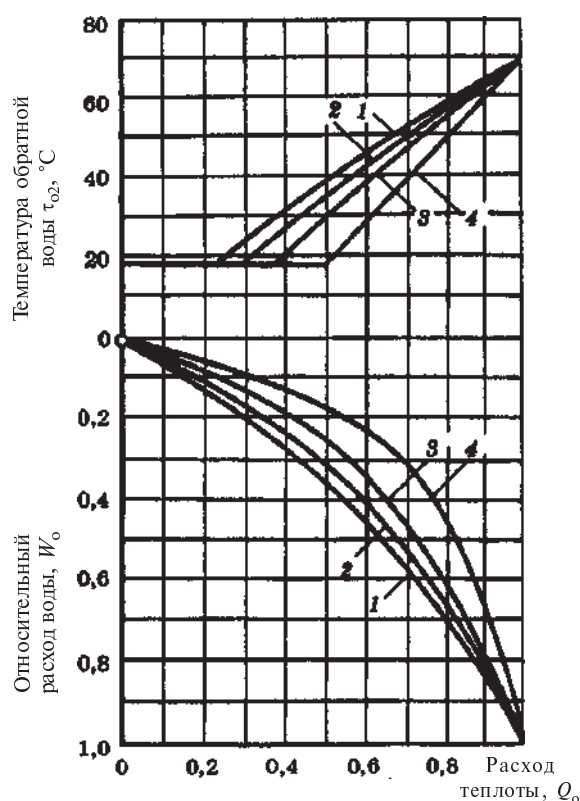


Рис. 2. Графики количественного регулирования отопительной нагрузки ($\theta = 25$ °C, $t = 18$ °C):
1 — $\tau'_{o1} = 150$ °C; 2 — $\tau'_{o1} = 130$ °C; 3 — $\tau'_{o1} = 110$ °C;
4 — $\tau'_{o1} = 95$ °C

ход электроэнергии на перекачку при количественном регулировании меньше, чем при качественном.

Как уже упоминалось, в отечественных системах теплоснабжения применяется центральное качественное регулирование нагрузки на теплоисточниках, которое предусматривает изменение температуры теплоносителя в пределах 70–150 °C при постоянном его расходе в зависимости от температуры наружного воздуха. Центральное качественное регулирование тепловой нагрузки осуществляется на ТЭЦ, схема которых предусматривает последовательное включение основных и пиковых источников теплоты. Действующие системы спроектированы и построены несколько десятилетий назад. За прошедшее с тех пор время многие концептуальные технические и технологические решения, заложенные в основу проектов теплоисточников, систем транспорта тепловой энергии и теплоиспользующих систем, просто устарели. Несмотря на

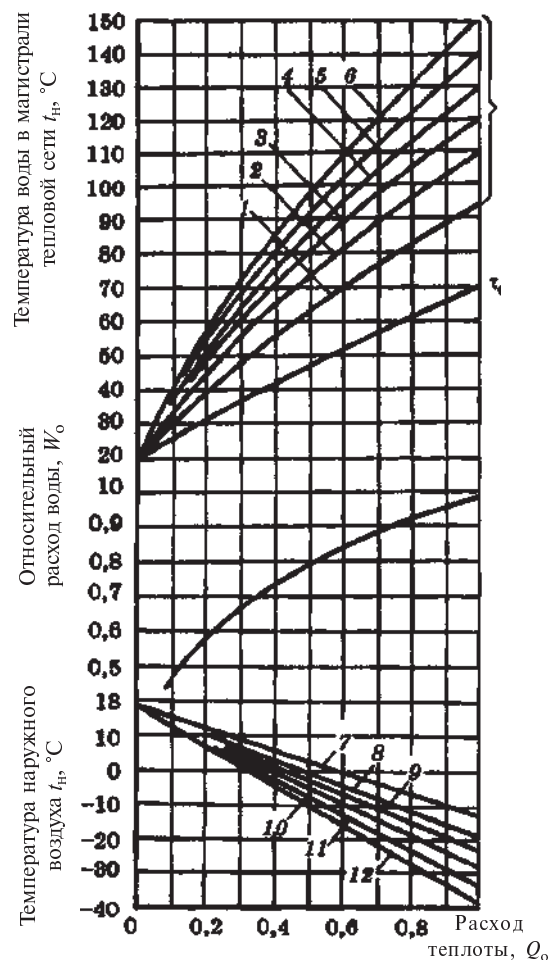


Рис. 3. Графики температур и расхода воды при качественно-количественном регулировании отопительной нагрузки (обозначения те же, что и на рис. 1)

высокую эффективность комбинированного производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, доля теплофикации в общей выработке тепловой энергии в России снижается. Связано это с тем, что отечественные системы теплоснабжения эксплуатируются на основе устаревших и малоэффективных технологий, разработанных еще в 50-е годы, прежде всего технологий регулирования отпуска теплоты. Подобное регулирование нагрузки с высокими температурами теплоносителя в периоды пиковых потреблений тепловой энергии приводит к существенным потерям теплоты в сетях и повышенным энергозатратам на транспорт теплоносителя.

А какой метод регулирования применяется в странах с похожими климатическими условия-

ми, например в Дании, Германии, Финляндии и Швеции? Системы теплоснабжения этих стран работают на принципах количественного регулирования. Фактически температура в сетях у них либо фиксируется (около 110°C), либо ступенчато изменяется в диапазоне $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$. Даже в летний период поддерживается температура больше 100°C , чтобы обеспечить работу абсорбционных холодильных машин, преобразующих теплоту сетевой воды в холод для систем кондиционирования зданий. При развитии системы теплоснабжения количественное регулирование позволило массово использовать схему совместной работы ТЭЦ и котельных. При похолодании сначала увеличивается расход теплоносителя от ТЭЦ, а по-

том запускаются котельные, обеспечивающие недостающее количество теплоносителя, закачивая его своими насосами в общую сеть.

Сегодня в связи с принятием ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...», вступившим в силу 27 ноября 2009 года, весьма уместно использовать зарубежный опыт по применению других методов регулирования теплоотпуска, в частности количественного. Нам даже не потребуется ничего изобретать и придумывать, ведь все уже построено и работает, системы теплоснабжения отвечают самым высоким требованиям по надежности, экономичности и экологической обстановке в местах работы энергетического оборудования.

Сравнение способов регулирования тепловой нагрузки

Способ регулирования	
Качественный	Количественный и качественно-количественный
<p><i>Преимущество</i></p> <p>Стабильный гидравлический режим тепловых сетей.</p> <p><i>Недостатки</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая надежность источников пиковой тепловой мощности. 2. Необходимость применения дорогостоящих методов обработки подпиточной воды теплосети при высоких температурах теплоносителя. 3. Повышенный температурный график для компенсации отбора воды на горячее водоснабжение и связанное с этим снижение выработки электроэнергии на тепловом потреблении. 4. Большое транспортное запаздывание (тепловая инерционность) регулирования тепловой нагрузки системы теплоснабжения. 5. Высокая интенсивность коррозии трубопроводов из-за работы системы теплоснабжения в течение большей части отопительного периода с температурами теплоносителя $60\text{--}85^{\circ}\text{C}$. 6. Колебания температуры внутреннего воздуха, обусловленные влиянием нагрузки горячего водоснабжения на работу систем отопления, а также различным соотношением нагрузок горячего водоснабжения и отопления у абонентов. 7. Снижение качества теплоснабжения при регулировании температуры теплоносителя по средней (за несколько часов) температуре наружного воздуха, что приводит к колебаниям температуры внутреннего воздуха. 8. При переменной температуре сетевой воды существенно осложняется эксплуатация компенсаторов 	<p><i>Преимущества</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет понижения температуры обратной сетевой воды. 2. Возможность применения недорогих методов обработки подпиточной воды теплосети при $t_1 < 110^{\circ}\text{C}$. 3. Работа системы теплоснабжения большую часть отопительного периода с пониженными расходами сетевой воды и значительной экономией электроэнергии на транспорт теплоносителя. 4. Меньшая инерционность регулирования тепловой нагрузки, так как система теплоснабжения более быстро реагирует на изменение давления, чем на изменение температуры сетевой воды. 5. Постоянная температура теплоносителя в подающей магистрали теплосети, способствующая снижению коррозионных повреждений трубопроводов теплосети. 6. Возможность дополнительной экономии электроэнергии на привод циркуляционных насосов за счет увеличения естественного циркуляционного давления. 7. Возможность применения при $t_1 < 110^{\circ}\text{C}$ в местных системах и квартальных сетях долговечных трубопроводов из неметаллических материалов. 8. Поддержание температуры сетевой воды постоянной благоприятно сказывается на работе компенсаторов. 9. Отсутствие необходимости в смесительных устройствах абонентских вводов. <p><i>Недостаток</i></p> <p>Переменный гидравлический режим работы тепловых сетей</p>



В будущем в отечественных системах теплоснабжения все большее распространение должны получать способы количественного и качественно-количественного регулирования тепловой нагрузки. Достоинства и недостатки этих способов по сравнению с качественным регулированием тепловой нагрузки [5] приведены в таблице.

В завершение хотелось бы отметить, что в современной обстановке, при значительной нехватке в энергосистемах средств на капитальное строительство, трудно рассчитывать на ввод новых, более экономичных теплоэнергетических мощностей. Поэтому одним из основных путей повышения экономичности теплоснабжения является реконструкция тепловых схем ТЭЦ, существующих водогрейных котлов и другого основного и вспомогательного оборудования теплоисточников, осуществляемая при разумном минимуме капиталовложений.

Необходимо также учесть, что экономно про- извести ресурсы — это половина дела, необходи-

мо научиться экономно их тратить. Поэтому сегодня нужно создать все условия для того, чтобы жители могли экономить энергоресурсы и, главное, чтобы им это было выгодно. Например, одним из способов стимулирования экономии может стать ряд специальных тарифных мероприятий, заключающихся в повышении тарифов на электроэнергию, потребляемую в часы максимума нагрузки, и в снижении их в часы минимумов. Не стоит забывать и о том, что в большинстве случаев энергосбережение — весьма дорогостоящий процесс, в развитых странах он не может осуществляться без значительного набора экономических стимулов. В нашей же стране есть весьма значительный набор управленческих решений, позволяющих получить заметный эффект без существенных инвестиционных затрат. Экономический кризис должен, наконец-то, отвлечь от эйфории гигантских инвестиций, заставить «посмотреть под ноги» и заметить, что существуют огромные резервы экономии нужно только «наклониться и взять их».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплоэнергоэффективные технологии** [Текст] // Информационный бюллетень 2009 г. № 3 (56). — 61 с.
2. **Ионин, А.А.** Теплоснабжение [Текст]: учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков [и др.]; Под ред. А.А. Ионина. — М.: Стройиздат, 1982. — 336 с., ил.
3. **Ширакс, З.Э.** Теплоснабжение [Текст]: пер. с латыш / З.Э. Ширакс. — М.: Энергия, 1979. — 256 с., ил.
4. **Соколов, Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети [Текст]: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. — 7-е изд., стереот. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с.
5. **Шарапов, В.И.** Технологии обеспечения пиковой мощности систем теплоснабжения [Текст] / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов. — [Электрон. ресурс]. — <http://www.rosteplo.ru>

УДК 621.311.11

А.П. Васильев, И.И. Бандурин

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Для обеспечения надежности, безопасности и экономичности энергоустановок на каждом энергообъекте должно быть организовано их оперативное обслуживание (ОО) [2]. Объемы ОО зависят от технического состояния оборудования и определяются задачей обеспечения надежности электрических сетей.

В систему ОО современных предприятий электрических сетей входят устройства автоматики и телемеханики. Поток требований на обслуживание распределяется между обслуживающими приборами, к которым относятся устройства автоматики и телемеханики (ТМиА), а также оперативным и ремонтным персоналом (рис. 1).

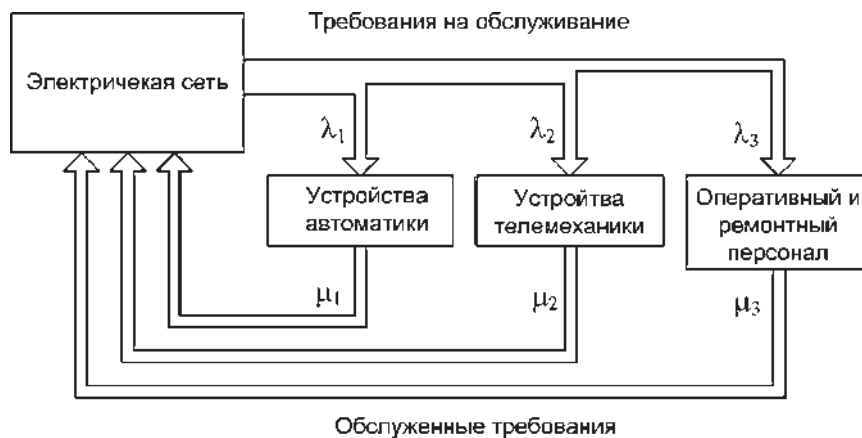


Рис. 1. Функциональная схема обслуживания требований электрической сети

В последнее время во всем мире автоматизация подстанций (ПС) и электрических сетей получила бурное развитие за счет применения новой техники на основе микропроцессоров. Благодаря этому могут быть существенно повышены надежность и эффективность функционирования энергосистем, а также производительность труда оперативного персонала. Объем функций автоматики, телемеханики, оперативного и ремонтного персонала устанавливается местными инструкциями [3].

Качество работы электрических сетей существенным образом зависит от производственных затрат, эффективности использования установленного оборудования, выполнения мероприятий по обеспечению надежности и безопасности. Необходимо иметь методику для выбора оптимального количества обслуживающих приборов по критерию минимума затрат на систему ОО.

Виды ОО подстанций 35 кВ и выше следующие:

- оперативное обслуживание местным оперативным персоналом;
- оперативное обслуживание оперативно-выездными бригадами (ОВБ).

Каждой ОВБ придается автомашина, оборудованная радиосвязью, для возможности обслуживания подстанций в закрепленной за бригадой зоне. Размер зоны обслуживания разных ОВБ может варьироваться в широких пределах.

Варианты организации ОО местным оперативным персоналом также могут быть разные: дежурство на дому одного электромонтера (ДЭ

на дому) в смене; дежурство на подстанции двух электромонтеров в смене; дежурство на подстанции одного электромонтера в смене (ДЭ);

Дежурство электромонтеров на подстанции организуется круглосуточно. При ОО выполняются оперативные переключения, подготовка рабочих мест и приемка их после окончания работ, устранение мелких неисправностей, осмотры оборудования и т. д.

Пусть существует некоторое множество $D \in \{d_1, \dots, d_k\}$ допустимых вариантов структуры ОО, где k — количество вариантов. Пусть K_i — стоимость создания i -го варианта структуры. Требуется выбрать оптимальный вариант структуры ОО так, чтобы минимизировать стоимость создания структуры ОО и расходов на ее обслуживание. При этом срок окупаемости проекта равен T .

Целевая функция по минимуму дисконтированных затрат на систему ОО имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T a_t (K_{i,t} + 3_{\text{год } i,t} + Y_{\text{год } i,t}) d_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где a_t — коэффициент дисконта; $K_{i,t}$, $3_{\text{год } i,t}$ — соответственно капитальные вложения и ежегодные затраты (издержки) на систему ОО при i -м варианте ее структуры для года эксплуатации t , руб; $Y_{\text{год } i,t}$ — выплаты потребителю за ущерб при i -м варианте системы ОО в году t , руб.

Годовые затраты на систему ОО определяются по формуле



$$Z_{\text{год}} = 12 \left(Z_{1\text{ДЭ}} n_{\text{ДЭ}} + Z_{1\text{ДЭ на дому}} n_{\text{ДЭ на дому}} + Z_{1\text{ОВБ}} n_{\text{ОВБ}} + Z_{1\text{ТМИА}} \right) + Z_{1\text{маш}} t_{\text{маш год}},$$

где $n_{\text{ДЭ}}$, $n_{\text{ДЭ на дому}}$, $n_{\text{ОВБ}}$ — количество ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ; $Z_{1\text{ДЭ}}$, $Z_{1\text{ДЭ на дому}}$, $Z_{1\text{ОВБ}}$, $Z_{1\text{ТМИА}}$ — ежемесячные затраты на содержание ДЭ, ДЭ на дому, ОВБ, устройств автоматики и телемеханики, руб.; $Z_{1\text{маш}}$ — затраты на содержание одной машины ОВБ в час, руб./ч; $t_{\text{маш год}}$ — суммарное время работы всех машин ОВБ в год, ч.

Для определения оптимального вида ОО необходимо знать минимальное необходимое количество ДЭ, ДЭ на дому и ОВБ. Математическая модель строится на основе функции годовых затрат на ОО и ограничений на загрузку обслуживающего прибора с учетом требований на обслуживание.

Требования на обслуживание в основном носят случайный характер. Поэтому полная загрузка обслуживающего прибора недопустима, иначе средняя длина очереди будет бесконечно расти. Найдем оптимальную загрузку обслуживающего прибора.

В общем случае время нахождения требования в системе массового обслуживания выражается формулой:

$$t_{\text{СМО}} = t_{\text{об}} + t_{\text{оч}},$$

где $t_{\text{об}}$ — время обслуживания требования, ч; $t_{\text{оч}}$ — среднее время ожидания требования в очереди, ч.

Задача определения $t_{\text{оч}}$ решена с использованием методов теории массового обслуживания. Для этого исходную неоднородную нагрузку необходимо свести к эквивалентной (с точки зрения загрузки системы) однородной.

Это сведение включает следующие преобразования исходных параметров (предполагаем, что все входные потоки — простейшие):

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{ — интенсивность объединенного потока требований, } 1/\text{ч};$$

$$\mu = \lambda / \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i} \right) \text{ — интенсивность обслуживания объединенного потока требований, } 1/\text{ч}.$$

Предлагается оценивать эффективность работы системы ОО по такому показателю, как среднее время обслуживания

$$t_{\text{об}} = \frac{1}{\mu} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i} \right) / \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Средняя длина $L_{\text{оч}}$ очереди требований для системы массового обслуживания с неограниченным ожиданием [3]:

$$L_{\text{оч}} = \frac{\rho^2}{1-\rho}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ — интенсивность загрузки обслуживающего прибора требованиями.

Среднее время ожидания в очереди $t_{\text{оч}}$ находим по формуле Литтла

$$t_{\text{оч}} = \frac{L_{\text{оч}}}{\lambda}. \quad (3)$$

Далее найдем такую ρ , чтобы интенсивность обслуживания с учетом времени ожидания была равна интенсивности требований. Тогда все поступившие за период времени t требования будут обслужены.

По определению имеем

$$\mu_{\text{СМО}} = \frac{1}{t_{\text{СМО}}} = \frac{1}{t_{\text{об}} + t_{\text{оч}}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + t_{\text{оч}}} = \lambda. \quad (4)$$

Решим уравнение (4). Для этого подставим в (4) $t_{\text{оч}}$ согласно (3) и $L_{\text{оч}}$ в соответствии с (2). В результате получим, что искомая интенсивность загрузки обслуживающего прибора $\rho \leq 0,5$.

Целевая функция по минимуму затрат на систему ОО без учета ущерба:

$$Z_{\text{год}} = 12k_{\text{см}} \left(Z_{1\text{ДЭ}} \sum_{i=1}^n x_{\text{ДЭ}i} + Z_{1\text{ДЭ на дому}} \times \sum_{i=1}^n x_{\text{ДЭ на дому}} + Z_{1\text{ОВБ}} \sum_{i=1}^n y_j \right) + Z_{1\text{час}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_i t_{\text{дост}i,j} x_{\text{ОВБ}i,j} \rightarrow \min,$$

где $x_{\text{ДЭ}i}$, $x_{\text{ДЭ на дому}i}$, $x_{\text{ОВБ}i,j}$ — переменные плана обслуживания; y_j — индикаторная переменная.

$$x_{\text{ДЭ}i} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я ПС обслуживается ДЭ;} \\ 0 & \text{в ином случае;} \end{cases}$$

$$x_{\text{ДЭ на дому}} = \begin{cases} 1, \text{ если } i\text{-я ПС обслуживается ДЭ на дому;} \\ 0 \text{ в ином случае;} \end{cases}$$

$$x_{\text{ОВБ } i,j} = \begin{cases} 1, \text{ если } i\text{-я ПС обслуживается } j\text{-й ОВБ;} \\ 0 \text{ в ином случае;} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1, \text{ если } x_{\text{ОВБ } i,j} \geq 0; \\ 0 \text{ в ином случае.} \end{cases}$$

Ограничения для целевой функции (5) представлены в таблице.

Учитывая нестационарность потока требований, задачу следует решать для определенного интервала времени функционирования системы ОО, в пределах которого можно принять параметр потока постоянным. Для каждого такого отрезка времени может проводиться анализ работы системы ОО.

Методика нахождения решения целевой функции (5) заключается в следующем:

1. Записываем целевую функцию (5) и ограничения (см. таблицу) для конкретной задачи.

2. Приводим к необходимому виду целевую функцию и ограничения, а именно

$$\mathbf{f}^T \mathbf{x} \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}: \\ \mathbf{Aeq} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{beq}: \\ \mathbf{x} \text{ — бинарный,} \end{cases}$$

где \mathbf{f} , \mathbf{b} и \mathbf{beq} — векторы, \mathbf{A} и \mathbf{Aeq} — матрицы, \mathbf{x} — решение, которое должно быть бинарным

вектором, т. е. его элементы могут принимать значения 0 либо 1.

3. Решение \mathbf{x} получаем с помощью методов линейного дискретного программирования (оно также может быть получено с помощью стандартных математических пакетов, например функции `bintprog` программы Matlab [1]).

Интенсивность загрузки оперативного персонала требованиями — важнейший параметр ПС. При понижении интенсивности загрузки оперативного персонала уменьшаются затраты на ОО ПС, но одновременно растут капитальные затраты на устройства ТМиА.

Сокращения затрат на ОО ПС можно добиться за счет уменьшения интенсивности загрузки оперативного персонала требованиями, что достигается применением различных средств, которые разделяются на две группы. К первой группе (рис. 2, а) относятся мероприятия, уменьшающие частоту требований: усиление изоляции, использование более надежного оборудования и т. п. Вторая группа мероприятий (рис. 2, б) — применение устройств обнаружения места повреждения, использование устройств телемеханики и т. п. — влияет на изменение времени выполнения требований.

Оптимальную загрузку оперативного персонала находим с помощью минимизации целевой функции приведенных затрат Z_Σ :

$$Z_\Sigma = Z_{\text{ПС}} + Z_{\text{ТМиА}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $Z_{\text{ПС}}$, $Z_{\text{ТМиА}}$ — приведенные затраты на обслуживание ПС и на устройства ТМиА, руб.

В зависимости от того, мероприятие какой группы применялось, минимуму целевой функ-

Ограничения для целевой функции

Ограничение	Описание
$x_{\text{ОВБ } i,j}, x_{\text{ДЭ на дому } i}, x_{\text{ДЭ } i}, y_j$ — бинарные	Переменные могут принимать значения 0 либо 1
$\sum_{j=1}^m x_{\text{ОВБ } i,j} + x_{\text{ДЭ на дому } i} + x_{\text{ДЭ } i} = 1$	Для каждой ПС должен быть выбран только один из обслуживающих приборов
$\sum_{i=1}^n x_{\text{ОВБ } i,j} \geq y_j; \quad y_j \geq x_{i,j}$	Ограничение для индикаторной переменной
$\sum_{i=1}^n \rho_{i,j} x_{\text{ОВБ } i,j} \leq 0,5; \quad \rho_{\text{ДЭ } i} x_{\text{ДЭ } i} \leq 0,5;$ $\rho_{\text{ДЭ на дому } i} x_{\text{ДЭ на дому } i} \leq 0,5$	Загрузка ОВБ, ДЭ и ДЭ на дому требованиями не должна быть более 0,5

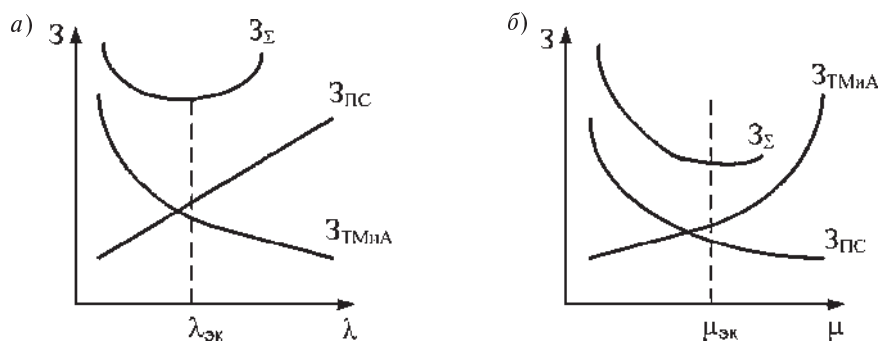


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат от интенсивности требований (а) и интенсивности обслуживания требований (б)

ции (б) будут соответствовать некоторая экономическая интенсивность $\lambda_{эк}$ или интенсивность обслуживания $\mu_{эк}$. Далее по известной $\lambda_{эк}$ либо $\mu_{эк}$ определяем оптимальные затраты на ОО ПС.

Иначе говоря, задача выбора оптимального варианта структуры ОО сводится к поиску такого размещения устройств ТМиА d_r , когда дисконтированные затраты на систему ОО минимальны.

Алгоритм выбора оптимального варианта структуры ОО состоит в том, что определяются:

1) оптимальные затраты на систему ОО ПС при i -м ее варианте для года t с помощью (6);

2) оптимальные затраты на систему ОО при i -м варианте структуры для года t с помощью (5);

3) полные дисконтированные затраты для i -го варианта;

4) оптимальный вариант структуры ОО, который имеет минимальные дисконтированные затраты (1).

Разработанная математическая модель позволяет выбрать оптимальный вариант структуры ОО по критерию минимума затрат на систему ОО. Поскольку требования в основном носят случайный характер, то загрузка обслуживающего прибора требованиями не должна превышать 0,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.: ил.
2. Правила технической эксплуатации элект-

роустановок потребителей. 621.3, П-683 [Текст]. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.

3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): 621.31, П-683 [Текст]. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. — Изд. 7-е.

УДК 621.311:621.316

А.В. Зайцев, А.С. Карнов

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ В РАЙОНАХ С ПРЕОБЛАДАНИЕМ ГЭС

Развитие аварий в районах с преобладанием ГЭС часто сопровождается значительным повышением частоты вследствие больших постоян-

ных времени регуляторов скорости гидротурбин. Это неблагоприятно сказывается на работе как тепловых и атомных электростанций, так и по-

Допустимые отклонения частоты для паровых турбин

Частота, Гц	Длительность отклонений, мин	
	допустимая единовременно	допустимая за весь срок
Выше 51,0	Эксплуатация запрещается	
50,5–51,0	3	500
50,5–49,0	Нет ограничений	
49,0–48,0	5	750
48,0–47,0	1	180
47,0–46,0	10 сек	30
Ниже 46,0	Эксплуатация запрещается	

требителей в выделенном в результате аварии районе. Некоторые данные для большинства типов паровых турбин по допустимым отклонениям частоты представлены в таблице.

Рассмотрим процессы, протекающие при развитии аварии с выделением гидроэлектростанции на изолированный район нагрузки соизмеримой мощности.

Расчетная схема системы представлена на рис. 1.

Гидроэлектростанция с установленной мощностью 200 МВт связана с энергосистемой по линиям Л-1 и Л-2. Примыкающий район нагрузки имеет мощность порядка 80 МВт.

Аварийная ситуация моделировалась каскадным отключением линий связи с энергосис-

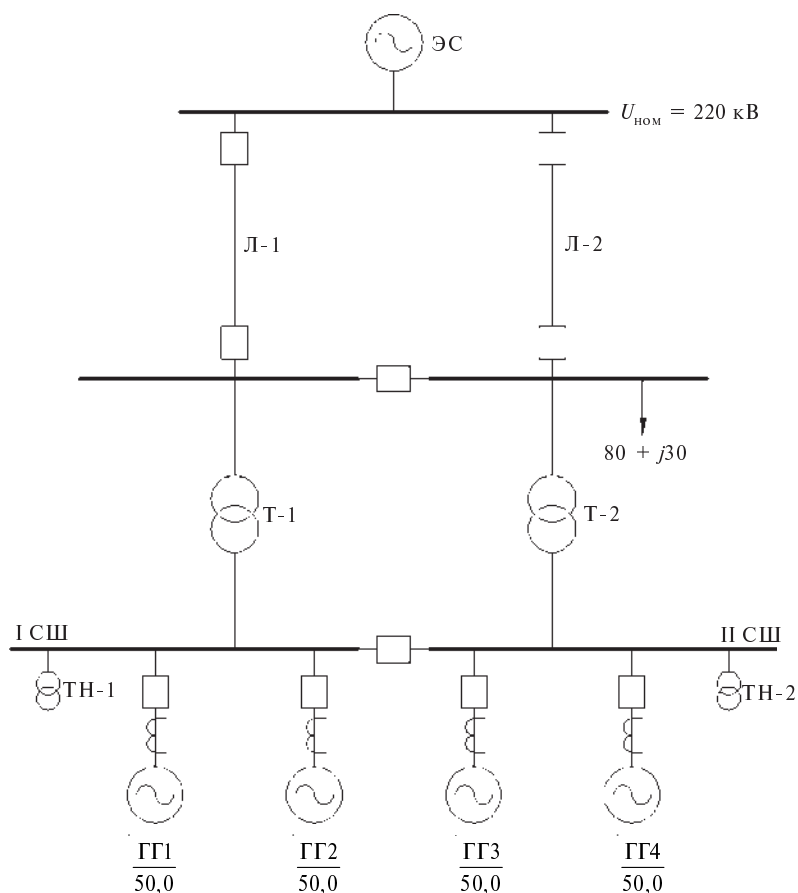


Рис. 1. Расчетная схема системы

темой Л-1, Л-2 и выделением ГЭС при исходной генерации 200 МВт на район нагрузки 80 МВт.

На рис. 2 представлены графики изменения частоты и суммарной электрической мощности генераторов при выделении ГЭС на район изолированной нагрузки.

Как видно из графиков, процессы выделения станции на нагрузку 80 МВт в силу инерционности канала регулирования механической мощности при закрытии направляющих аппаратов гидротурбин сопровождаются забросом частоты в переходном процессе до 53 Гц и колебаниями режимных параметров, связанными с наличием канала регулирования мощности гидротурбин. Новое установившееся значение частоты на уровне 51,3 Гц обусловлено первичным регулированием частоты в соответствии со статизмом регулирования 5 %.

Для ограничения повышения частоты в выделенном районе на уровне 52–53 Гц нормативными документами [2, 3] на ГЭС предусматриваются автоматические устройства ограничения повышения частоты (АОПЧ), действия которых направлены на отключение части генераторов и на закрытие направляющих аппаратов гидротурбин до прекращения повышения частоты.

Уставки АОПЧ по частоте и времени срабатывания с направлением действия на отключение части генераторов, как правило, определяются исходя из расчетного аварийного повышения частоты в энергосистеме в целом.

Недостаток этого алгоритма действия АОПЧ — неучет специфики протекания переходных процессов при выделении ГЭС на район изолированной нагрузки, что в ряде случаев может приводить к излишнему действию АОПЧ на отключение генераторов и обуславливать возникновение дефицита активной мощности, который приведет к последующему снижению частоты в выделенном районе до недопустимого уровня.

Моделировалась аварийная ситуация, как и ранее (для условий рис. 2), каскадным отключением линий связи с энергосистемой Л-1, Л-2 и выделением ГЭС на район нагрузки, но с действием АОПЧ. Уставки АОПЧ принимались равными следующим значениям: $f_1 = 50,5$ Гц, $t_{ср1} = 0,5$ с с направлением действия на отключение одного генератора, $f_2 = 50,5$ Гц, $t_{ср2} = 1,0$ с с действием на отключение второго генератора и $f_3 = 50,5$ Гц, $t_{ср3} = 1,5$ с при отключении третьего генератора. Результаты расчетов переходных процессов представлены на рис. 3.

Как видно из графиков переходных процессов, после аварийного отключения линий связи с системой рост частоты в выделенном районе приводит к срабатыванию АОПЧ при достижении соответствующих уставок и отключению с выдержками по времени трех генераторов. Возникший дефицит мощности при работе оставшегося генератора с мощностью турбины 50 МВт обуславливает последующее снижение частоты и — в худшем случае

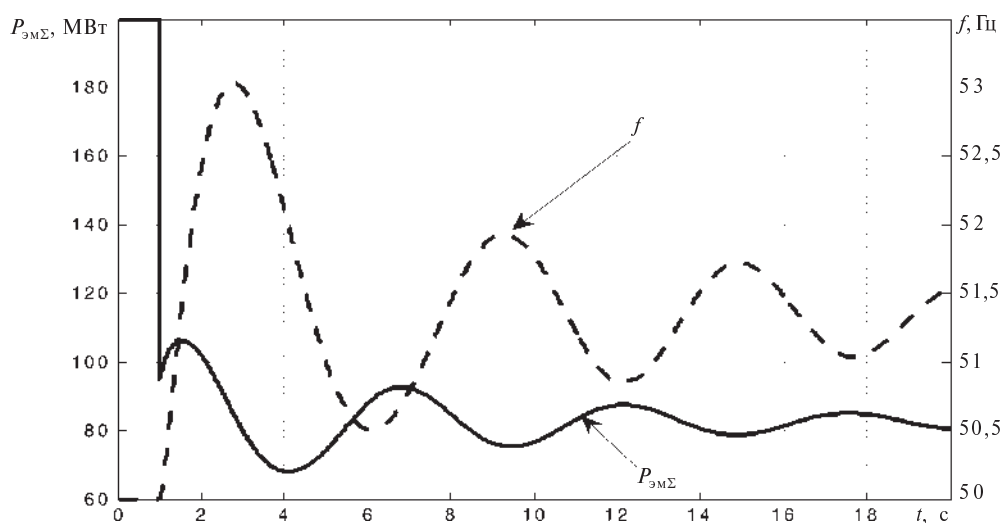


Рис. 2. Переходные процессы при выделении станции на район изолированной нагрузки

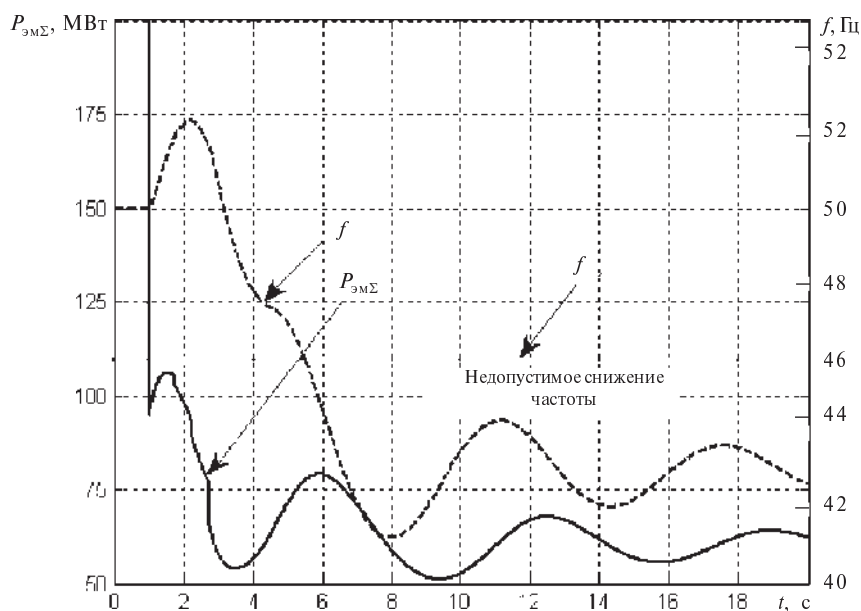


Рис. 3. Переходные процессы с учетом действия АОПЧ при выделении станции на район изолированной нагрузки

развития событий — к возникновению лавин частоты и напряжения с последующим полным погашением района.

В качестве конкретных примеров аналогичного развития аварийных ситуаций ниже представлены выдержки из книги [4], содержащие анализ системных аварий, связанных с повышением частоты.

Авария в энергосистеме Швеции 27 декабря 1983 года

“...Неселективно отключилась ВЛ 400 кВ Энгерман Ривер — Ум Ривер с последующим отключением перегрузившихся ВЛ 130 кВ;

район Ум Ривер выделился с избытком генерирующей мощности; автоматика повышения частоты отключила несколько гидрогенераторов, в результате чего произошло опасное понижение частоты и полное погашение района...”.

В американской практике избыток генерации обычно приводил к полному погашению района. Так и произошло при аварии в энергосистеме г. Нью-Йорк 13 июля 1977 года, а также на северо-востоке США в августе 2003 года.

Очевиден тот факт, что при повышении частоты в энергосистеме необходимо отключение оптимальной величины генерирующих мощностей с целью уменьшения заброса частоты в пе-

реходном процессе, обеспечения сбалансированности района по активной мощности и, как следствие, исключения недопустимого снижения частоты.

При этом важная задача — определение в темпе процесса величины нагрузки выделенного района и механической мощности турбин гидроагрегатов для выбора оптимального дозирующего воздействия на отключение части генераторов гидроэлектростанций при достижении определенных уставок по частоте.

Наиболее целесообразно решать эту задачу, используя микропроцессорные устройства, позволяющие практически мгновенно идентифицировать аварийную ситуацию и сформировать управляющие воздействия на отключение необходимого количества генераторов.

Входными параметрами при этом служат частота, мгновенные значения фазных токов каждого из генераторов и мгновенные значения фазных напряжений района, в котором потенциально возможно выделение ГЭС на изолированную нагрузку (например, с общих шин электростанции — см. рис. 1). Они обеспечивают:

контроль предшествующего режима (КПР) генерации активной мощности каждого из генераторов электростанции в установившемся режиме. Величина КПР активной мощности каж-

дого из генераторов в этом случае будет характеризовать располагаемый резерв механической мощности турбин;

определение величины нагрузки района (по суммарной электрической мощности всех находящихся в работе генераторов) в момент повышения частоты выше заданной уставки АОПЧ с коррекцией ее величины по напряжению.

Измерение активной мощности каждого из генераторов для КПР и определение величины нагрузки района после запуска АОПЧ должны осуществляться с контролем частоты — с минутной (до действия АОПЧ) выборкой значений фазных напряжений и токов при скважности их измерения 0,1с. Эти значения дискретизации выборки при рационально организованном алгоритме расчета КПР вполне оправданны,

принимая во внимание инерционность процессов регулирования механической мощности гидротурбины. Функциональная схема микропроцессорного устройства АОПЧ представлена на рис. 4, а блок-схема алгоритма определения мощности нагрузки с коррекцией по напряжению — на рис. 5.

Структурная схема реализованного алгоритма оптимизации управляющих воздействий на отключение генераторов (в данном случае на отключение ГГ-3 и ГГ-4) представлена на рис. 6.

Разработанный алгоритм выбора управляющих воздействий позволяет оптимизировать величину отключаемой мощности (выбор отключаемых генераторов) при любом их сочетании и в различных режимах загрузки по условию обеспечения некоторого превышения генерируемой

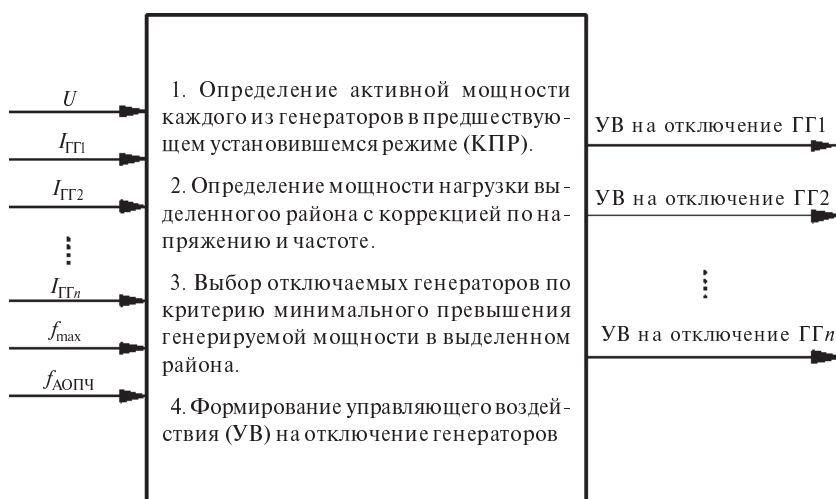


Рис. 4. Функциональная схема микропроцессорного устройства АОПЧ

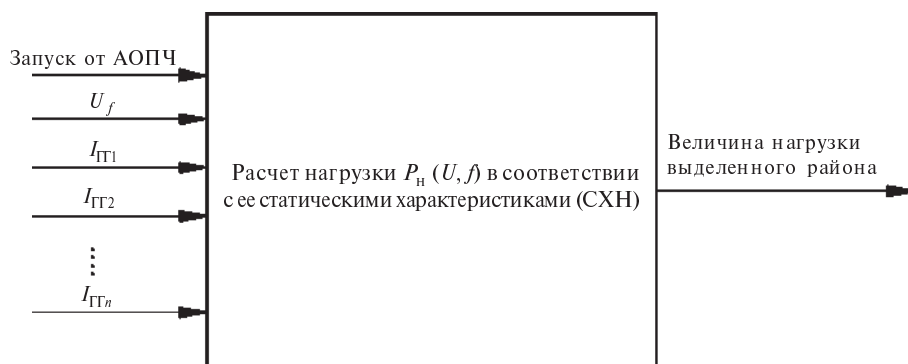


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения мощности нагрузки с коррекцией по напряжению

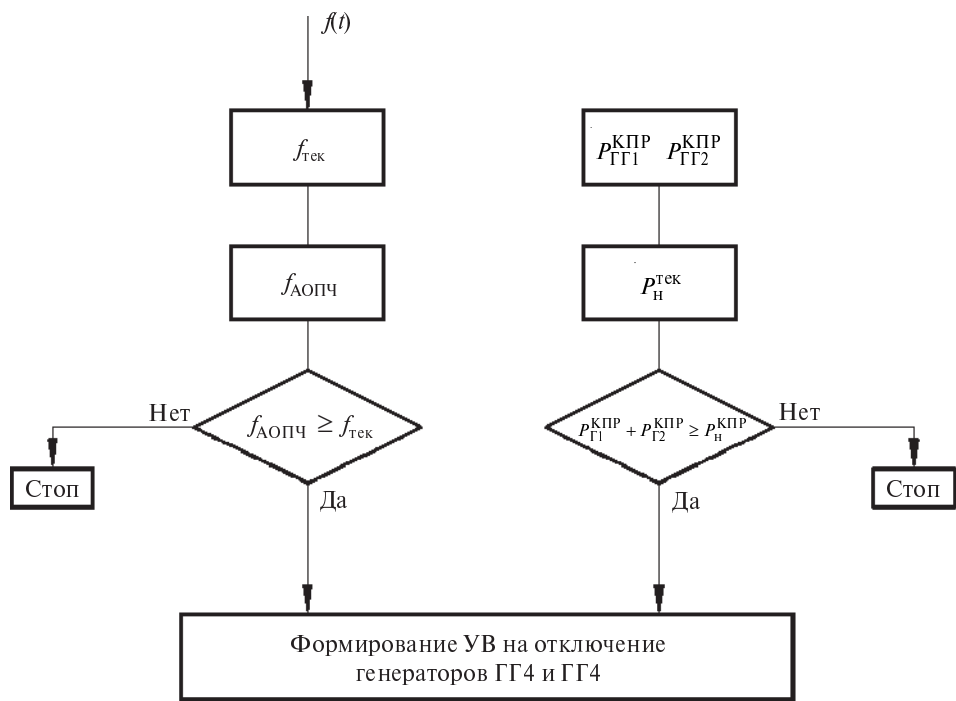


Рис. 6. Структурная схема алгоритма оптимизации и управляющих воздействий на отключение генераторов по критерию минимального превышения генерируемой мощности в районе

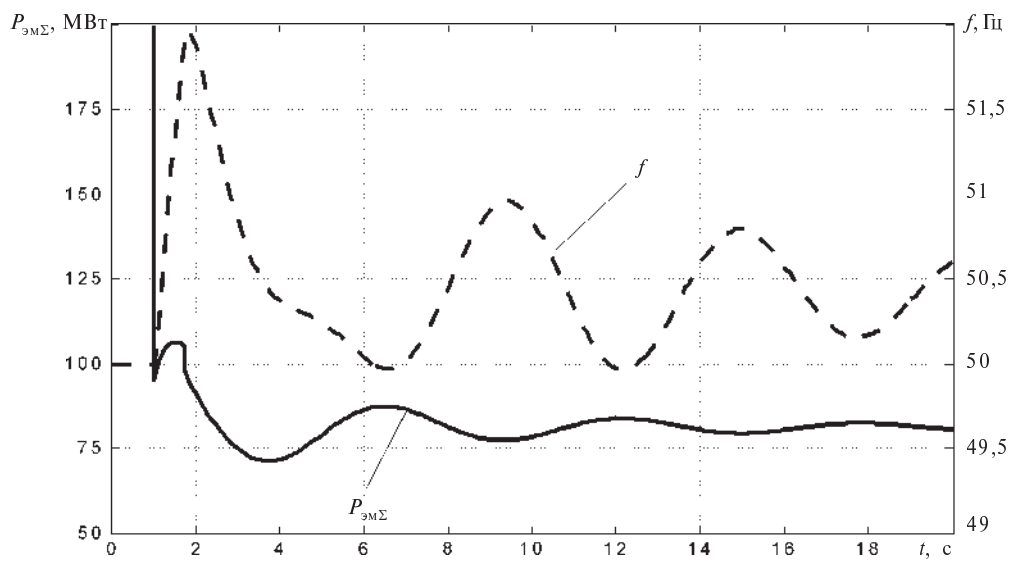


Рис. 7. Переходные процессы при действии АОПЧ, включающей алгоритм оптимизации отключения генераторов

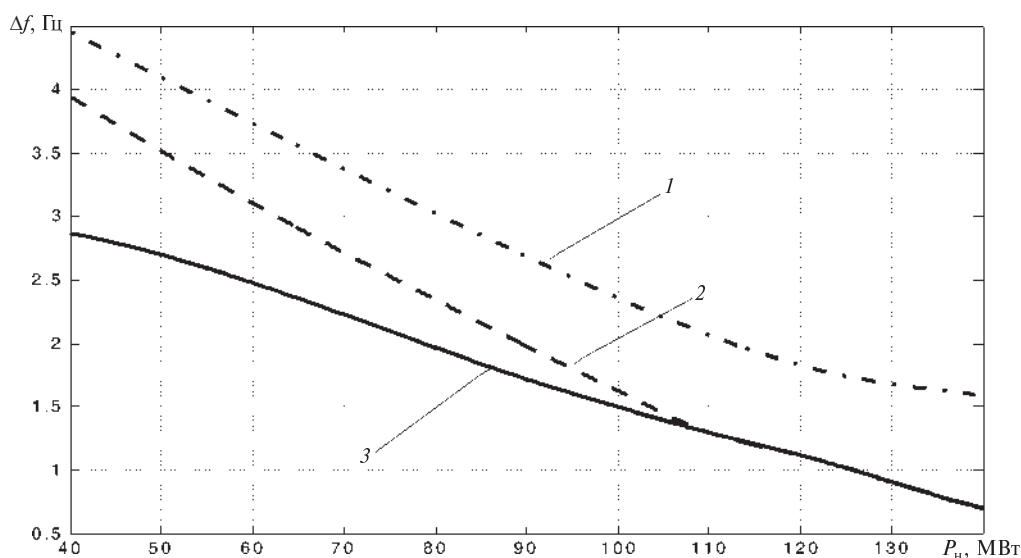


Рис. 8. Величины максимальных отклонений частоты в переходном процессе при регулировании момента турбины действием регулятора скорости вращения без АОПЧ (1), совместно с действием АОПЧ, предназначенной для ограничения повышения частоты в системе (2), или АОПЧ с оптимизированным алгоритмом управляющих воздействий (3)

мощности над мощностью нагрузки выделенного района.

На рис. 7 представлены переходные процессы генераторов при аварии, соответствующей тем же условиям ее возникновения, что и для рис. 2 и 3, но при оптимизации УВ на отключение генераторов по рассмотренному выше алгоритму действия АОПЧ.

Как видно из графиков рис. 7, выделение генераторов станции на район изолированной нагрузки при действии АОПЧ с предлагаемым алгоритмом обеспечивает сбалансированность района по активной мощности при некотором избытке генерируемой мощности в выделенном районе, что обуславливает увеличение частоты при-

мерно до 50,5 Гц под действием первичного регулирования механической мощности гидротурбин.

Графики предельных значений отклонения частоты, соответствующие условиям протекания аварийных процессов, принятым на рис. 2, 3 и 7, при широком варьировании мощности узла нагрузки представлены на рис. 8.

Предлагаемый алгоритм оптимизации управляющих воздействий на отключение генераторов позволяет не только существенно снизить отклонения частоты при выделении станции на район изолированной нагрузки, но и исключить снижение частоты во всех схемно-режимных условиях работы ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем [Текст] / ОАО "СО ЕЭС". — М.: Изд-во ОАО "Системный оператор единой энергетической системы", 2008.
2. **Правила** устройства электроустановок [Текст].— СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004.— 464 с.
3. **Автоматическое** противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная

автоматика энергосистем [Текст] / ОАО РАО "ЕЭС России". — М., 2008.

4. **Беляев, А.Н.** Анализ развития крупных системных аварий: Учебное пособие по курсу «Электро-ромеханические переходные процессы в электро-энергетических системах» [Текст] / А.Н. Беляев, Ю.П. Горюнов, А.А. Смирнов, С.В. Смолеников — СПб: Изд-во Политехн. университета, 2006. — 72 с.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ ПАРОТУРБИННЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ФУНКЦИЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Для создания благоприятных условий эксплуатации энергосистем и предотвращения аварийных ситуаций важно привлечь как можно больше электростанций к функциям режимного и противоаварийного управления.

Согласно действующим нормативным документам для обеспечения функций режимного автоматического управления реакция энергоблоков на изменение частоты должна быть такой, чтобы 50 % требуемого изменения мощности энергоблока было реализовано за 10 с (при фиксированном значении статизма регулирования), а 100 % — за 30 с. При этом предъявляются весьма жесткие требования к системам автоматического регулирования (САР): зона нечувствительности должна иметь возможность оперативной настройки в пределах $\pm(20\text{--}500)$ мГц при статизме 4–6 %. Перечисленные выше требования могут быть выполнены только турбинами с цифровыми регуляторами, имеющими высокую точность отработки отклонений частоты и возможность оперативной настройки параметров управления турбиной. В настоящее время основная часть вводимых энергоблоков с турбинами ЛМЗ оснащаются именно такими САР [1].

Наряду с большими возможностями современных САР паровых турбин для выполнения функций режимного автоматического управления необходимо также отметить эффективность их применения в устройствах противоаварийной автоматики (ПА), в частности в автоматических системах аварийной разгрузки блоков (АСАРБ) мощных энергоагрегатов [2]. Современные АСАРБ турбоагрегатов 200–300 МВт имеют высокие динамические характеристики управления турбинами и осуществляют разгрузку блоков до величины нагрузки собственных нужд и холостого хода за время не более 0,2–0,3 с, что позволяет весьма эффективно задействовать их в схемах частотной делительной автоматики (ЧДА), автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), автоматики деления по сниже-

нию напряжения (АДСН), автоматики разгрузки станций (АРС), автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ). Важно отметить, что в ряде случаев в существующих схемах ПА действия указанных выше автоматических устройств направлены на отключение генераторов от сети, что приводит к тяжелым последствиям: отключенные генераторы могут быть включены в работу лишь спустя значительный промежуток времени (0,5–3 часа). Отключение является тяжелым возмущением не только для турбоагрегата, но и для всей тепловой части энергоблока и приводит к ухудшению показателей работы электростанции и энергосистемы (недоотпуск электроэнергии, увеличение удельных расходов топлива, вызванное работой энергоблока в переменном режиме) [4].

Важным является тот факт, что после действия ПА с использованием АСАРБ блок сохраняется в горячем резерве. В качестве иллюстраций на рис. 1 представлены процессы выделения на собственные нужды блока 215 МВт Псковской ГРЭС при действии частотной делительной автоматики.

Анализ переходных процессов говорит о весьма высоких динамических свойствах системы управления турбиной, позволяющих сохранить режимные параметры сети в допустимых пределах. При этом заброс частоты в переходном процессе составляет не более 2,5 Гц.

В качестве примера на рис. 2 представлена схема, применительно к которой по разработанному авторами алгоритму анализировались переходные процессы при действии ЧДА Киришской ГРЭС с использованием АСАРБ энергоблока № 1.

При действии частотной делительной автоматики турбогенератор с установленной мощностью 300 МВт (Бл. 1) выделяется совместно с генераторами ТЭЦ (Г1–Г4) на район нагрузки мощностью 120–250 МВт (рис. 3).

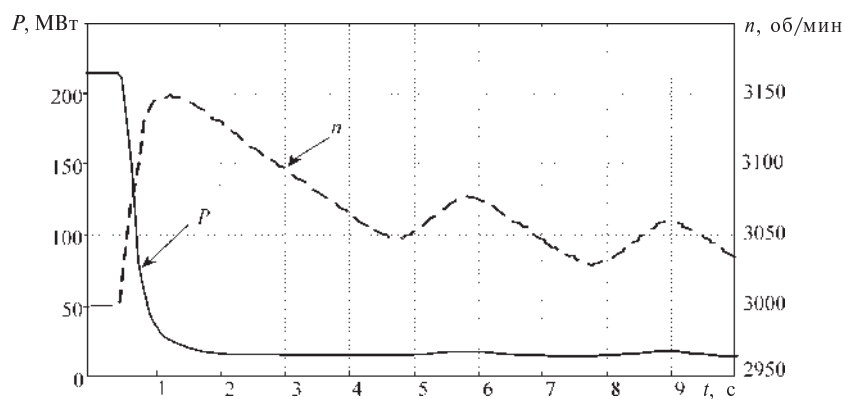


Рис. 1. Работа системы регулирования турбины (натурные испытания)

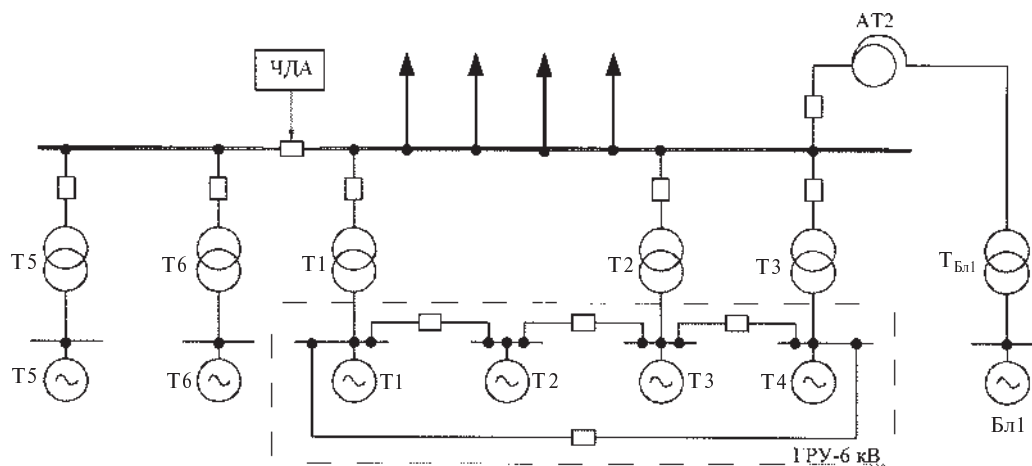


Рис. 2. Упрощенная схема действия ЧДА Киришской ГРЭС после модернизации

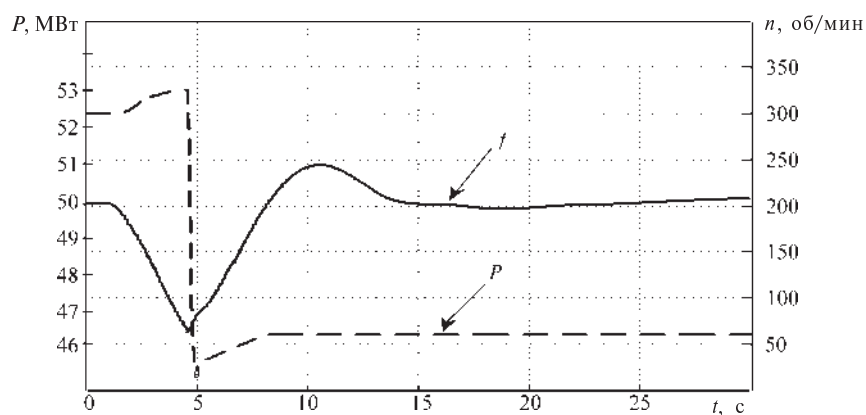


Рис. 3. Переходный процесс выделения генераторов Киришской ГРЭС на район изолированной нагрузки

Как видно из рис. 3, возможность разгрузки энергоблока 300 МВт со скоростью до 1000 МВт/с сопровождается удовлетворительным качеством протекания переходных процессов при забросе частоты не более 1 Гц.

В дополнение к сказанному необходимо отметить, что в рассматриваемой схеме ЧДА с использованием АСАРБ открывается возможность наиболее рационального распределения нагрузки между электростанциями при выполнении требований надежности обеспечения потребителей в соответствии со стандартом ОАО «СО ЕЭС» «Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения частоты при аварийном дефиците активной мощности». Стандарт регламентирует необходимый объем автоматической частотной разгрузки (АЧР), а также требования к частотной делительной автоматике станций. АСАРБ позволяет осуществить разгрузку блоков вплоть до величины мощности собственных нужд и холостого хода. Благодаря этому в схемах ЧДА, осуществляющих выделение генераторов на сбалансированный район и собственные нужды ТЭЦ и КЭС, открывается возможность обеспечить экономичные нормальные (доаварийные) режимы ТЭЦ [2].

Разумеется, сказанное в полной мере может быть отнесено и к автоматическим устройствам деления для снижения напряжения. Важность их реализации на электростанциях подтвердил анализ развития московской аварии 25 мая 2005 года [5]. По результатам этой аварии был сделан ряд выводов, один из которых предусматривает внедрение системы разгрузки или деления с пуском по напряжению, в том числе и для сохранения электро- и теплоснабжения производственных предприятий (особенно с опасными технологиями).

Столь значительные скорости изменения мощности турбин, реализуемые АСАРБ, позволяют также эффективно задействовать импульсную разгрузку турбины (ИРТ) и длительную разгрузку турбины (ДРТ) в схемах АЛАР. В настоящее время действие АЛАР, как правило, направлено на отключение генераторов при возникновении асинхронного режима.

Для сохранения в работе генератора необходимо, чтобы АЛАР фиксировала асинхронный ход в самой ранней фазе его возникновения. Такой алгоритм реализован в цифровом устройстве АЛАР-Ц [3], которые осуществляет выявление асинхронного хода на основе анализа изменения относительного угла δ по следующим условиям (рис. 4):

$$\text{sign}(\delta_{\text{л}}) = \text{sign}\left(\frac{d\delta_{\text{л}}}{dt}\right) = \text{sign}\left(\frac{d^2\delta_{\text{л}}}{dt^2}\right);$$

$$-X_2 \leq X_{\text{ТМН}} \leq X_1;$$

$$U_{\text{ТМН}} < 0,5U_{\text{НОМ}};$$

$$\text{sign}(\delta_{\text{л}}) \neq \text{sign}\left(\frac{dP}{dt}\right).$$

Они могут быть проверены с использованием местной информации о режиме контролируемого (защищаемого) участка сети. Здесь $\delta_{\text{л}}$ — разность фаз (относительный угол) между напряжениями по концам защищаемого участка сети; $X_{\text{ТМН}}$ — реактивное сопротивление участка сети от точки измерений (места установки АЛАР) до точки сети, где напряжение минимально (при возникновении асинхронного хода эта точка превращается в электрический центр качаний); $U_{\text{ТМН}}$ — напряжение в точке минимального на-

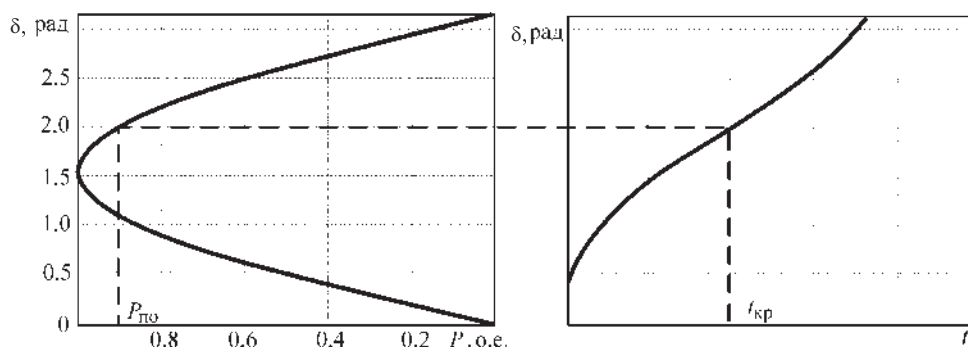


Рис. 4. Диаграмма изменения мощности и относительного угла в начальной фазе асинхронного режима

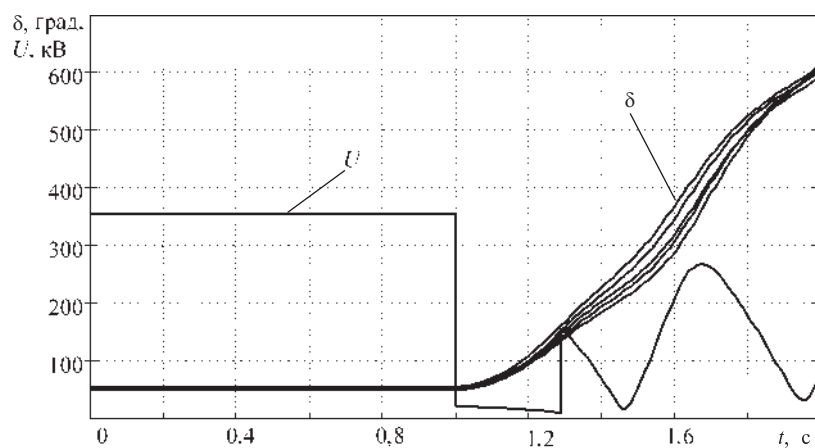


Рис. 5. Нарушение динамической устойчивости параллельной работы генераторов ГРЭС

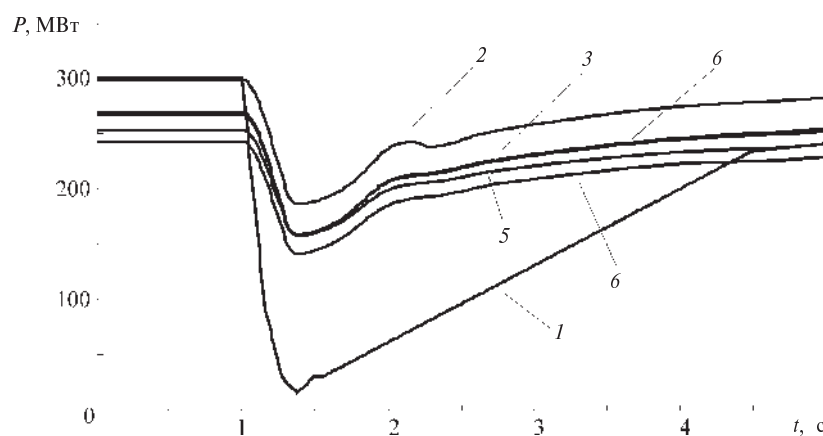


Рис. 6. Изменение механической мощности турбин при КЗ вблизи шин 330 кВ Киришской ГРЭС (цифрами указаны номера соответствующих энергоблоков)

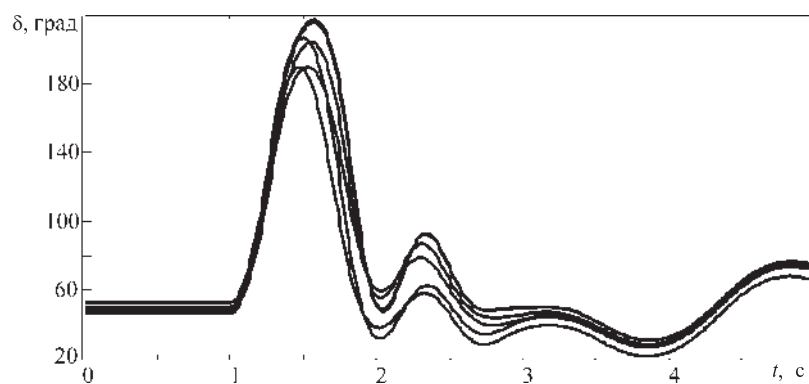


Рис. 7. Изменение абсолютных углов роторов генераторов при КЗ вблизи шин 330 кВ Киришской ГРЭС

пряжения; X_1 , X_2 — уставки, задающие значения реактивных сопротивлений от точки измерений соответственно до начала и конца защищаемого участка сети; P — переток активной мощности по защищаемому участку сети.

В этой связи целесообразно реализовать алгоритм действия АЛАР по следующему принципу:

первая ступень — с направлением действия на ИРТ либо ИРТ совместно с ДРТ (параметры разгрузки определяются расчетом);

вторая ступень — с направлением действия на отключение генератора при недостаточности действия первой ступени;

третья ступень, вступающая в работу в случае сохранения асинхронного режима при недостаточности действия первой и второй ступеней, с направлением действия на отключение линий, по которым возник асинхронный ход.

В качестве подтверждения сказанного на рис. 5 представлены переходные процессы изменения абсолютных углов роторов турбогенераторов Киришской ГРЭС при нарушении устойчивости и возникновении асинхронного хода из-за короткого замыкания (КЗ) вблизи шин

электростанции в ремонтных режимах работы при ослабленной связи станции с энергосистемой. Из рисунка видно что КЗ вблизи шин 330 кВ станции приводит к возникновению асинхронного режима, сопровождающегося глубоким снижением напряжения на шинах 330 кВ станции. При этом для его устранения вполне достаточно применения импульсной разгрузки турбины, как это показано на рис. 6.

Как видно из рис. 6 и 7, применение импульсной разгрузки турбины на одном из шести агрегатов Киришской ГРЭС (кривая 1 рис. 6), а также действие автоматических регуляторов скорости вращения оставшихся агрегатов (кривые 2–6 рис. 6) позволяют сохранить динамическую устойчивость параллельной работы турбогенераторов станции при отсутствии необходимости в ресинхронизации генераторов после тяжелого аварийного возмущения. Так же, как и для АЛАР, реализующей в данном случае принцип действия автоматического управления «ПОСЛЕ», эффективно задействование систем АСАРБ в централизованных автоматиках АПНУ, широко распространенных в энергосистемах, построенных на принципах «ДО».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко, В.В. Электрогидравлические системы автоматического регулирования паровых турбин ЛМЗ для участия в нормированном первичном регулировании частоты и мощности [Текст] / В.В. Лысенко, И.З. Черномзав, А.С. Лисянский [и др.] // Электрические станции. — 2009. — № 2.
2. Артемьев, М.С. Направление совершенствования противоаварийной автоматики энергосистем [Текст] / М.С. Артемьев, А.В. Зайцев, И.В. Кравченко [и др.]; Сев.-Зап. техн. ун-т. // Современные проблемы энергетики: сб. тр. — СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009.
3. Эдлин, М.А. Автоматика ликвидации асинхронных режимов АЛАР-Ц [Текст] / М.А. Эдлин, П.Я. Кац, А.А. Лисицын [и др.] // Электрические станции. — 2005. № 12.
4. Гуревич, Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах [Текст] / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. — М., 1990.
5. Беляев, А.Н. Анализ развития крупных системных аварий [Текст]: учебное пособие / А.Н. Беляев, Ю.П. Горюнов, А.А. Смирнов [и др.]. — СПб.: изд-во СПбГПУ, 2006.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ И МОЩНОСТИ БУКСОВАНИЯ ФРИКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Рассмотренный в традиционных учебниках по расчету и конструированию гусеничных машин (ГМ) [1] и по теории движения ГМ [2, 3] метод оценки мощности буксующего фрикционного элемента управления (ФЭУ) механизма поворота (МП) нуждается в уточнении. Во-первых, следует в явном виде определить диапазон радиусов поворота, реализуемых ГМ посредством данного ФЭУ. Во-вторых, желательно представить выражение мощности двигателя и буксования ФЭУ в виде функции от внешних параметров МП. Внешние параметры понимаются в том смысле, что они являются характеристикой конструкции МП, но не зависят от его конкретной кинематической схемы. Пример такого подхода можно видеть в работе [4].

В представленной статье авторы предлагают подход, позволяющий внести в теорию движения необходимые уточнения.

Будем использовать следующие принятые [2] обозначения и понятия: $O, O_{п1}, O_{п2}$ — центр поворота ГМ и полюса поворота гусениц отстающего и забегающего бортов; ω — угловая скорость поворота ГМ; L — длина опорной поверхности ГМ; V_1 и V_2 — скорости отстающего и забегающего бортов ГМ (рис. 1, а); относительный радиус поворота ρ — отнесенное к ширине колеи расстояние R от центра O поворота ГМ до ее центра масс C ; кинематический параметр q_m механизма поворота — отнесенное к ширине колеи B плечо выноса U точки ГМ, сохраняющей в повороте скорость прямолинейного движения $V_{пр}$; свободный поворот со свободным относительным радиусом ρ_c — поворот ГМ

при отсутствии силы тяги на отстающем борту ($P_1 = 0$, см. рис. 1, б); фиксированный поворот — поворот ГМ с фиксированным (расчетным) относительным радиусом ρ_ϕ при полностью включенном ФЭУ; q_t — силовой фактор механизма поворота — отнесенное к ширине колеи плечо выноса l_t равнодействующей F сил тяги отстающей и забегающей гусеницы, P_1 и P_2 ; X_1, X_2 — силы сопротивления прямолинейному движению; M_c — момент сопротивления повороту.

В работе [2] вопрос об определении мощности буксующего ФЭУ решен применительно к конкретным схемам механизмов. Такой подход затрудняет понимание того факта, что мощность буксующего ФЭУ не зависит от его конкретной кинематической схемы, а определяется только условиями сопротивления движению, геометрией ходовой части и внешними параметрами МП.

На рис. 2 изображена рассматриваемая далее схема МП с фрикционным регулированием радиуса поворота в виде “черного ящика”. МП имеет четыре внешних звена — 1, 2, О и Э. Показаны моменты M_i и скорости вращения ω_i ($i = 1, 2, О, Э$) внешних звеньев. Звенья 1 и 2 связаны с бортовыми передачами отстающего и забегающего бортов с одинаковыми передаточными отношениями. Звено О — ведущее. Например, турбина гидротрансформатора. Скорость его вращения принимается постоянной в любом режиме движения. Звено Э связано с обобщенным элементом управления Э, располагающимся внутри МП. Данный ФЭУ конструктивно вы-

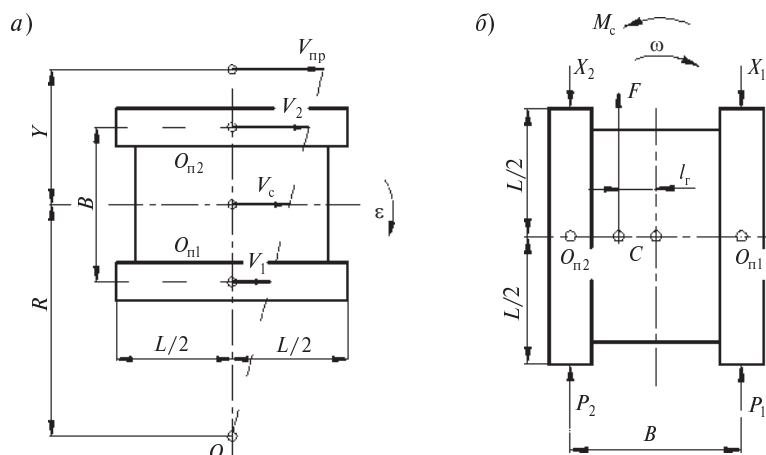


Рис. 1. Кинематические параметры (а) и схема действующих сил (б) гусеничной машины в повороте

полнен либо тормозом, либо блокирующей муфтой. Заметим, что при одновременном включении нескольких ФЭУ буксующим окажется только один (как правило, тот, у которого коэффициент запаса меньше, чем у остальных). Именно этим ФЭУ регулируется радиус поворота.

Передаточное отношение механизма поворота — отношение скорости забегающего борта к скорости отстающего, $u = \omega_2/\omega_1$. При полностью включенном Э в режиме фиксированного поворота передаточное отношение МП характеризуется внешним параметром $u_\phi = \omega_{2\phi}/\omega_{1\phi}$. Здесь $\omega_{1\phi}, \omega_{2\phi}$ — скорости вращения бортов 1 и 2 ГМ при фиксированном (расчетном) повороте. Как правило, внешний параметр u_ϕ известен.

Составляющие МП механизмы связаны любой кинематической схемой и отличаются тем, что их передаточные отношения не зависят от скоростей вращения звеньев. Это могут быть простые и планетарные зубчатые механизмы,

постоянно включенные в повороте фрикционные элементы, а также, возможно, гидрообъемные машины с постоянным в повороте передаточным отношением, силовыми и кинематическими потерями в которых можно пренебречь [4]. Недопустимо наличие гидродинамических передач.

Поворот ГМ, реализуемый при полностью выключенном ФЭУ, определим как неуправляемый поворот. Этот режим поворота противоположен фиксированному, реализуемому при полностью включенном ФЭУ. Как будет видно далее, неуправляемый поворот характеризуется равенством q_r и q_m . Очевидно, что данный ФЭУ обеспечивает поворот гусеничной машины в диапазоне относительных радиусов от фиксированного ρ_ϕ до неуправляемого ρ_n . В зависимости от конкретного МП и рассматриваемого ФЭУ ρ_ϕ может как превосходить ρ_n , так и быть меньше его. Следует заметить, что понятия неуправляемого и свободного поворота различны. Как будет показано далее, лишь в частном случае — МП с бортовым управлением поворотом ($q_m = 0,5$) — неуправляемый поворот совпадает со свободным.

В качестве внешнего параметра введем понятие передаточного отношения МП при остановленном ведущем звене и полностью выключенном ФЭУ Э:

$$u_0 = \left. \frac{\omega_2}{\omega_1} \right|_{\omega_0=0}.$$

К моменту буксования рассматриваемого ФЭУ МП имеет две степени свободы, так как все элементы управления, помимо ФЭУ Э, пол-

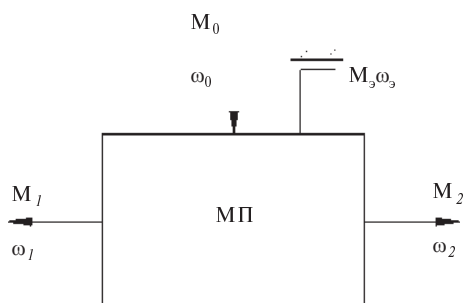


Рис. 2. Схема МП с фрикционным регулированием радиуса поворота



ностью включены. Скорости вращения любого звена, в том числе и звена О, в случае двустепенного МП являются линейной функцией скоростей вращения двух звеньев. Пусть это будут скорости вращения звеньев 1 и 2:

$$A_0\omega_0 = A_1\omega_1 + A_2\omega_2.$$

Здесь A_0, A_1, A_2 — зависящие от конструкции МП постоянные, подлежащие определению:

$$u_0 = \frac{\omega_2}{\omega_1} \bigg|_{\omega_0=0} = -\frac{A_1}{A_2};$$

следовательно, $A_1 = -u_0 A_2$.

С учетом постоянства скорости вращения звена О

$$\omega_2 - u_0\omega_1 = (A_0/A_1)\omega_0 = \text{const.} \quad (1)$$

В частности,

$$\omega_2 - u_0\omega_1 = \omega_{2\phi} - u_0\omega_{1\phi}; \quad (2)$$

$$\omega_2 - u_0\omega_1 = \omega_{\text{пр}}(1 - u_0). \quad (3)$$

В последнем равенстве $\omega_{\text{пр}}$ — скорость вращения обоих бортов, соответствующая линейной скорости $V_{\text{пр}}$ движения ГМ до входа в поворот.

Покажем связь между введенным внешним параметром u_0 и традиционной характеристикой МП — кинематическим параметром q_M .

Из подобия треугольников (см. рис. 1, а) следует

$$\frac{V_{\text{пр}} - V_1}{V_2 - V_1} = \frac{Y + B/2}{B},$$

или

$$\frac{\omega_{\text{пр}} - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{q_M + 0,5}{1}.$$

С учетом (3) получим

$$q_M = \frac{1(1 + u_0)}{2(1 - u_0)}. \quad (4)$$

Обратная связь определяется выражением

$$u_0 = \frac{q_M - 0,5}{q_M + 0,5}. \quad (5)$$

Так, для МП с бортовым управлением поворотом $u_0 = 0$, поскольку забегающий борт жестко связан с остановленным (только для определения u_0) двигателем ($\omega_2 = 0$). Дифференциальные МП

характеризуются равенством $u_0 = -1$. Соответственно выражению (4) кинематические параметры принимают известные значения $q_M = 0,5$ и $q_M = 0$. Для МП на основе несимметричных дифференциалов (группа механизмов типа Зайчика — Крейнса, или ЗК) передаточное отношение забегающего борта, связанного с водилом планетарного механизма (параметр механизма принят равным -2), к эпициклу, связанному с отстающим бортом, равно $2/3$. Кинематический параметр такого МП согласно (4) $q_M = 2,5$.

Следует отметить, что правая часть (4) лишь знаком отличается от выражения относительно радиуса поворота r . Индекс 0 при u_0 указывает на поворот при заторможенном двигателе (посредством приложения сил извне):

$$q_M = -\rho_0.$$

Например, для ГМ с дифференциальными МП такой поворот будет происходить вокруг центра масс, а для ГМ с бортовыми МП — вокруг заторможенного забегающего борта $\rho_0 = -0,5$.

Перейдем к определению потребной мощности двигателя.

В рассматриваемом случае, когда передаточные отношения составляющих МП механизмов независимы от скоростей вращения их звеньев, вектор моментов ортогонален вектору угловых скоростей. Это иллюстрируется тем, что в уравнения силового анализа при принятых ранее ограничениях на используемые механизмы не входят угловые скорости звеньев и, наоборот, в уравнениях кинематики не присутствуют моменты. Воспользуемся свойством ортогональности векторов

$$M_1\omega_1 + M_2\omega_2 + M_0\omega_0 + M_3\omega_3 = 0. \quad (6)$$

Данное равенство справедливо при любых скоростях вращения звеньев, допустимых данным МП, в частности при скоростях вращения звеньев, характерных для фиксированного поворота:

$$M_1\omega_{1\phi} + M_2\omega_{2\phi} + M_0\omega_0 + M_3\omega_{3\phi} = 0. \quad (7)$$

Здесь нагрузки M_i ($i = 1, 2, 0, 3$) — нагрузки звеньев при движении с текущим относительным радиусом ρ .

Поскольку $\omega_{3\phi} = 0$, получим $M_0\omega_0 = -(M_1\omega_{1\phi} + M_2\omega_{2\phi})$. Знак “—” указывает направление потока мощности. Получим без учета потерь до МП

выражение мощности двигателя, потребной для поворота с текущим относительным радиусом ρ :

$$N_{дв} = M_1 \omega_{1\phi} + M_2 \omega_{2\phi}. \quad (8)$$

Здесь функцией от ρ являются нагрузки отстающего и забегающего бортов. Данное равенство показывает, что необходимым условием рекуперации мощности отстающего борта является условие $\omega_{1\phi} \neq 0$, предъявляемое к конструкции МП.

Мощность, рассеиваемую в ФЭУ МП при повороте с относительным радиусом ρ , получим вычитанием равенства (7) из равенства (6):

$$M_3 \omega_3 = M_1 (\omega_{1\phi} - \omega_1) + M_2 (\omega_{2\phi} - \omega_2).$$

С учетом (2) данное выражение приводится к виду

$$N_3 = (M_1 + u_0 M_2) (\omega_{1\phi} - \omega_1). \quad (9)$$

Как видно, величина мощности N_3 , рассеиваемой в ФЭУ Э, обращается в нуль, если равен нулю любой из двух сомножителей, заключенных в скобки. Случай $(\omega_{1\phi} - \omega_1) = 0$ соответствует фиксированному повороту. Рассмотрим, при каких условиях выполняется равенство $(M_1 + u_0 M_2) = 0$.

Запишем равенство (6) для нагрузок, характерных для неуправляемого поворота и скоростей вращения звеньев, допускаемых МП при остановке двигателя:

$$M_{1н} \omega_{10} + M_{2н} \omega_{20} + M_{0н} \omega_{00} + M_{эн} \omega_{э0} = 0.$$

Здесь $M_{1н}$, $M_{2н}$, $M_{0н}$, $M_{эн} = 0$ — нагрузки при движении по радиусу R_n , а ω_{10} , ω_{20} , $\omega_{00} = 0$, $\omega_{э0}$ — скорости вращения звеньев, соответствующие радиусу R_0 , получаемому при повороте ГМ при заторможенном ведущем звене МП (остановлен двигатель).

Поскольку $M_{0н} \omega_{00} = 0$ и $M_{эн} \omega_{э0} = 0$, получаем

$$M_{1н} = -u_0 M_{2н}. \quad (10)$$

Таким образом, для случая неуправляемого поворота $N_3 = 0$. В частности, при $u_0 = 0$ (МП с бортовым управлением поворотом) в неуправляемом повороте $M_{1н} = 0$. Таким образом, доказано, что в данном частном случае неуправляемый поворот совпадает со свободным.

Итак, мощность элемента управления (9) обращается в нуль при фиксированном и при неуправляемом повороте, что подтверждает первоначальное утверждение. Эти два режима определяют диапазон регулирования поворота ГМ посредством данного ФЭУ Э.

Следуя традиции теории движения ГМ, предполагаем, что эпюра давлений на грунт равномерна по длине и ширине гусеницы, а боковые силы пропорциональны вертикальной нагрузке. В этом случае можно использовать достаточно простые зависимости для определения значения момента сопротивления повороту и потребных сил тяги:

$$M_c = \mu GL/4; P_{1,2} = X_{1,2} \mp M_c/B.$$

В этих формулах μ — коэффициент сопротивления повороту [1, 2]; f — коэффициент сопротивления качению [1, 2]; G — вес ГМ. Очевидно, что $X_1 = X_2 = f G/2$.

Для неуправляемого поворота равенство (10) принимает вид

$$fG/2 - \mu_n GL/4B = -u_0 (fG/2 - \mu_n GL/4B),$$

откуда с учетом (4)

$$\mu_n = 4q_m f B/L.$$

Здесь μ_n — значение коэффициента сопротивления повороту, соответствующее относительному радиусу неуправляемого поворота ρ_n . Сравнение данного выражения с выражением для силового фактора [2] подтверждает первоначальное утверждение о равенстве q_t и q_m при неуправляемом повороте.

Связать эти величины в первом приближении позволяет использовать в теории движения

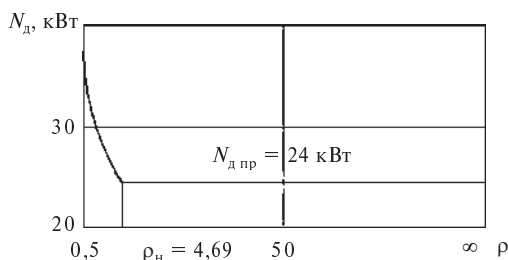


Рис. 3. Потребная мощность двигателя и мощность, рассеиваемая на тормозе механизма поворота типа ЗК ($N_{дпр}$ — потребная мощность двигателя при прямолинейном движении; ρ_n — относительный радиус неуправляемого поворота)

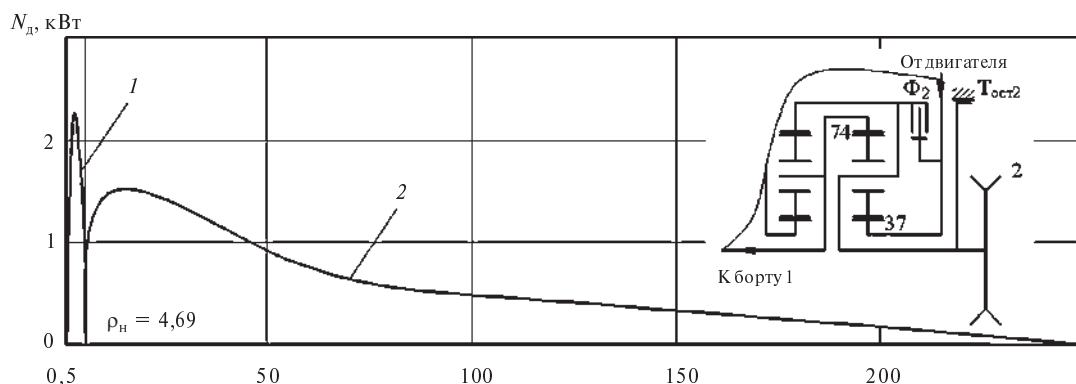


Рис. 4. Потребная мощность двигателя и мощность, рассеиваемая на фрикционных элементах управления механизма поворота типа ЗК
(1 — мощность, рассеиваемая на тормозе $T_{ост2}$;
2 — мощность, рассеиваемая на фрикционе Φ_2)

ГМ эмпирическая зависимость, предложенная А.О. Никитиным [1–3]:

$$\mu = \mu_{\max} / (0,925 + 0,15\rho).$$

Значение μ_{\max} получают при повороте ГМ вокруг заторможенной гусеницы, т. е. при $\rho = 0,5$.

Проиллюстрируем применение изложенной методики на примере поворота ГМ массой 10 т с длиной опорной поверхности 3 м и шириной колеи 2,5 м. Скорость прямолинейного движения 7 м/с соответствует среднестатистической скорости поворота транспортной ГМ. Заданы значения внешних сопротивлений $f = 0,2$ и $\mu_{\max} = 0,8$. На рис. 3, 4 показаны результаты расчетов для случая использования в качестве МП механизма на основе несимметричных дифференциалов (механизм ЗК) при $q_m = 2,5$.

Таким образом, потребную мощность двигателя при повороте ГМ и мощность, рассеиваемую

на буксующем ФЭУ, удастся определить с помощью внешних параметров МП, не прибегая к детальному анализу кинематической схемы трансмиссии. Процесс определения мощностей упрощен и формализован по сравнению с подходами, используемыми в традиционных источниках [1–3].

Представленные теоретические положения применены при анализе как традиционно используемых МП, так и многопоточных дифференциальных МП зарубежных ГМ и ходовых макетов. Опыт применения показывает их универсальность и практическую целесообразность. Методика, базирующаяся на изложенных положениях, используется в учебном процессе на кафедре колесных и гусеничных машин ГОУ СПбГПУ в курсе “Теория движения многоцелевых колесных и гусеничных машин” и может быть рекомендована для применения в научных и учебных целях в других организациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов, Н.А. Расчет и конструирование гусеничных машин [Текст] / Н.А. Носов, В.Д. Галышев, Ю.П. Волков, А.П. Харченко. — Л.: Машиностроение, 1972. — 560 с.
2. Забавников, Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин [Текст] / Н.А. Забавников. — М.: Машиностроение, 1975. — 448 с.
3. Сергеев, Л.В. Теория танка [Текст] / Л.В. Сергеев. — М.: Изд-во Академии бронетанковых войск, 1973. — 492 с.
4. Шеломов, В.Б. Нагрузка гидрообъемной передачи механизма поворота транспортной машины [Текст] / В.Б. Шеломов; Санкт-Петербургский политехнич. университет // Труды СПбГТУ. 1997. № 465. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — С. 86–88.

УДК 621.892

А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, Е.С. Васильева,
О.В. Толочко, М.Ю. Максимов

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ МОДИФИКАТОРОВ ТРЕНИЯ

Наряду с новыми нелегированными смазочными материалами широкое распространение на рынке получают смазочные композиции, содержащие присадки конкретного функционального назначения: кондиционеры металлов, реметаллизанты (восстановители), металлы и бинарные сплавы, различные химические соединения [1, 4] и др.

Особое место среди присадок занимают так называемые “модификаторы трения” [2], состоящие из мелкодисперсных частиц различных веществ, возникших естественным образом либо полученных искусственным путем. Легирование любого смазочного материала S (базовый смазочный материал) мелкодисперсными частицами модификатора трения p приводит к образованию смазочной композиции $\langle S; p \rangle$, определенным образом отличающейся по составу и основным трибологическим характеристикам от исходного материала. В связи с этим возникает необходимость определения и аналитического сравнения трибологических характеристик базовых смазочных материалов и полученных на их основе композиций.

Методика исследования

Определение основных трибологических характеристик базового смазочного материала S и смазочных композиций, полученных посредством его легирования мелкодисперсными частицами модификаторов трения, осуществляется на четырехшариковой машине трения ЧШМ–3,2 (рис. 1) в соответствии с ГОСТ 9490–75 в условиях трения скольжения.

Осевая нагрузка, прилагаемая к шарикам вдоль оси шпинделя, удовлетворяет нестрогим неравенствам $130 \text{ Н} \leq P \leq 10000 \text{ Н}$. Нагрузка реализуется дискретно, число ступеней — $k_{\text{сн}} = 39$. Частота вращения шпинделя в процессе испытания составляет $v_{\text{шп}} = 430 \text{ мин}^{-1}$. Объем испытуемого смазочного материала, наполняющего емкость для нижних шариков, равен $V_{\text{см}} = 6 \text{ см}^3$. Элементами исследуемой пары трения являются шарики подшипников (ГОСТ 3722), выполненные из материала Сталь ШХ15, диаметром $d_{\text{ш}} = (12,70 \pm 0,01) \text{ мм}$.

Для исследования берется набор смазочных композиций $\{CK_a\}$, где $a = 0, 1, 2, \dots, a_k$, CK_0 —

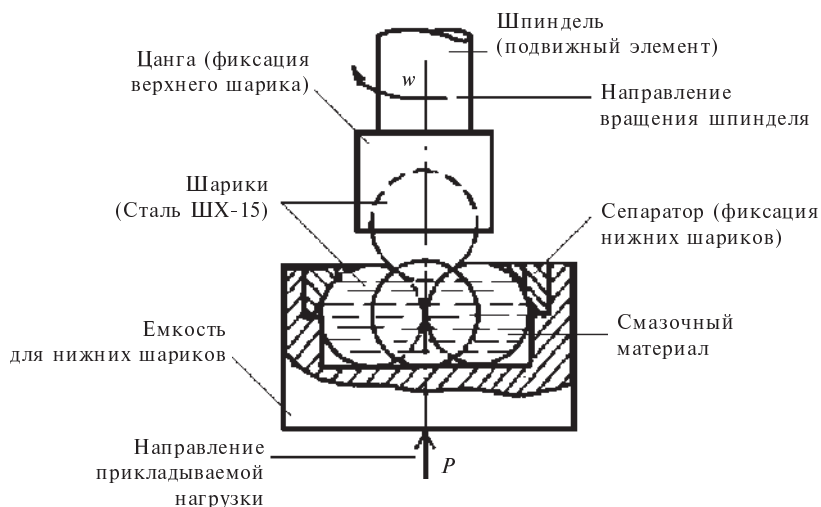


Рис. 1. Схема основных элементов узла трения машины ЧШМ–3,2



базовое масло. Модификаторы трения в смазочных композициях могут отличаться по химическому составу, размеру частиц ($d_{qb} \{b=1, 2, \dots, b_k\}$ — ряд размеров частиц) и (или) концентрации в базовом смазочном материале ($c_{чс} \{c=1, 2, \dots, c_k\}$ — ряд концентраций частиц).

Исследования осуществляются согласно алгоритму, включающему определение следующего:

1) противозадирных свойств (по индексу задира I_3) и предельной нагрузочной способности (по нагрузке сваривания P_c);

2) несущей способности (по критической нагрузке P_k);

3) противоизносных свойств (по показателю износа $D_{и}$).

Испытания на индекс задира исследуемых смазочных материалов проводятся в соответствии с ГОСТ 9490–75 [3].

Из ряда нагрузок $l \{P_\alpha\}$ ($\alpha=1, 2, \dots, 23$) выбирают набор смежных нагрузок $\{P_\beta\}$ ($1 \leq \beta \leq 23$), элементы которого перенумеровывают, располагая в порядке монотонного возрастания и получая набор $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$). Длительность испытания при фиксированной нагрузке из набора составляет $\Delta t_{И_3} = (10, 0 \pm 0, 2)$ с. С использованием микроскопа “Прима-эксперт” измеряют длину $l_{i,j}(CK_a)$ и ширину $h_{i,j}(CK_a)$ j -го пятна износа ($j=1, 2, \dots, 6$) при i -й нагрузке, образованного в процессе испытания смазочного материала CK_a (рис. 2).

Диаметр j -го пятна износа для композиции CK_a при i -й нагрузке определяется как среднее арифметическое:

$$d_{i,j}(CK_a) = \frac{l_{i,j}(CK_a) + h_{i,j}(CK_a)}{2}. \quad (1)$$

Средний диаметр пятен износа при этом равен

$$d_i(CK_a) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 d_{i,j}(CK_a). \quad (2)$$

Согласно ГОСТ 9490–75 ряду нагрузок l поставлен во взаимно однозначное соответствие ряд значений предельного износа: $d_{пра} = d_{ра} + 0,15$ мм. Таким образом, для выбранного набора нагрузок

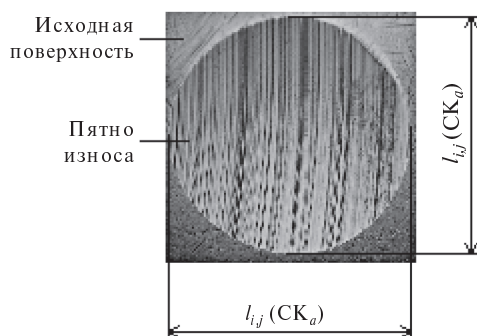


Рис. 2. Внешний вид пятна износа шарика после испытания на ЧШМ–3,2

$$d_{при} = d_{ri} + 0,15 \text{ мм}, \quad (3)$$

где d_{ri} , мм — диаметр зоны упругой деформации шариков по Герцу при нагрузке P_i , Н (кГс).

Условная нагрузка, соответствующая осевой нагрузке P_i при испытании смазочного материала CK_a , находится из соотношения

$$Q_i(CK_a) = P_i \frac{d_{ri}}{d_i(CK_a)}. \quad (4)$$

Индекс задира вычисляется по формуле

$$I_3(CK_a) = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} Q_i(CK_a)}{s-1}, \quad (5)$$

где s — порядковый номер нагрузки, при которой происходит процесс сваривания шариков; $(s-1)$ — номер предшествующей нагрузки.

Для систематизации исходных и экспериментальных данных (при определении противозадирных свойств и предельной нагрузочной способности) используется табл. 1.

Критическая нагрузка $P_k(CK_a)$ определяется посредством выбора, основанного на комплексе условий:

$$P_i = P_k(CK_a) \Leftrightarrow \begin{cases} d_i(CK_a) < d_{ri} + 0,15 \text{ мм}, \\ d_{i+1}(CK_a) - d_i(CK_a) > 0,1 \text{ мм}. \end{cases} \quad (6)$$

Данные для выбора и значение $P_k(CK_a)$ заносятся в табл. 2.

Испытания для определения показателя износа $D_{и}$, мм осуществляются при осевой нагрузке $P = 20 \text{ кГс} = \text{const}$ для пластичных смазочных материалов и при нагрузке $P = 40 \text{ кГс} = \text{const}$

Таблица 1

Определение индекса задира и нагрузки сваривания
для композиции СК_a (a = 0, 1, 2, ..., a_k)

Номер опыта	P, Н (кГс)	d _j (СК _a), мм (j = 1, ..., 6)	d _i (СК _a), мм	d _{пр} , мм	P _i d _г , Н·мм	Q _i (СК _a), Н
1	P ₁	d _{1,1} , ..., d _{1,6}	d ₁	d _{пр1}	P ₁ d _{г1}	Q ₁
2	P ₂	d _{2,1} , ..., d _{2,6}	d ₂	d _{пр2}	P ₂ d _{г2}	Q ₂
...
s - 1	P _{s-1} (СК _a)	d _{s-1,1} , ..., d _{s-1,6}	d _{s-1}	d _{прs-1}	P _{s-1} d _{гs-1}	Q _{s-1}
s	P _s (СК _a)	Процесс сваривания				
Индекс задира						I ₃ (СК _a)

Таблица 2

Значение P_к(СК_a) и исходные данные для ее определения

Номер опыта	P, кГс	d _j (СК _a), мм (j = 1, ..., 6)	d _i (СК _a), мм	P _к (СК _a), кГс
i	P _i	d _{i,1} , ..., d _{i,6}	d _i	P _i
i + 1	P _{i+1}	d _{i+1,1} , ..., d _{i+1,6}	d _{i+1}	

в случае жидких смазочных материалов. Длительность испытаний на износ составляет $\Delta t_{D_{и}} = (60,0 \pm 0,5)$ минут при указанных нагрузках. Количество проводимых испытаний в границах данной методики $k_{исп} = 2, j = 1, 2, \dots, 6$. Диаметр j-го пятна износа для композиции СК_a определяется по формуле (1). Показатель износа $D_{и}(СК_a)$ вычисляется аналогично выражению (2):

$$D_{и}(СК_a) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 d_j(СК_a). \quad (7)$$

Для систематизации исходных и экспериментальных данных (при определении противозносных свойств) используют определенного вида таблицу (табл. 3).

Таблица 3

Значение D_и(СК_a) и исходные данные
для его определения

Номер опыта	d _j (СК _a), мм (j = 1, ..., 6)	D _и (СК _a), мм
1	d ₁ , d ₂ , d ₃	D _и
2	d ₄ , d ₅ , d ₆	

На основании данных таблиц 1, 2 и 3 в ограниченной конечной области первого квадранта прямоугольной декартовой системы координат строят экспериментальные графики и точки.

Проведение исследования

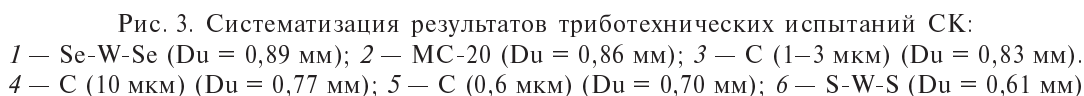
Для исследования был принят набор из шести смазочных композиций (a_k = 6) — 1) базовый смазочный материал СК₀: МС–20; 2) СК₁: МС–20; С(1 %; 0,6 мкм);¹ 3) СК₂: МС–20; С(1 %; 1–3 мкм); 4) СК₃: МС–20, С(1 %; 10 мкм); 5) композиция с дисульфидом вольфрама СК₄: МС–20, WS₂(1 %; 40 нм); 6) композиция с диселенидом вольфрама СК₅: МС–20; WSe₂(1 %; 60×5 нм).

Из ряда нагрузок l выбрали следующий набор, расположив его элементы в монотонно возрастающей последовательности:

$$\{P_i\}_{i=1,2,\dots,s} =$$

¹С — сокращение названия природной горной породы “серпентинит”, используемой в качестве порошкообразной присадки к смазочным материалам. В скобках указана концентрация присадки в смазочном материале и средний размер ее мелкодисперсных частиц.

$$d_5(P) = \begin{cases} 0,0042P + 0,115 & \text{при } P \in [20; 79], \\ 0,0105P - 0,408 & \text{при } P \in (79; 100], \\ 4,192 - \frac{355,043}{P} & \text{при } P \in (100; 141], \\ 0,0113P + 0,07 & \text{при } P \in (141; 200]. \end{cases} \quad (13)$$



Из приведенных графиков и уравнений видно, что на отрезке $P \in [20; 79]$ при испытании всех смазочных материалов получены равные и близкие по размерам пятна износа. На интервале $P \in (79; 100]$ выполнено сравнение пятен износа после испытания СК и базового масла с использованием формулы

$$S_n(P) = \frac{d_0(P) - d_n(P)}{d_0(P)} 100\% \quad (n=1, 2, \dots, 5). \quad (14)$$

На основании этого сравнения выявлено, что исследованные смазочные композиции уменьшают пятно износа при нагрузках $P \in (79; 100]$ в разной степени, а именно:

Смазочная композиция	Диапазон уменьшения пятна износа, %
СК ₁	$S_1 = 8-14$ (в среднем 11)
СК ₂	$S_2 = 3-14$ (в среднем 8)
СК ₃	$S_3 = 12-21$ (в среднем 16)
СК ₄	$S_4 = 16-50$
СК ₅	$S_5 = 12-76$

За границами полуинтервала $P \in (79; 100]$ функция (8) не определена, поэтому сравнение по (14) не реализуется.

Располагая полученные значения “индекса задира” в порядке возрастания (в виде последовательности), получаем

$$\{I_3(C(10 \text{ мкм}); I_3(C(0,6 \text{ мкм}); I_3(C(1-3 \text{ мкм}); I_3(WS_2); I_3(MC-20); I_3(WS_2))\} = \{35,32; 35,77; 35,8; 36,77; 36,845; 44,237\}, \text{ кГс}$$

Элементы правой части равенства равны соответствующим (по номерам) элементам левой его части. Лучшие противозадирные свойства смазочных композиций с дихалькогенидами подтверждаются также визуальными исследованиями (рис. 4).

Фотографии изношенных участков поверхностей верхних шариков сделаны после испытаний при нагрузках, предшествующих процессу сваривания пирамиды из четырех шариков.

При сравнении нагрузок сваривания для СК с нагрузкой сваривания для МС-20 выявлено, что смазочные композиции увеличивают нагрузку сваривания относительно базового масла следующим образом.

Значения критической нагрузки для всех исследуемых смазочных материалов оказались одинаковыми:

$$P_k(MC-20) = P_k(\text{серпентинит}) = P_k(WS_2) = P_k(WS_2) = 79 \text{ кГс}.$$

Располагая значения показателя износа в порядке убывания, имеем

$$\{D_n(WS_2); D_n(MC-20); D_n(C(1-3 \text{ мкм}); D_n(C(10 \text{ мкм}); D_n(C(0,6 \text{ мкм}); D_n(WS_2))\} = \{0,89; 0,86; 0,83; 0,77; 0,70; 0,61\} \text{ мм}.$$

Элементы правой части равенства равны соответствующим (по номерам) элементам левой его части.

Проведенные исследования показали следующее.

Смазочные композиции с серпентинитом уменьшают пятно износа при кратковременных испытаниях на 8–16 %; СК с дисульфидом вольфрама — в среднем на 33 %; СК с диселенидом вольфрама — в среднем на 44 %.

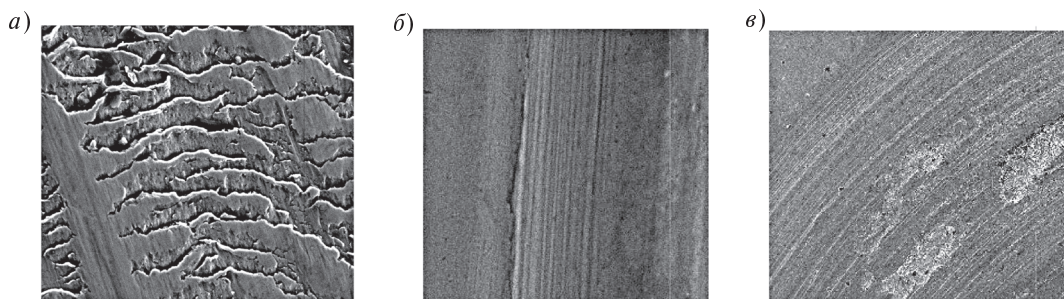


Рис. 4. Результаты визуальных исследований:
а — МС-20 + Серпентинит, $P = 112 \text{ кГс}$; б — МС-20 + WS_2 , $P = 126 \text{ кГс}$;
в — МС-20 + WSe_2 , $P = 200 \text{ кГс}$



Смазочные композиции СК₁, СК₂, СК₃, СК₄ имеют меньшие индексы задира, чем базовое масло. Индексы задира смазочных композиций с серпентинитом отличаются друг от друга незначительно. Индекс задира композиции СК₅ на 16 % больше, чем у базового масла.

Полученные смазочные композиции имеют более высокую предельную нагрузочную способность, чем базовый смазочный материал.

Мелкодисперсные частицы исследуемых модификаторов трения не оказали существенного влияния на несущую способность масла.

Смазочные композиции с серпентинитом и композиция с дисульфидом вольфрама способствовали уменьшению пятна износа при часовых испытаниях относительно базового масла, а смазочная композиция с диселенидом вольфрама способствовала увеличению пятна износа на 3 %, т. е. несущественно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Погодаев, Л.И.** Повышение надежности трибосопряжений [Текст] / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко; Академия транспорта Российской Федерации. — СПб., 2001. — 304 с.: ил.

2. **Шимченко, П.** Каменные ключи прогресса [Текст] / П. Шимченко, А. Фельдман; НТО КИ // Инициатива. — 1994. № 1. С. 16–18.

3. **ГОСТ 9490–75.** Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения триболо-

гических характеристик на четырехшариковой машине [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 14 с.

4. **Васильева, Е.С.** Газофазный синтез дисперсных частиц дисульфида вольфрама и их применение [Текст] / Е.С. Васильева, М.Б. Игнатьев, Е.П. Ковалев, Д.В. Ли; Новгород. гос. университет // Вестник НГУ. Сер.: Физика и механика материалов. — 2009. № 50. — С. 7–10.

УДК 621.452.3

Н.А.Шарова, А.А.Живушкин, Е.А.Тихомирова

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЯЕМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИНЫ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Базовая конструкция авиационных двигателей (АД) в ближайшей перспективе, как предполагается, изменяться не будет; это касается и турбинной части. Тем не менее характеристики АД будут улучшаться благодаря совершенствованию методов проектирования, материалов и непрекращающемуся прогрессу в производственно-технологической области.

Жесткая конкуренция между авиадвигателестроителями заставляет делать упор на снижение стоимости и времени производственного цикла, а параллельно — и на повышение качества.

Основные разработчики авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) стремятся найти новые пути к снижению стоимости собственных разработок и параллельно улучшить характеристики двигателей. Эти цели достигаются совер-

шенствованием конструкции, материалов и оптимизацией производственного процесса. Сегодня новые двигатели разрабатываются с акцентом на минимизацию стоимости производства, например за счет уменьшения количества деталей. Это ставит новые задачи для материаловедческих и производственных технологий.

Создание качественно новых ГТД невозможно без повышения температуры газа перед турбиной. В малоразмерных двигателях это особенно затруднительно в связи с малыми размерами проточной части и, следовательно, лопаточного аппарата. Технологические сложности с охлаждением сопловых и рабочих лопаток заставляют конструкторов совместно с материаловедами и технологами искать новые пути изготовления этих деталей. Помимо традиционных жаропроч-

ных и жаростойких металлических материалов, обуславливающих развитие системы охлаждения и применение теплозащитных и антикоррозионных покрытий, ведется поиск и разработка неметаллических материалов на керамической и углеродной матрицах, способных к работе без охлаждения в агрессивной высокотемпературной газовой среде.

Работы по созданию керамических элементов в турбине ведутся во всем мире с начала 1960-х годов. Разработано огромное количество видов и способов изготовления керамики. Выполнено множество обнадёживающих автономных испытаний и представлено большое число проектов двигателей. Однако реальные испытания полноразмерных керамических двигателей — единичны, и во всех этих испытаниях выявлено множество проблемных вопросов по технологии, конструкции, качеству изготовления и т. п.

Исследования, выполненные отечественными и зарубежными фирмами, показывают, что применение керамических материалов приводит к значительному снижению массы двигателей, улучшению приемистости, снижению расхода воздуха на охлаждение деталей, снижению неравномерности поля температур, повышению КПД цикла и т. д. Конструкционные керамические материалы и керамокомпозиты имеют малую удельную массу ($2,5\text{--}3,2\text{ г/см}^3$), обладают высокой жаропрочностью и жаростойкостью. Предел прочности керамики (в основном на основе нитрида и карбида кремния) при высоких рабочих температурах довольно высок, а пластическая деформация за 500 ч работы не превышает 1 % при очень высокой термостойкости.

На сегодняшний день в России и за рубежом проводятся более глобальные исследования, составляются сложные композиции на основе керамических и углеродной матриц. Самые обширные работы в этой области ведут американские лаборатории под управлением и по заказу NASA. Эти исследования являются продолжением последней и самой крупной программы, одной из главных целей которой была разработка материалов для АГТД ИНРТЕТ. Результаты исследований проходят экспериментальную проверку в исследовательских лабораториях NASA.

Благодаря существенному влиянию размерности двигателя на выбор параметров и конструкцию двигателя, а также дополнительным технологическим ограничениям малоразмерные

ГТД выделяют в особый класс. В этом типе ГТД чрезвычайно значительно влияние вторичных потерь, всевозможных утечек, уступов и т. п. факторов, в значительной степени определяющих экономическую эффективность. Именно поэтому лопатки МГТД первых поколений выполнялись неохлаждаемыми.

Современные лопатки турбин эксплуатирующихся МГТД изготавливаются из металлических материалов, причем максимальная температура газа на серийном двигателе — 1650 К (на модификации двигателя Т700—СТ7/8). Разработанные металлические материалы (рис. 1) пока не позволяют выполнить неохлаждаемую лопатку на такие температуры, поэтому конструкторам приходится делать нелегкий выбор: проектировать высокотемпературный двигатель с развитой системой охлаждения (что не всегда возможно) либо создавать двигатель на умеренные температуры газа с неохлаждаемым лопаточным аппаратом.

МГТД первого (1955—65 годы) и второго (1965—77 годы) поколений имели неохлаждаемый лопаточный аппарат. Охлаждение появляется только в двигателях третьего поколения (1977—92), к которым относятся и Т700/СТ7. Также приблизительно к началу 90-х годов уже появились жаропрочные лопаточные никелевые “суперсплавы” направленной кристаллизации и шла отработка изготовления деталей с монокристаллической структурой. К середине 90-х годов были получены практически все применяемые сегодня материалы и достигнуты современные уровни эксплуатационных температур. Из рис. 1 видно, что эволюция лопаточных материалов, шедшая сначала “семимильными” шагами — по $100\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$ за десятилетие, в наши дни резко затормозилась. Это связано с тем, что практически достигнуты предельные температуры, и температурная возможность расширения условий эксплуатации классических жаропрочных сплавов на никелевой и кобальтовой основах исчерпана.

Среди новых материалов и структур сегодня рассматриваются две многообещающие группы перспективных материалов для будущих поколений двигателей: композиты, армированные волокнами, и монокристаллы интерметаллидных материалы. Не секрет, что по поводу двигательных материалов существуют различные мнения (даже внутри компаний) об их перспективах. Даже для

[illegible]

новых материалов, которые по уверенным прогнозам придут на замену традиционным, не вполне понятны сроки введения в эксплуатацию. Ясно, однако, что в ближайшем будущем общепринятые литейные и деформируемые титановые и никелевые сплавы останутся доминирующими.

Последние два десятилетия развивается применение интерметаллидных соединений — материалов на основе химического соединения двух или более металлов. Наиболее распространены алюминиды, а также проводятся эксперименты с титанидами и с другими основами.

В России более активно пытаются применить алюминиды никеля в связи с тем, что их температурные возможности выше, чем у классических сплавов (см. таблицу и рис. 2) [1].

За рубежом упор делают на алюминиды титана [3, 4], заменяя ими тяжелые жаропрочные

материалы на никелевой основе, из которых изготавливаются последние ступени КВД и ТНД, работающие при температурах до 700–750 °С. Получается несомненный выигрыш в массе, так как даже самые “легкие” жаропрочные никелевые сплавы имеют удельный вес 7,9 г/см², а алюминиды титана в зависимости от композиции — 3,6–5,3 г/см². Кроме того, они пожаробезопасны, в отличие от “классических” титановых сплавов, при температурах до 750 °С. Однако при всех своих температурных и других преимуществах интерметаллиды титана имеют ряд недостатков. Они обладают низкой технологичностью в металлургическом производстве и достаточно низкими пластичностью и надежностью. Проводятся дальнейшие эксперименты с введением в состав интерметаллидов молибдена, ниобия и других соединений и элементов. Получен сплав на

Марка сплава	Прочность, МПа, при разных температурах и длительности воздействия						Предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, МПа		
	1100 °С		1150 °С		1200 °С		20 °С	900°С	1100°С
	100 ч	1000 ч	100 ч	1000 ч	100 ч	1000 ч			
ЖС32	125	80	—	—	—	—	250	350	—
ВКНА-25	130	80	85	65	50	35	240	370	160

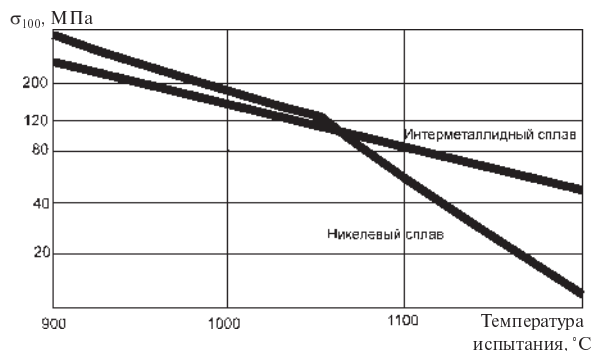


Рис. 2. Температурная зависимость σ_{100} , МПа, современных классического никелевого и интерметаллидного материалов с монокристаллической структурой

основе соединения Ti_2NbAl — ВТИ-4, который по своим характеристикам не уступает зарубежным 22–23 (США) и 23–25–1–1S (Франция), а по удельному весу даже чуть легче — $5,1 \text{ г/см}^3$ против соответственно $5,2$ и $5,32 \text{ г/см}^3$. В этом сплаве устранены вышеперечисленные недостатки [2].

Композиты на керамической матрице (Ceramic Matrix Composites — CMC) [4, 5] — основные кандидаты-материалы для применения в авиационной, космической, энергетической и ядерной промышленности благодаря их высокой температурной способности и низкой плотности ($1,5\text{--}3,0 \text{ г/см}^3$). Низкая пластичность, однако, является серьезной помехой для применения монокристаллической керамики в АД. Это относится и к SiC -, Al_2O_3 -, Si_3N_4 -керамикам.

Фокус интересов сегодня сосредоточен на композиционных керамических материалах (ККМ) [5], армированных волокнами. Материалы волокон — в основном SiC , углерод и Al_2O_3 . Материалы матрицы — как правило, SiC , Al_2O_3 или смесь ($Al_2O_3 + SiO_2$). Потенциал применения данных композитов ограничивается главным образом требованиями к толщине. По результатам испытаний сегодняшних ККМ при температурах свыше 1000°C в течение нескольких сотен часов выявлены проблемы с выбором ККМ. Так, например, оксидные волокна (такие, как Al_2O_3) — термодинамически стабильны, но имеют низкие характеристики ползучести. С другой стороны, неоксидные волокна (такие, как SiC) имеют адекватные характеристики ползучести, однако могут химически реагировать с материалом матрицы (вопреки защитным по-

крытиям, в том числе нанопокрывтиям на волокнах), тем самым повреждая их.

Монокристаллическая керамика не имеет этих проблем, но отличается отсутствием вязкости и сопротивления развитию трещины.

В ближайшем будущем спектр применения ККМ будет невелик. Потенциальное применение — статорные детали ТНД, задний кок, створки и т. д., но не в ТВД. На сегодняшний день — единичный случай серийного применения ККМ-частей в АД — створки сопел двигателей М88 (SNECMA) и F119 (Pratt & Whitney) [8, 9]. Благодаря прекрасным высокотемпературным свойствам ККМ привлекательны для краткосрочных изделий, например — большинства двигателей космических ракет.

Теплозащитные покрытия также можно отнести к неметаллическим высокотемпературным материалам. Большой интерес представляют последние зарубежные разработки материалов для ТЗП и способов их нанесения [6, 7]. Современные разработки направлены на снижение коэффициента теплопроводности за счет изменения базовой системы состава $ZrO_2\text{--}Y_2O_3$ на систему $ZrO_2\text{--}Y_2O_3\text{--}Nd_2O_3$ (Gd_2O_3 , Sm_2O_3) — Yb_2O_3 (Sc_2O_3) [7] и за счет формирования структур теплозащитного слоя “столбчатая — зигзагообразная — послойная” (рис. 3, а). Последнее достигается внедрением усовершенствованной технологии электронно-лучевого нанесения покрытий с формируемой направленностью парового потока (EB-DVD — electron beam directed vapor deposition) (рис. 4).

При оптимальных составах и способах нанесения становится возможным получение теплозащитных слоев с коэффициентом теплопроводности $0,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ и ниже, что позволяет достигнуть градиента снижения температур $200\text{--}220^\circ\text{C}/100 \text{ мкм}$ (рис. 3, б).

Примечательно, что аналогичные разработки ведутся специалистами ФГУП “ВИАМ”. Необходимость применения таких покрытий — как для действующих и модернизированных высокотемпературных ГТД, так и проектируемых, особенно МГТД, — очевидна.

Судя по поступающей извне [4, 5, 9] информации, благодаря применению нового класса материалов и новых технологий удастся в ближайшее время получить серийную металлокерамическую лопатку, которая сможет устойчиво работать при температурах до 1750 К .

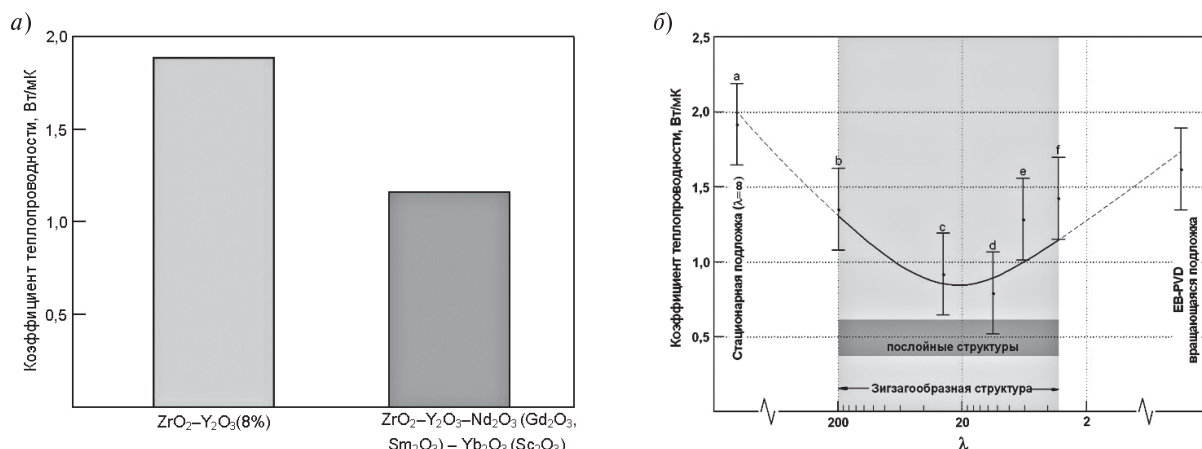


Рис. 3. Сравнительные значения коэффициента теплопроводности базовой $ZrO_2-Y_2O_3(8\%)$ и модифицированной ($ZrO_2-Y_2O_3-Nd_2O_3(Gd_2O_3, Sm_2O_3) - Yb_2O_3(Sc_2O_3)$) керамических систем (а) и зависимость коэффициента теплопроводности от структурного фактора (б)

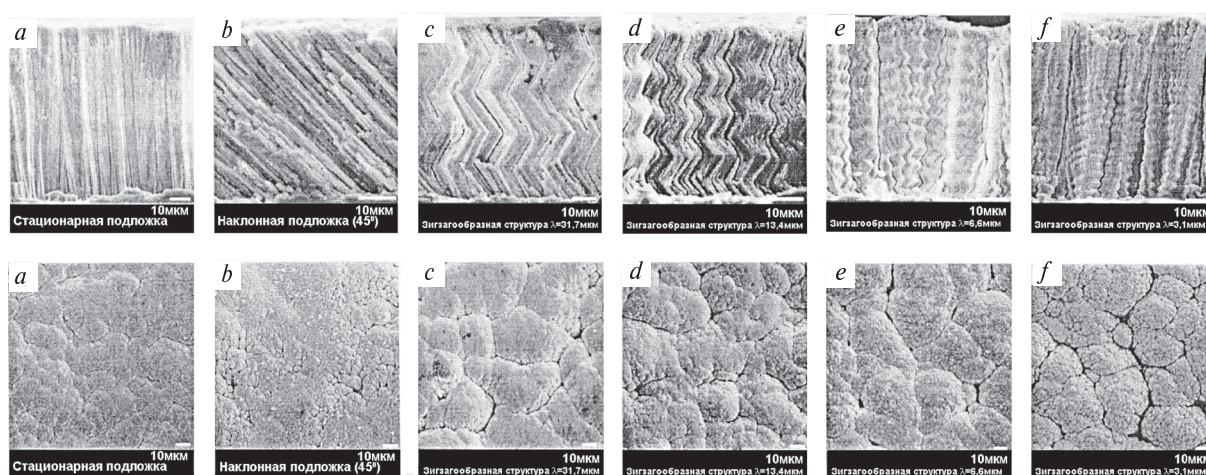


Рис. 4. Фотографии покрытий, нанесенных методом EB-DVD: верхний ряд — поперечный разрез, нижний ряд — вид поверхности покрытия

В настоящее время основное внимание конструкторов современных ТВД уделено проектированию монокристаллических рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов с высокоэффективным “проникающим” охлаждением. Особый интерес представляют никелевые суперсплавы семейства TMS (TMS-162 и TMS-196). Благодаря современным методикам расчета и прогнозирования фазовыделений стало возможным не только достичь высокого уровня жаропрочности, но и существенно снизить анизотропию характеристик основных механических свойств монокристаллических лопаток, обусловленную кристаллографической анизотропией материала.

Для лопаток ТНД целесообразно применять никелевые монокристаллические суперсплавы с низким удельным весом (менее $8,2 \text{ г/см}^3$), такие, как CMSX-6 и LEK-94.

Помимо вышеупомянутых материалов по-прежнему актуально использование опробованных сплавов, как, например, ЖС32МОНО, ЖС6У и ЖС6К (ЖС6КМОНО), но с характеристиками, улучшенными благодаря усовершенствованным технологиям литья и химической обработки.

Турбина перспективного отечественного АГТД может быть дополнительно облегчена при использовании композиционных никелевых интерметаллидных сплавов типа ВКНА с плотностью менее $8,0 \text{ г/см}^3$, ВКНА-4 — $7,84 \text{ г/см}^3$,

ВКНА-1В — 7,938 г/см³ и ВКНА-4У — 7,91 г/см³ [2, 3]. Сегодня сплавы ВКНА-4 и ВКНА-4У опробованы при изготовлении цельнолитых неохлаждаемых сопловых аппаратов МГТД диаметром 300 мм и литых пакетов охлаждаемых сопловых аппаратов ТРДДФ (РД-33 и Ал-31).

Создание универсального газогенератора для двигателей двух групп размерности — “большой” и “малой”, заложенное в конце XX века в американской программе VAATE, предполагает работу газогенератора в условиях на входе от МСА до 0,5–0,6 МПа на входе в компрессор газогенератора. Помимо давления существенно меняются температурные характеристики рабочего процесса и окружные скорости. В связи с этим возникает потребность унифицировать применение жаропрочных материалов для лопаток газогенераторов двигателей различной размерности и назначения.

Основными требованиями к новым материалам для ГТД остаются:

предсказуемость поведения при высоких уровнях нагрузки;

высокая прочность и жесткость;

высокая жаростойкость и жаропрочность;

низкая плотность;

низкая себестоимость.

К перечисленным требованиям следует добавить еще несколько:

технологичность при изготовлении детали;
сопротивляемость к образованию ТПУ-фаз;
низкий технологический разброс свойств;
управляемость коэффициентом термического расширения;
унифицированность по температуре применения.

Перспективы развития материалов для рабочих лопаток и дисков турбин АГТД неразрывно связаны с параметрами рабочего процесса. При классическом подходе к проектированию турбинной части двигателя внедрение неметаллических материалов с низким удельным весом представляется невозможным из-за их специфических свойств, поэтому в ближайшие двадцать лет будет продолжаться развитие экономнолегированных жаропрочных и жаростойких сплавов на никелевой основе и теплозащитных и защитных покрытий. Данное направление будет экономически выгодно до тех пор, пока не изменится концепция проектирования АГТД.

Тенденция повышения эффективности двигателя, связанная с повышением максимальной температуры газа перед турбиной, сохранится, но основные инновационные разработки будут направлены на поиск и внедрение принципиально иных конструкторских решений, основанных на применении новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунтушкин, В.П. Высокотемпературные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al для деталей горячего тракта ГТД [Текст] / В.П. Бунтушкин, О.А. Базылева, В.И. Буркина // Авиационная промышленность. — 2007. № 2. — С. 41–43.
2. Шарова, Н.А. Использование новых жаропрочных титановых сплавов при формировании конструктивного лица компрессора перспективного авиационного двигателя [Текст] / Н.А. Шарова, А.А. Живушкин, А.В. Васильев [и др.]; ВИАМ // Сб. докл. научно-техн. конф. “Современные титановые сплавы и проблемы их развития”. — 2008.
3. Younossi, O. Military jet engine acquisition: technology basics and cost-estimating methodology [текст] / Obaid Younossi [et al.]. Prepared for the United States Air Force. “MR-1596.” RAND, ISBN 0-8330-3282-8 (pbk.). — 2002.
4. Steffens, K. Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Processes. What comes after 2000? [Текст] / K. Steffens, H. Wilhelm // MTU Aero Engines, Dachauer Str. 665, 80995. Munchen. — 2005.
5. Advanced Ceramic Matrix Composites with Multifunctional and Hybrid Structures [Текст] / M. Singh, G.N. Morsher; NASA Glenn Research Center. — Cleveland. — ON 44135. — 2005.
6. Hass, D.D. Electron beam directed vapor deposition of thermal barrier coatings [текст] / D.D. Hass, P.A. Parrish, H.N.G. Wadley. // journal of Vac. Sci. Technol. 1998. — A16(6) Nov/Dec. P. 3396–3401.
7. Hass, D.D. Low thermal conductivity vapor deposited zirconia's microstructures [Текст] / D.D. Hass, A.J.S. Lifka, H.N.G. Wadley // Acta Materialia, 2001. — 49. P. 973–983.
8. Кокорев, В. F119 — двигатель истребителя F-22 [Текст] / В. Кокорев, Л. Соркин, Г. Фридман // Двигатель. — 2003. № 6(30). — С. 18–20.
9. Иностранные авиационные двигатели, 2000 [Текст]: Справочник / Общ. ред. Л.И. Соркин. — М.: Изд. Дом “Авиамир”, 2000.



УДК 658.562.591.4

С.Г. Малюгин, А.В. Шемякин, В.С. Малюгин

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТОЛЩИНЫ ПОДЛОЖКИ

Совершенствование технологических процессов нанесения материала грунтовки на поверхность объекта и исследование качества нанесенного материала весьма актуальны и имеют научно-практическое значение.

При эксплуатации красочных материалов на грунтовой подложке очень часто наблюдаются одновременно три типа разрушения — когезионный (растрескивание), адгезионный (отслаивание) и смешанный, что зачастую затрудняет получение достоверных данных о механизме разрушения покрытий, прогнозирование поведения покрытий при эксплуатации и другое.

Известно, что реальные значения параметров, характеризующих свойства красочных покрытий на грунтованных подложках по всему отделочному слою, изменчивы и зависят от большого числа факторов (шероховатость и пористость подложки, технологические факторы т. д.), совокупность которых определяет вероятность того или иного разрушения (адгезионное или когезионное) [1].

Учитывая особенности строения загрунтованной подложки, следует иметь в виду: толщина покрытия носит неравномерный характер, что, несомненно, оказывает влияние на распределение свойств покрытий. Поэтому в процессе испытаний изделий возможно получение противоречивых данных о характере разрушения покрытия. Представляется, что подготовка образцов к испытаниям должна производиться с учетом определенной толщины покрытия, которая находится следующим образом.

Условие когезионного разрушения имеет вид [3]

$$R_k < R_a, \quad (1)$$

где R_k , R_a — значения соответственно когезионной и адгезионной прочностей покрытия.

Рассмотрим когезионное разрушение грунтованной поверхности, определяемое функцией $P(R_k < R_a)$ при условии, что толщина покрытия принимает случайные значения, равные h .

Известно, что изменение когезионной прочности покрытия в зависимости от толщины точнее всего описывается уравнением Вейбулла, а именно:

$$\bar{R}_k = Kh^{-\frac{1}{n}}, \quad (2)$$

где h — толщина покрытия; K , n — коэффициенты, зависящие от вида покрытия.

Среднее квадратическое отклонение σ_{R_k} , как и R_k , будет изменяться в зависимости от наблюдаемой толщины покрытия.

Зависимость σ_{R_k} от h целесообразно представлять в виде [3]

$$\sigma_{R_k} = A - Be^{-Ch^d}, \quad (3)$$

где A , B , C , d — коэффициенты, зависящие от вида покрытия.

Вычислениями по методу наименьших квадратов, разработанному Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаровым, А.Ю. Вдовиным и другими, были установлены зависимости $\bar{R}_k(h)$ и $\sigma_{R_k}(h)$, которые имеют вид [4, 5]

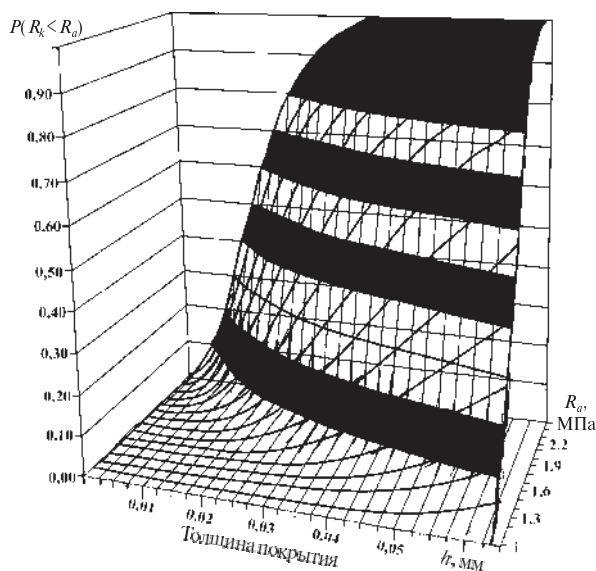
$$\bar{R}_k = 2,5h^{-\frac{1}{2,33}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{R_k} = 0,4 - 0,15e^{-h^{-1,8}}. \quad (5)$$

Величина \bar{R}_k является случайной и в общем случае (при совокупном влиянии множества факторов) подчиняется нормальному закону распределения.

В соответствии с формулами нормального распределения (4) и (5) закон распределения R_k имеет вид

$$f(R_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(A - Be^{-Ch^d} \right)} e^{-\frac{\left(R_k - Kh^{-\frac{1}{n}} \right)^2}{2 \left(A - Be^{-Ch^d} \right)^2}}, \quad (6)$$



Зависимость вероятности когезионного разрушения от толщины покрытия h и прочности сцепления R_a

Вероятность когезионного разрушения рассчитывается по формуле [4, 5]

$$P(R_k < R_a) = \int_{-\infty}^{R_a} f(R_k) dR_k. \quad (7)$$

Таким образом, вероятность разрушения какого-либо участка поверхности покрытия определяется текущими значениями прочности сцепления и толщины загрунтованного состава.

Теоретические предпосылки были рассмотрены авторами данной статьи и применены в исследовательской части [6].

Практическое использование теоретических исследований заключается в разработке технических требований к методам формирования покрытий, обеспечивающих заданную вероятность когезионного разрушения.

Рассматривая вероятность когезионного разрушения $P(R_k < R_a)$ в зависимости от h для различных значений R_a (наиболее вероятных для рассматриваемого покрытия), данную функцию будем описывать в дальнейшем кривыми, зависящими от названных параметров.

Для нахождения вероятности разрушения изучаемого покрытия были проведены исследования грунтованных образцов с различной толщиной покрытий (по 20 образцов для каждой толщины) на предмет определения прочности на растяжение. Полученные данные отражены в таблице.

В общем виде вероятность $P(R_k < R_a)$ как функция от h и R_a будет описываться соответствующей поверхностью, отраженной на рисунке.

Анализируя графическую зависимость (см. рис.) или ее аналитическую форму (7), можно привести некоторые значения вероятностей когезионного разрушения для различных h и R_a (предельные крайние и средние).

Исключение когезионного характера разрушения предполагает более высокие значения когезионной прочности и в совокупности с материаловедческими факторами определяет предпосылки создания трещиностойких покрытий оптимальной толщины.

Кроме того, предложенный подход может быть применен при разработке контроля по альтернативному признаку качества нанесения

Экспериментальные данные о прочности на растяжение для грунтованных образцов с разной толщиной покрытия

№ образца	Прочность на растяжение R_k , МПа, при толщине покрытия h , мм				
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
1	2,1	1,9	1,4	1,4	1,2
2	2,2	2,1	1,7	1,5	1,3
3	2,2	2,1	1,8	1,6	1,4
4	2,3	2,1	1,8	1,7	1,5
5	2,3	2,2	1,9	1,7	1,6
6	2,4	2,2	1,9	1,8	1,6
7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6

Окончание табл.

№ образца	Прочность на растяжение R_k , МПа, при толщине покрытия h , мм				
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
8	2,5	2,3	2,0	1,8	1,7
9	2,6	2,4	2,0	1,9	1,7
10	2,7	2,5	2,1	1,9	1,7
11	2,7	2,5	2,1	1,9	1,7
12	2,8	2,6	2,2	1,9	1,7
13	2,9	2,7	2,2	2,0	1,8
14	2,9	2,7	2,2	2,0	1,8
15	3,0	2,8	2,3	2,0	1,8
16	3,1	2,8	2,3	2,1	1,9
17	3,1	2,9	2,3	2,1	1,9
18	3,2	2,9	2,5	2,3	2,1
19	3,2	3,0	2,5	2,4	2,2
20	3,4	3,1	2,8	2,6	2,3
Среднее значение \bar{R}_k	2,7	2,5	2,1	1,9	1,7
Среднеквадратичное отклонение σ_{Rk}	0,391	0,352	0,311	0,291	0,275

материала грунтовки, а в дальнейшем и лакокрасочных покрытий.

Следует отметить, что существующие нормативные документы, регламентирующие вопросы нанесения любого покрытия на поверхность изделий, конструкций и техники, еще не содержат

требований, учитывающих статистические методы управления качеством продукции. Однако из современных требований высокого качества загрунтованной и окрашиваемой поверхности со всей очевидностью следует необходимость решения этого вопроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галичев, А.В. Основы управления качеством продукции [Текст] / А.В. Галичев. — М.: Изд-во АМИ, 1988. — 354 с.
2. Статистические методы повышения качества [Текст]: пер. с англ./ Под ред. Х. Кумэ. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 304 с.
3. Логанина, В.И. Применения статистических методов управления качеством строительных материалов [Текст] / В.И. Логанина. — М.: Изд-во АСВ, 2004.
4. Вдовин, А.Ю. Высшая математика. Стандартные задачи с основами теории [Текст]: Учебное

пособие / А.Ю. Вдовин и др. — СПб.: Изд-во “Лань”, 2009. — 192 с.

5. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст]: Учебное пособие / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Изд. центр “Академия”, 2003. — 459 с.

6. Гришин, И.И. Теоретические исследования нанесения и распределения на поверхности объекта материала грунтовки [Текст] / И.И. Гришин, В.С. Малюгин // Матер. 12-ой междунар. научно-практ. конф. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. — 550 с.

УДК 629.113

Д.М. Долгушев, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов

КОНЦЕПЦИЯ ТРАНССКУТЕРА-АМФИБИИ ДЛЯ ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ

Трансскутеры как новая разновидность транспортных средств

Трансскутеры (трансформируемые скутеры) как новая разновидность индивидуальных наземных безрельсовых электроприводных транспортных средств особо малого класса, предназначенных главным образом для лиц с ограниченной подвижностью (инвалидов-опорников и др.), впервые были предложены в 90-х годах группой разработчиков под руководством кандидата технических наук доцента А.Д. Элизова (лаборатория электродвижения при кафедре колесных и гусеничных машин СПбГПУ).

На сегодняшний день этот подкласс представлен широкой гаммой многофункциональных компактных трансформеров, подавляющая часть которых была испытана на ходовых полномасштабных макетах. В их числе не только ставшие уже “классикой” концепт-трансскутеры семейств “Перфекта” (“*Perfecta*”), “Кенгуру” (“*Kangaroo*”), “Флип” (“*Flip*”) и др. [1–10], основное назначение которых — движение вне помещений (рис. 1), в помещениях, сверхманевренность (движение под любым углом по азимуту —

рис. 2), вертикализация (постановка в вертикальное положение) пользователя (рис. 3) и преодоление профильных препятствий, включая вверх и вниз по лестнице (главная особенность — рис. 4), но и более специализированные, даже “экзотические” трансскутеры, созданные под конкретные потребности заказчика и потенциальных пользователей: возможность и удобство эксплуатации на пляже, на площадке для игры в гольф, за рулем легкового автомобиля, на трапе и в салоне самолета, на палубе катера и т. д.

В проектах прорабатывался и дизайн трансскутеров, в том числе совместно с германскими коллегами при подготовке для Международной выставки в г. Дюссельдорф демонстрационного образца трансскутера “*Flip*” (см. рис. 2).

В данной статье авторы представляют одну из таких разработок, а именно — концепт-трансскутер “Аква”. Речь идет о трансскутере-амфибии, способной, в частности, двигаться по пляжному песку, по дну на мелководье и плыть в частично погруженном в воду положении.

Естественно, такая постановка задачи повлекла за собой ряд новых технических проблем,



Рис. 1. Ходовой макет трансскутера “Кенгуру”



Рис. 2. Трансскутер “Флип” на выставке в г. Дюссельдорф (Германия)



Рис. 3. Трансскутер “Кенгуру” в конфигурации “вертикаль”

даже с учетом опыта, накопленного конструкторами, испытателями и пользователями амфибийных транспортных средств вообще. Во всяком случае, проекты плавающих инвалидных колясок и, тем более, серийных их образцов, к тому же с электроприводом, авторам не были известны. Но “успокаивали” мировые разработки в области так называемых погружных электромашин и способов герметизации.

Основные положения принятой концепции трансскутера “Аква”

Предложенная в результате проработки проекта концепция машины включает в себя следующие основные положения:

пользователь находится в обычном сидячем положении (рис. 6);

кресло с подножками полностью перфорировано как для облегчения конструкции и снижения центра масс машины, так и для максимально возможного контакта тела с водой;

по периметру машины на уровне руля предусмотрены поплавки для обеспечения плавучести и устойчивости машины;

поплавки установлены на поворотных бортах с возможностью оперативной трансформации из положения (опции) “на суше” в положение (опцию) “на воде” и обратно (рис. 7, 8);

шасси на плаву (включая аккумуляторные батареи) полностью погружено в воду при герметичном выполнении всех ответственных состав-



Рис. 4. Трансскутер “Кенгуру” при преодолении лестничного марша (спуск вниз)

ных частей — электродвигателей, аккумуляторных батарей, другого электрооборудования и электроники, включая систему управления (см. рис. 6);

машина при удовлетворительных массогабаритных показателях (не более 120 кг и габариты 2,0×0,8×1,0 м) характеризуется достаточно высокой несущей проходимостью на песчаном и гальковом пляже, на песчаной отмели;

водоходным движителем служит гребной винт Архимеда, аналогичный применяемым на лодоч-



Рис. 5. Символическая интерпретация дизайнерской концепции трансскутеров семейства “Кенгуру”

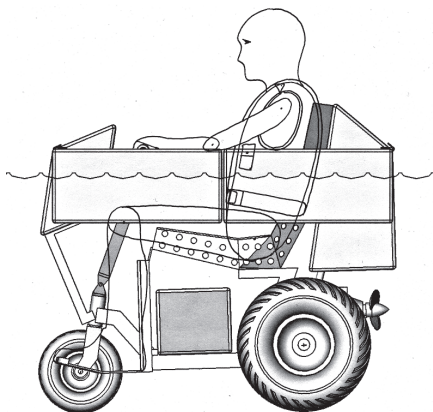


Рис. 6. Трансскутер “Аква” с человеком

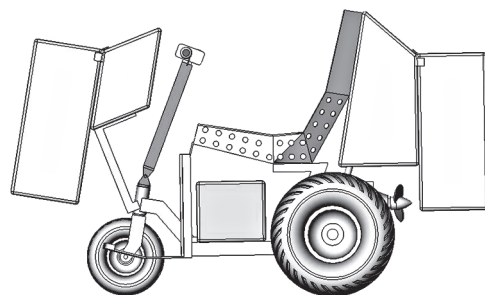


Рис. 7. Компоновка трансскутера “Аква”

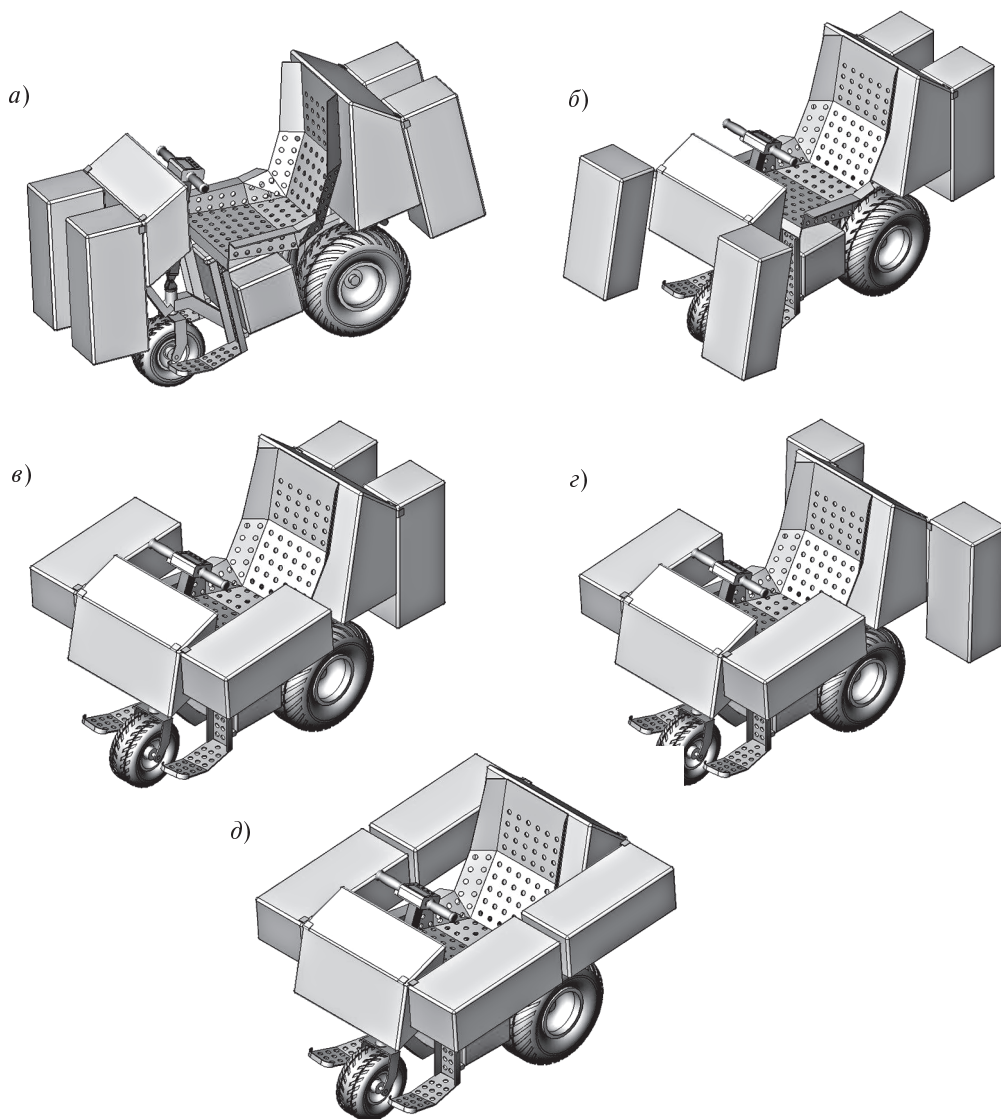


Рис. 8. Трансформация трансскутера “Аква” из опции “на суше” в опцию “на воде”:
а–г — последовательность поворота поплавков



ных подвесных моторах и обеспечивающий скорость машины на плаву порядка 8–10 км/ч.

Определение полной массы транскутера “Аква”

С использованием функции, предоставляемой программой “SolidWorks”, определены, в частности, полная масса (115 кг) и объем (268 м³) амфибии, масса основных ее компонентов по их плотности.

Определено также положение центра тяжести машины в целом (примерно в середине колесной базы с небольшим смещением назад на высоте чуть выше оси гребного винта).

Оценка положения транскутера “Аква” в воде

При оценке положения транскутера “Аква” в воде предполагалось, что плавучесть человеческого тела, погруженного в воду, является нулевой, т. е. в качестве нагрузки машины необходимо учитывать только часть человеческого тела, расположенную над водой. В дальнейшем расчете эта масса была принята 35 кг, соответственно полная масса машины с нагрузкой составляет 150 кг. Таким образом, объем погруженной в воду части машины должен составлять 0,15 м³ для того, чтобы она находилась в воде в состоянии равновесия.

При помощи программы “SolidWorks” было получено расположение центра водоизмещения при объеме погруженной в воду части объемом 0,15 м³. Соответственно расчетным путем было обеспечено расположение центра тяжести и центра водоизмещения транскутера на одной вертикали с отклонением от нее не более $\pm 2^\circ$, при

этом центр тяжести — ниже центра водоизмещения на 0,18 части колесной базы. То есть теоретически возможен некоторый наклон машины от равновесного горизонтального положения, но она не имеет тенденции к самопроизвольному опрокидыванию, остойчивость соблюдена.

Степень готовности проекта

Транскутер “Аква” проработан авторами до стадии эскизного проекта, изготовлена масштабная модель и смоделированы эксплуатационные режимы на компьютере в формате 3D. Анимационный фильм демонстрировался в 2000-х годах на выставочно-ярмарочных мероприятиях городского и регионального масштаба.

В печатном виде сведения о транскутере “Аква” публикуются впервые.

Впервые предложена концепция амфибийного варианта транскутера (“Аква”) для лиц с ограниченной подвижностью, которая расширяет спектр транскутеров новой, разработанной в стенах СПбГПУ, разновидности индивидуальных транспортных средств особо малого класса. Концепт при удовлетворительных массогабаритных показателях характеризуется достаточно высокими показателями несущей проходимости на песчаном и гальковом пляже, на песчаной отмели, а на плаву — хорошими показателями плавучести, остойчивости и ходкости. При этом агрегаты машины и аккумуляторные батареи оказывают ниже ватерлинии, а пользователь находится в сидячем положении в комфортных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Келеман, С.А. Новая разновидность малоразмерных электроприводных транспортных средств [Текст] / С.А. Келеман, А.А. Красильников, А.Д. Самойлов [и др.] // Демиург (Вестник Акад. техн. творчества). — 2000. № 2. — С. 54–55.
2. Джумаев, С.А. Вертикализация и горизонтирование “колясочников”: медико-реабилитационные и технические аспекты [Текст] / С.А. Джумаев, Л.А. Дрожжина, А.А. Красильников [и др.] // Проблемы реабилитации. — 2001. № 2 (5). — С. 105–108.
3. Волков, Ю.П. О разработках в области индивидуального малогабаритного транспорта [Текст] / Ю.П. Волков, С.А. Бушеленков, А.А. Красильников [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГТУ. — 2003. № 1. — С. 65–75.
4. Долгушев, Д.М. Электроприводной индивидуальный транспорт на лестничном марше: эксцентриковые рычажные механизмы [Текст] / Д.М. Долгушев, А.А. Красильников, А.Д. Самойлов [и др.] // Вестник КГТУ. Сер. Транспорт. — Вып. 43: Межвуз сб. науч. трудов. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. — С. 117–122.
5. Красильников, А.А. Инвалидные кресла-коляски на лестничном марше: средства передвижения [Текст]: сб. матер. научно-практич. конф. “Научные исследования и инновационная деятельность”. — СПбГПУ. 18–20 июня 2007. / А.А. Красильников, А.Д. Самойлов, А.Г. Семенов [и др.]. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — С. 232–239.

6. **Посевкин, А.А.** Транспортные средства особо малого класса с изменяемой колесой [Текст] / А.А. Посевкин, М.А. Ткачев, А.Г. Семенов [и др.]; Под общ. ред. Ю.Г. Попова и А.Г. Семенова. — Сб. матер. межрегиональной научно-технич. конф. изобретателей и каталог гор. выставки изобретений “Инновационная политика и изобретатели (Россия — начало XXI века)”. — СПбГПУ. — 28–29 апр. 2009. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — С. 107–110.

7. **Пат. № 2215510 РФ.** Транспортное средство и способ его подъема по лестничным маршам [текст] / О.В. Бойко, А.Д. Элизов, А.А. Красильников [и др.] // Бюл. “Изобретения...”. — 2003. № 31. — С. 377.

8. **Пат. № 2304952 РФ.** Транспортное средство,

преимущественно для перемещения человека по лестницам [Текст] / С.А. Бушеленков, А.А. Красильников, А.Д. Самойлов [и др.] // Бюл. “Изобретения...”. — 2007. № 24. — С. 142.

9. **Пат. № 2312788 РФ.** Шасси транспортного средства для движения, в частности, по лестницам [Текст] / С.А. Бушеленков, Д.М. Долгушев, А.А. Красильников [и др.] // Бюл. “Изобретения...”. — 2007. № 35. — С. 441.

10. **Пат. № 2381127 РФ.** Способ оперативного изменения колеи самоходного колесного транспортного средства и самоходное колесное транспортное средство для его осуществления [Текст] / А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, М.А. Ткачев [и др.] // Бюл. “Изобретения...”. — 2010. № 10.

УДК 629.113

Ф.А. Кудряшев, А.А. Посевкин,
А.Г. Семенов, А.Д. Элизов

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ГИБРИД-КОНЦЕПТОВ НА БАЗЕ АВТОМОБИЛЯ И ТРАНССКУТЕРА

Для всего мира, не исключая и Россию с ее большими запасами углеводородов, актуальны вопросы электроснабжения и экологии. Немаловажно также повышение конкурентоспособности отечественной продукции.

В порядке реальной помощи российскому автопрому изобретатели кафедры колесных и гусеничных машин (КГМ) СПбГПУ и Студенческого конструкторского бюро (СКБ) при кафедре предлагают доработать с минимальными конструктивными изменениями известный серийный автомобиль “Лада-Калина” (“При-

ора”) до так называемого *параллельного гибрида*, позволяющего в Европейском городском ездовом цикле (NEDC) снизить расход топлива с 8 до 4–5 л/100 км за счет трогания с места, разгона и движения в городских “пробках” на электромоторе, а также использования рекуперации при торможении. Упомянутый Европейский ездовой цикл представлен графиком (рис. 1), отражающим (если укрупненно) следующее процентное распределение: разгон — 29, равномерное движение — 32, торможение — 26 и холостой ход — 13.

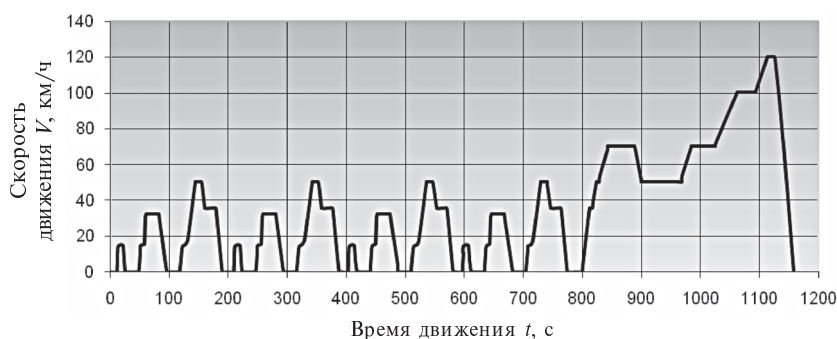


Рис. 1. Европейский ездовой цикл NEDC



Представляется, что реализацию первого из предлагаемых инновационных проектов целесообразно начать с изготовления опытного образца (гибрид-концепт) на базе автомобиля “Лада-Калина”. Одно из благоприятных условий для этого — наличие такого автомобиля на кафедре КГМ, где он используется сейчас как учебное пособие (рис. 2).

Технически переделка предполагает установку дискового бесколлекторного электродвигателя с требуемыми параметрами, литий-ионной аккумуляторной батареи, системы управления и программного обеспечения.

Стоимость электромобиля или комплекта для переоборудования обычных автомобилей в серийном исполнении не будет слишком велика, а экономия топлива должна окупить затраты на переоборудование в рамках гарантийного срока по пробегу. Это подтверждается следующим несложным технико-экономическим обоснованием (расчет методом аналогии с использованием данных по электромобилю “Пингвин” — электромобилю-аналогу, первому объекту сравнения — и автомобилю “Ока” — второму объекту сравнения примерно с теми же массогабаритными характеристиками, что и “Пингвин”).

Электромобиль “Пингвин” при мощности 3 кВт, напряжении питания 48 В и аккумуляторной батарее емкостью 100 А·ч имел средний запас хода 60 км. Соответственно запас энергии составлял 4,8 кВт·ч. При условии зарядки батареи в ночное время суток (при “ночном” тарифе на электроэнергию 1,2 руб./кВт·ч) стоимость пробега (по электроэнергии) находится в пределах 10 руб./100 км.

Автомобиль “Ока” имеет расход топлива 5 л/100 км. При стоимости бензина 25 руб./л это соответствует стоимости пробега 125 руб./100 км.

Затраты на переоборудование такого автомобиля в электромобиль (электромотор, блок управления, зарядное устройство, аккумуляторы, педаль газа, амперметр и др.) составляют сумму порядка 85 тыс. руб.

При гарантийном пробеге 100 тыс. км затраты для “Оки” и электромобиля на базе “Оки” составят соответственно 125 и 10 тыс. руб.; тогда экономия для пользователя электромобиля, равная разности этих цифр, будет 115 тыс. руб.

Коллектив кафедры обладает требуемой квалификацией и налаженными связями со специализированными организациями и промышлен-



Рис. 2. Базовый автомобиль ВАЗ-1119 “Лада-Калина”

ными предприятиями Северо-Западного региона, а также с АвтоВАЗом, необходимыми для выполнения всех этих работ.

Имеется опыт создания собственными силами малогабаритного электромобиля и ходовых испытаний уникальных образцов электромобилей.

Коллектив в 2008–2009 годах проводил работы по восстановлению электромобиля “Пингвин-7” производства Федеративной республики Германия, который имеет стеклопластиковый кузов типа “купе”, двухместный, закрепленный на стальной раме. В ходе восстановительных работ на машину был установлен современный бесколлекторный электродвигатель с функцией регенерации электроэнергии при торможении (рекуперация), солнечные батареи и Li-Cd аккумуляторные батареи (рис. 3).



Рис. 3. Восстановленный электромобиль “Пингвин-7”, оснащенный солнечными батареями, и группа его создателей



Рис. 4. Американский электромобиль во время ознакомительного пробега у кафедры КГМ

При опытной эксплуатации машины отмечены положительные ее качества: малое шумность; заявленное энергопотребление (80 км пробега на одном заряде батареи); продолжительность полного заряда (1,5 часа); соответствие современным российским условиям, а главное — «потрясающая» экономичность (для пробега 80 км требуется 9,3 рубля при текущих тарифах на электроэнергию).

В обоснование приобретенного коллективом опыта в части экспериментальных работ умест-



Рис. 5. Эксплуатация опытного образца электромобиля на базе автомобиля «Ока» с Ni-Zn аккумуляторами при участии главного конструктора, технического директора лаборатории электродвижения кафедры КГМ СПбГПУ доцента А.Д. Элизова (слева) и бывшего начальника лаборатории компании «Ригель», и заведующего кафедрой СПбГФИ к.т.н. И.Ф. Даниленко (крайний справа)

но отметить ходовые испытания (конец 90-х годов) гольф-электромобиля американского производства (рис. 4).

До этого пришлось в экспериментальном порядке оснащать никель-цинковыми аккумуляторами компании «Ригель» (взамен более дорогих «родных» никель-кадмиевых) электромобиль на базе автомобиля «Ока», поступивший с АвтоВАЗа (что потребовало проведения дополнительных испытаний). Машина не только была испытана, но и использовалась практически (рис. 5).

Ценные материалы для реализации предложения получены также при обмене опытом с финскими коллегами и изучении при этом электромобиля «Элькат» с целью участия в соревнованиях на минимальный расход электроэнергии при прохождении маршрута.

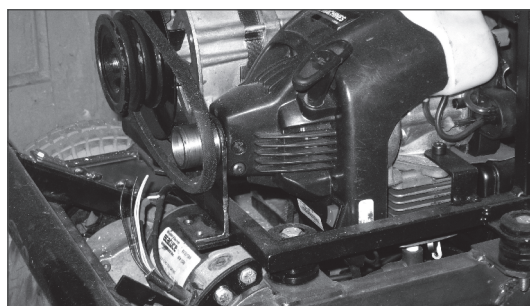


Рис. 6. Силовая установка для гибрида на базе автомобиля «Ока»

Параллельно проводились работы с конденсаторами — накопителями энергии емкостью 30 фарад (производство Псковского радиозавода) для рекуперации энергии торможения.

Совместно с сотрудниками электромеханического факультета проводились исследования способов управляемой передачи энергии с заряженного конденсатора на тяговый электродвигатель.

Кроме того, была выполнена работа (в рамках полученного гранта) по созданию гибрида (также на базе автомобиля «Ока»), закончившаяся разработкой простой схемы параллельного гибрида (рис. 6), которая представляет интерес и по сей день.

Разработан оригинальный электромотор-дифференциал для электромобиля, содержащий два соосных ротора в одном статоре. Позднее выяснилось, что подобная идея реализована в Южной Корее, но в коаксиальном исполнении.

В порядке развития “электромобильной” тематики и многовариантности возможных решений лаборатория электродвижения совместно с СКБ разработала и предложила для реализации концепцию трансформируемого многофункционального индивидуального транспортного средства особо малого класса (транскутер) с гибридной силовой установкой (главным образом для инвалидов-опорников). В качестве базовой машины принят “сборный” транскутер — из числа созданных лабораторией и серийных электроскутеров зарубежного производства. Использовались прежде всего авторские наработки и по другим опытным образцам транскутеров, включая наиболее продвинутые концепты семейства “Кенгуру” и их силовые электромеханические уникальные приводы (также разработки лаборатории).

Рассмотрим подробнее предложение гибридного концепта на базе транскутера.

Из трех известных схем гибридных установок (последовательная, параллельная и комбинированная) наиболее перспективна последовательная (рис. 7). В транскутере (рис. 8) карбюраторный двухтактный ДВС (1 цилиндр, 35 см^3 , 750 Вт) через ременную передачу приводит в работу генератор (24 В, до 50 А). Вся механическая энергия преобразуется в электрическую, накапливается в буферном устройстве (блок аккумуляторных батарей плюс конденсатор с возможностью рекуперации и защиты батарей от перегрузок), а далее в электродвигателе (300 Вт) преобразуется обратно в механическую.

Старт и разгон — за счет конденсатора, при этом ДВС может находиться не только в рабочем состоянии. Время включения ДВС определяется блоком управления в зависимости от степени заряда аккумулятора. Торможение — за счет генераторного режима мотора (с подзарядкой аккумулятора).

Точная методика определения шумовых характеристик глушителей для двухтактных двигателей малой мощности отсутствует. Фирма Bosch рекомендует выбирать объем глушителя равным 20 рабочим объемам ДВС (700 см^3). Объем переднего глушителя в комплекте с ДВС — 300 см^3 . Роль центрального глушителя будет играть фильтрующий элемент на основе гопкалиита ($\approx 250\text{--}300 \text{ см}^3$), заднего — на основе актив-

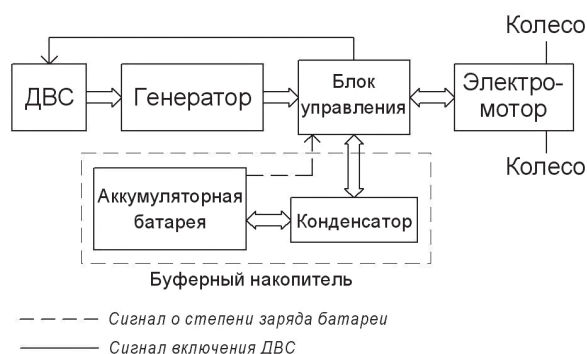


Рис. 7. Блок-схема шасси транскутера с гибридной силовой установкой

ного угля ($\approx 250 \text{ см}^3$). Общий объем глушителя $800\text{--}850 \text{ см}^3$. Оценка эффективности решения — после испытаний реальной установки.

Используемые на автомобилях каталитические нейтрализаторы на основе керамического фиброфетра чувствительны к наличию в выхлопных газах остатков рабочей смеси, что усложняет систему управления двигателем. К тому же они дорогие и для двигателей столь малого объема серийно не производятся. Эти факторы делают использование нейтрализаторов такого типа невозможным. Предложено использовать гопкалиит и активный уголь, имеющиеся в свободной продаже в виде патронов к противогазам. Гопкалиит (смесь двуокиси марганца с окисью меди) выполняет роль катализатора при окислении окиси углерода за счет кислорода воздуха до неядовитого углекислого газа. Нейтрализация углекислого газа, оксидов азота, паров бензина



Рис. 8. Внешний вид транскутера

и углеводородов производится в угольном патроне (марка В). Можно использовать также универсальный защитный патрон ПЗУ-ПК с гопкалитовой вставкой. Такой вариант вызывает массу вопросов, основной из которых — поведение активного угля и гопкалита под воздействием высокотемпературных газов (перспективные задачи).

Таким образом, предложения коллектива кафедр по созданию гибридного электромобиля на базе отечественного серийного автомобиля ВАЗ-1119 “Лада-Калина”, а также сопутствующий проект транскутера с гибридной силовой установкой имеют достаточно убедительные “исторические корни” и реальные перспективы создания инновационного продукта в кратчайшие сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудряшев, Ф.А.** Разработка гибридного электромобиля на базе автомобиля ВАЗ-1119 “Калина” с учетом опыта восстановления электромобиля “Пингвин” [Текст] / Ф.А. Кудряшев, А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. “Проектирование колесных машин”. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 25–26 ноя. 2009. — М.: Изд-во МГТУ, 2010. — С. 218–222.
2. **Кудряшев, Ф.А.** Проект гибридного электромобиля на базе автомобиля ВАЗ-1119 “Калина” [Текст] / Ф.А. Кудряшев, А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов // Матер. науч.-техн. конф. “Авто-НН-2009”. Нижний Новгород: Изд-во НГГТУ, 2009. — С. 117–118.
3. **Посевкин, А.А.** Концепт-транскутер с гибридной силовой установкой [Текст] / А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов // Матер. науч.-техн. конф. “Авто-НН-2009”. — Нижний Новгород: Изд-во НГГТУ, 2009. — С. 119–120.
4. **Кудряшев, Ф.А.** Проект гибридного электромобиля на базе автомобиля ВАЗ-1119 “Калина” с учетом опыта восстановления электромобиля “Пингвин” [Текст] / Ф.А. Кудряшев, А.А. Посевкин, А.Д. Элизов, А.Г. Семенов // Матер. междунар. науч.-практ. конф. “XXXVIII Неделя Науки СПбГПУ”. — 30 ноября–5 декабря 2009. — СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009. Т. III. — С. 71–72.
5. **Посевкин, А.А.** Электромобиль в городском цикле: влияние рекуперации энергии на дальность пробега [Текст] / А.А. Посевкин, А.Д. Элизов, А.Г. Семенов // Матер. научно-практ. конф. “Научные исследования и инновационная деятельность”, 15–17 июня 2009 г. — СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009. — С. 154–156.
6. **Посевкин, А.А.** Концепция транскутера с гибридной силовой установкой [Текст] / А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов // Матер. научно-практ. конф. “Научные исследования и инновационная деятельность”. 15–17 июня 2009 г. — СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2009. — С. 156–158.
7. **Кудряшев, Ф.А.** Гибридный электромобиль на базе автомобиля ВАЗ-1119 “Калина” [Текст] / Ф.А. Кудряшев, А.А. Посевкин, А.Г. Семенов, А.Д. Элизов; Под общ. ред. Ю.Г. Попова и А.Г. Семенова. // Матер. межрегион. науч.-техн. конф. изобретателей и каталог городской выставки изобретений “Инновационная политика и изобретатели (Россия — начало XXI века)”. — СПбГПУ, апр. 2009 г. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. — С. 105–106.

УДК 621.9.048.7:621.923.01

*А.А. Барзов, А.Л. Галиновский,
В.И. Колпаков, С.К. Сальников*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО ФАКТОРА УЛЬТРАСТРУИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ультраструйная технология (УСТ) — характерный пример инновационной технологии современного машиностроительного производства. В последние годы помимо традиционных областей ее применения (резка труднообрабатываемых материалов, очистка и упрочнение поверхностей изделий) появились абсолютно новые направления ее научно-практического развития, к которым относится ультразвуковая диагностика и обработка жидкостей. УСТ представляет собой совокупность методов и средств создания и реализации таких параметров высокоэнергетической компактной струи жидкости, которые при ее взаимодействии с окружающей средой (например, при динамическом торможении о твердотелую мишень) способны привести к фиксируемым целенаправленным изменениям в обрабатываемом материале и/или в самой жидкости.

Анализ показал, что одним из основных параметров, существенно влияющих на результативность всех видов УСТ, можно считать кинематический фактор (КФ), определяющий взаиморасположение ультразвуковой жидкости к нормали поверхности обрабатываемого изделия в месте их ударно-динамического взаимодействия. Однако применительно к проблематике УСТ, в частности для гидрорезания, данный фактор не исследовался подробно теоретически.

Одна из целей совершенствования УСТ — повышение результативности обработки материалов путем определения влияния КФ ультразвуковой жидкости при ее взаимодействии с материалом.

Под КФ ультразвуковой обработки (УСО) будем понимать совокупность угловых параметров, характеризующих направление действия ударно-силовых нагрузок жидкостного или гидроабразив-

ного потока, в частности компактной гидроструи, на поверхность обрабатываемой заготовки.

Краткое описание понятия кинематический фактор

Условно в КФ гидроструи можно выделить интегральную и дифференциальную координаты. Интегральная координата КФ представляет собой угловую координату вектора коллективного (результатирующего) движения частиц струи жидкости относительно поверхности, с которой она взаимодействует. Под дифференциальной координатой КФ понимается истинная угловая координата, характеризующая взаиморасположение векторов нагрузок, действующих на поверхность в некоторой малой области относительно нормали и/или касательной к анализируемой точке поверхности.

Кинематический фактор характеризует динамическое взаимодействие набегающего потока (струи) жидкости или газа на твердое тело (преграду, мишень). Однако в ультразвуковой технологии как правило геометрические параметры струи, например ее диаметр, много меньше размеров обрабатываемой заготовки.

Кинематический фактор как функцию времени можно разделить на нестационарный, когда изменением КФ во времени с точки зрения его влияния на результат взаимодействия ультразвуковой струи с преградой пренебречь нельзя (характерный пример — очистка поверхностей пульсирующими струями, совершающими колебательное движение относительно их осей, так называемая вибрационная ультразвуковая обработка), и квазистационарный, при анализе результативности которого можно пренебречь динамическим изменением во

времени взаиморасположения вектора силового воздействия на преграду и нормали к поверхности в точке воздействия (пример этого вида КФ — классическое гидрорезание листовых материалов).

Очевидна необходимость подразделения КФ на объемный и поверхностный.

Согласно схеме, представленной на рис. 1, КФ — неотъемлемый, весьма важный технологический параметр, который в различных областях практического использования УСТ в значительной мере характеризует в целом производительность и качество УСО материалов [1, 2].

Обоснование целесообразности оценки влияния кинематического фактора

Кинематический фактор применительно к проблематике УСТ — далеко не единственный параметр, влияющий на выходные характеристики данной технологии. Поэтому обоснование перспективности его изучения и учета — значи-

мая методическая задача, решение которой на начальном этапе исследования будем искать методом экспертных оценок. Применение этого метода также связано с трудно формализуемым сравнением потенциальной результативности учета КФ по отношению к другим, более развитым и изученным направлениям повышения эффективности операционных УСТ, в частности УСО материалов. Такой подход позволяет методически верно обосновать актуальность изучения КФ как параметра управления качеством УСТ в целом. Функцию базового метода экспертного оценивания (МЭО) выполнял метод взвешенной суммы:

$$U = \sum_{i=1}^n \xi_i K_i, \quad (1)$$

где U — итоговая оценка инновационного потенциала анализируемого конструкторско-технологического решения (КТР) и/или мероприятия, параметра, фактора и т. д.; ξ_i — весовой коэффи-

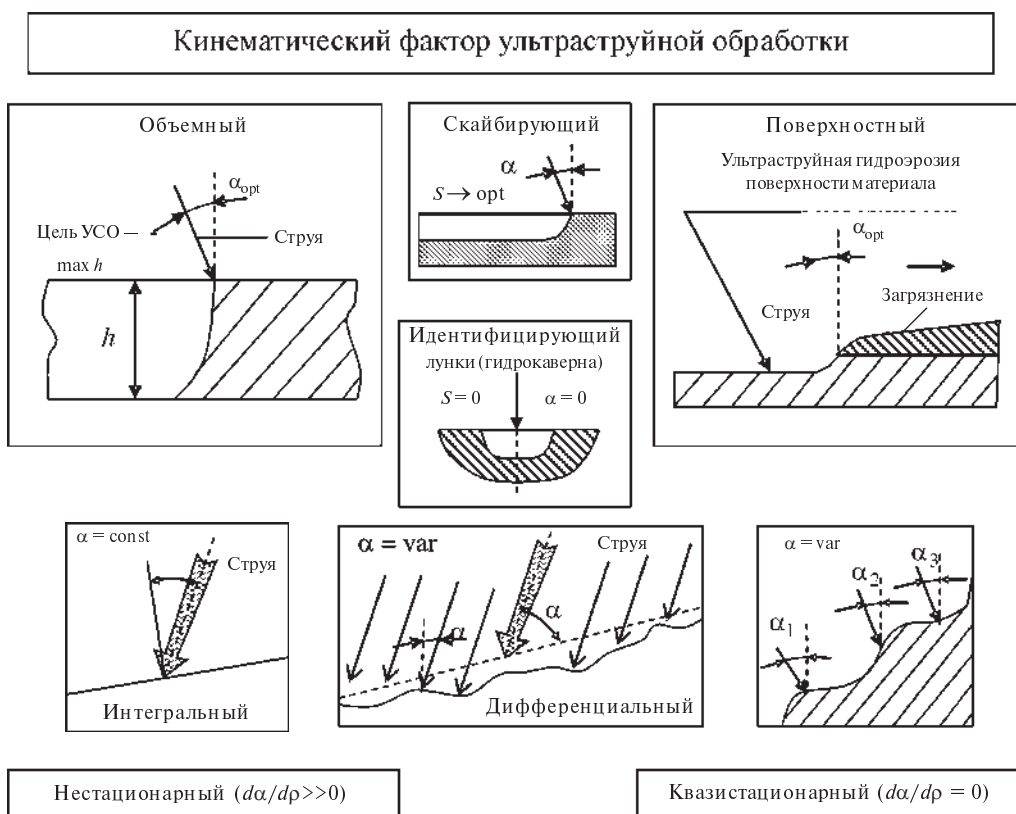


Рис. 1. Структурная схема классификации кинематического фактора ультразвуковой обработки (α — угол атаки струи (кинематический фактор); α_{opt} — угол атаки струи, позволяющий повысить производительность обработки; h — толщина разрезаемого материала; S — скорость подачи инструмента (струи); τ — время обработки)

циент, индивидуализирующий значимость критерия K_p , характеризующего некоторое качество КТР; n — общее число критериев качества (оценок).

Применение данного метода позволило рассчитать значения итоговой оценки значимости U исследований различных факторов УСТ и сделать выводы о приоритетности решения вопросов, связанных с оптимизацией КФ.

На первом этапе реализации МЭО путем опроса экспертов были сформулированы основные критерии, характеризующие значимость возможных положительных изменений эффективности УСО в результате целенаправленного варьирования технологических параметров. На втором этапе анализа перед экспертами была поставлена задача по формулированию основных способов повышения эффективности УСТ и их количественной оценки.

После выполнения процедуры формализации мнений экспертов была получена с использованием выражения (1) итоговая оценка значимости исследований различных факторов УСТ (рис. 2).

Согласно полученным данным (см. рис. 2) КФ УСТ следует считать пока недостаточно исследованным технологическим параметром УСО, изучение и учет которого способны повысить эффективность УСТ в целом.

Модель влияния кинематического фактора резания

Согласно классификации, представленной на рис. 1, рассмотрим влияние КФ на процесс

формирования профиля реза высокоскоростной абразивно-жидкостной суспензией (рис. 3).

Поскольку большинство работ, например [3], связано с анализом процессов гидроструйной эрозии поверхности, результаты этих исследований трудно адаптируемы к решению поставленной задачи о влиянии КФ на формирование поверхности реза на больших глубинах резания. В связи с этим специально рассмотрим процесс образования траектории реза гидроабразивным потоком в заготовке, имеющей существенную толщину.

Для получения количественных соотношений введем следующие основные допущения.

1. Поток, по крайней мере вблизи обрабатываемой поверхности, представляет собой достаточно однородную в энергетическом отношении абразивно-жидкостную гомогенную суспензию, имеющую некоторую скорость относительного движения $V(\varphi)$.

2. Сила торможения потока вблизи стенки (тангенциальная составляющая) пропорциональна инерционной силе, возникающей из-за определенной кривизны профиля реза, которая прижимает поток к обрабатываемой поверхности, обеспечивая тем самым ее абразивно-жидкостное разрушение (изнашивание, гидроэрозию). Это является аналогом сил нормального давления и трения при анализе классической схемы фрикционного контакта:

$$F(\varphi) = K_p N(\varphi), \quad (2)$$

где $F(\varphi)$ — сила торможения потока вблизи стенки разрезаемого материала; $N(\varphi)$ — инерцион-

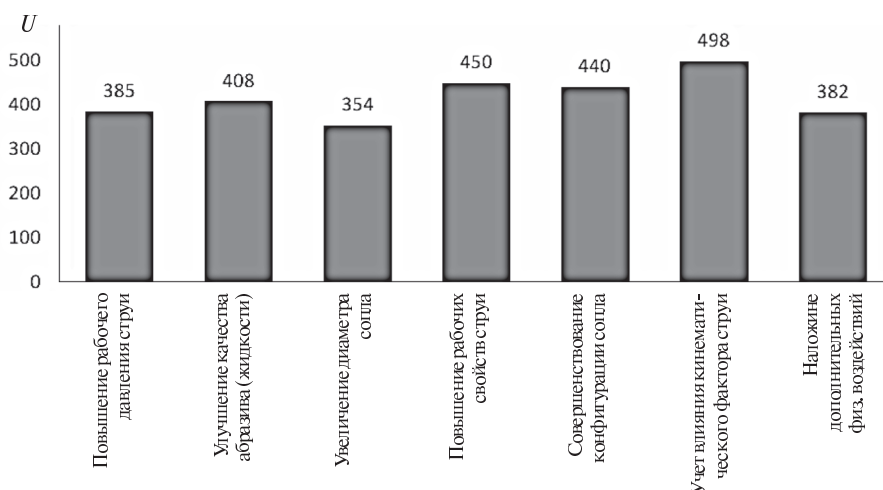


Рис. 2. Результаты итоговой оценки значимости исследований различных факторов УСТ

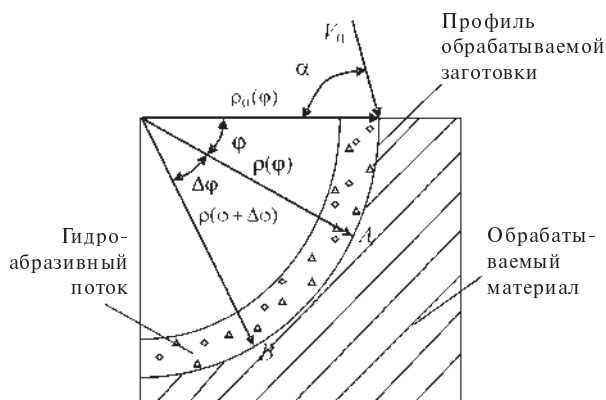


Рис. 3. Расчетная схема формирования профиля реза: $\rho(\varphi)$ — радиус кривизны реза; α — угол атаки струи; V_0 — скорость соударения струи с обрабатываемым материалом; φ и $\Delta\varphi$ — соответственно угол поворота гидроабразивного потока и его приращение; A, B — некоторые близко расположенные точки на поверхности реза (обрабатываемой поверхности)

ная сила, зависящая от кривизны профиля реза; K_p — коэффициент гидроабразивного резания. В данном случае K_p некоторый постоянный для конкретных условий обработки параметр, близкий по смыслу к коэффициенту трения в традиционной трактовке динамических соотношений трения и изнашивания, другие виды энергетических превращений не учитываются. В частности, считается малой энергия, затрачиваемая на процессы образования новых поверхностей и структурно-фазовые превращения в обрабатываемом материале и рабочей гидросреде. Поэтому физически обоснованно полагаем, что основное изменение кинетической энергии потока связано с работой сил гидроабразивного трения (изнашивания) на обрабатываемой поверхности.

3. Кроме работы сил “гидроабразивного” трения и изнашивания, другие виды энергетических превращений не учитываются. В частности, считается малой энергия, затрачиваемая на процессы образования новых поверхностей и структурно-фазовые превращения в обрабатываемом материале и рабочей гидросреде. Поэтому физически обоснованно полагаем, что основное изменение кинетической энергии потока связано с работой сил гидроабразивного трения (изнашивания) на обрабатываемой поверхности.

Учитывая эти допущения и следуя логике поставленной задачи, согласно схеме и обозначениям на рис. 3 изменение кинетической энергии потока ΔE_k при его повороте на малый угол $\Delta\varphi$ можно записать следующим образом:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} [F(\varphi + \Delta\varphi) + F(\varphi)] \times \frac{1}{2} [\rho(\varphi + \Delta\varphi) + \rho(\varphi)] \Delta\varphi. \quad (3)$$

Коэффициент $1/2$ введен в соотношение (3) в соответствии с известной теоремой о среднем. Первый множитель представляет собой “силу трения”, совершающую механическую работу на перемещении, описываемом остальными сомножителями. Таким образом (3) — суть элементарное изменение кинетической энергии потока, затрачиваемое на преодоление средних сил сопротивления трению и резанию на малом среднем линейном перемещении.

Выражение (3) представляет интегрально-дифференциальное соотношение, полученное на основе закона сохранения энергии без учета потерь, которыми можно пренебрегать в соответствии со сделанными ранее физически обоснованными допущениями о малости вторичных энергетических превращений. В этом состоит смысл интегральности соотношения (3), которое вполне справедливо при малых (дифференциальных) перемещениях гидроабразивного потока.

Следуя первому допущению, выделим некоторую элементарную массу потока Δm вблизи обрабатываемой поверхности криволинейного реза. Тогда, используя известные понятия и соотношения криволинейного движения, в частности понятия центростремительной силы и ускорения, левую и правую части выражения (3) можно представить так:

$$\frac{1}{2} \Delta m \{ V^2(\varphi) - [V(\varphi) - \Delta V(\varphi + \Delta\varphi)]^2 \} = \Delta m \frac{1}{4} K_p \left[\frac{V^2(\varphi)}{\rho(\varphi)} + \frac{V^2(\varphi + \Delta\varphi)}{\rho(\varphi + \Delta\varphi)} \right], \quad (4)$$

где $V(\varphi)$ — скорость потока, а ΔV — ее изменение (приращение).

Учитывая малость значений $\Delta(\varphi)$ в первом приближении и пренебрегая величинами второго порядка малости, после промежуточных преобразований определим скорость потока

$$V(\varphi) = V_0 \exp(-K_p \varphi). \quad (5)$$

Таким образом, соотношение (5) в первом приближении описывает изменение скорости гидроабразивного потока в глубине разрезаемой заготовки. Коэффициент гидрорезания K_p в данном соотношении отражает режущую (истирающую, эрозионную) способность гидроабразивной струи для конкретных условий обработки. Причем аналогичный результат можно получить для чисто жидкостной струи.



Несмотря на кажущуюся простоту, соотношение (5) обладает необходимой общностью и допускает вполне обоснованную конкретизацию исследуемого КФ гидрорезания (гидроабразивного резания). Рассмотрим основные выводы, следующие из (5):

1. Полученное уравнение (5) при $\varphi \approx \pi/2$ позволяет определить своеобразную точку отрыва гидроабразивного потока от обрабатываемой поверхности, т. е., по сути, рассчитать критическую (предельную) толщину прорезаемого материала.

2. В научно-методическом плане уравнение (5) позволяет путем весьма ограниченного числа прямых экспериментов определить основные физико-технологические параметры гидрорезания, а именно: истинную скорость рабочего участка гидроабразивной струи V_0 и своеобразный коэффициент гидрорезания K_p . Этот коэффициент представляет собой соотношение между комплексом технологических параметров процесса — рабочее давление, концентрация абразива, скорость (энергии) струи и т. д. — и результатом этого действия, которое определяется радиусом и кривизной поверхности резания, т. е. соотносительностью между тангенциальными и касательными напряжениями, свойствами обрабатываемого материала и т. д. Причем кривизна ρ является функцией практически всех параметров обработки и легко определяется экспериментально, например при различных скоростях подачи инструмента (струи) S относительно заготовки и варьировании КФ — угла атаки α (см. рис. 1).

Таким образом, уравнение (5) позволяет при весьма общих допущениях анализировать вполне конкретные закономерности рассматриваемого физико-технического метода обработки материалов. Кроме этого, из соотношения (5) можно также определить все параметры функции $\rho(\varphi)$, которая выражает основной “отклик” обрабатываемого материала на данный вид технологического воздействия — высокоскоростную гидроабразивную струю.

Для практической оценки и количественного определения $\rho(\varphi)$ необходимо сделать еще одно физически обоснованное допущение. Считая постоянной скорость подачи инструмента (струи) S , мм/с, делаем очевидный вывод о равноудаленности обработанной и обрабатываемой поверхности относительно гидроабразивной струи (см. рис. 3). Тогда, применяя энергетиче-

ское утверждение о прямопропорциональной зависимости между затрачиваемой на процесс резания работой и ее результатом, можно потребовать равенства работы всех сил на всех участках реза. Иными словами, работа сил резания должна быть величиной постоянной. В противном случае будет нарушено условие равноудаленности, которое вполне очевидно при реальных стабильных значениях скорости подачи S . В принципе необходимо учесть, что перемещения, на которых совершается работа сил резания, в точках A и B будут различны. В первом приближении для реального случая резания листовых материалов этим обстоятельством можно пренебречь. Тогда с точностью до масштабирующего коэффициента получим соотношение

$$V^2(\varphi)(\sin \varphi + K_p \cos \varphi) = C_m \rho(\varphi), \quad (6)$$

где C_m — масштабный коэффициент, уравнивающий размерности в (6).

Или с учетом уравнения (5)

$$\rho(\varphi) = \frac{V_0^2}{C_m} (\sin \varphi + K_p \cos \varphi) \exp(-2K_p \varphi). \quad (7)$$

Соотношение (7) полностью связывает внешнюю энергетику процесса криволинейного гидрорезания (V_0), внутреннюю содержательность процессов на границе раздела “твердое тело — гидроабразивная струя (зона резания)” и результат этого воздействия — $\rho(\varphi)$.

Отметим, что экспериментальные данные, частично изложенные в работе [2], подтверждают адекватность предложенной детерминированной модели влияния КФ на эффективность процесса гидрорезания.

Численное решение задачи определения влияния кинематического фактора

Численно решая задачу определения влияния КФ, оценим его применительно к процессу формирования профиля реза струей жидкости. Рассмотрим расчетную схему процесса, представленную на рис. 3, согласно которой траекторию движения гидроабразивного потока разобьем на 90 участков, т. е. через один угловой градус. Предполагаем, что на i -м участке траектория потока является дугой окружности с радиусом $\rho(\varphi) = R_i$, углом $\Delta\varphi = 1^\circ$ и что известны все параметры потока (R_{i+1} — радиус, V_{i+1} — скорость и $\varphi_i = (i+1)^\circ$ — угол).

Примем, что интенсивность воздействия гидроабразивного потока J_i , действующего на обрабатываемый материал, прямопропорциональна нормальной силе:

$$J_i = K_M m \frac{V_i^2}{R_i}, \quad (8)$$

где $m \frac{V_i^2}{R_i} = F_{N_i}(\varphi)$ — нормальная сила, действующая на поверхность реза со стороны элемента гидроабразивного потока массой m , а K_M — некоторый масштабный коэффициент.

Считая скорость подачи S постоянной, запишем

$$\begin{aligned} J_i \cos \varphi_i &= m K_M \frac{V_i^2}{R_i} \cos \varphi_i = \\ &= \text{const} \rightarrow \frac{V_i^2}{R_i} \cos \varphi_i = \text{const}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку на i -м участке траектория потока является дугой окружности с радиусом R_i и углом $\Delta\varphi = 1^\circ$, изменение кинетической энергии потока на i -м участке можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta E_{ki} &= \frac{1}{2} [J_i + J_{i+1}] R_i \Delta\varphi = \\ &= \frac{1}{2} m K_M \left[\frac{V_i^2}{R_i} + \frac{V_{i+1}^2}{R_{i+1}} \right] R_i \Delta\varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

С другой стороны,

$$\Delta E_{ki} = \frac{1}{2} m [V_i^2 - V_{i+1}^2]. \quad (11)$$

Приравняв выражения (10) и (11), получим уравнение

$$\frac{1}{2} m K_M \left[\frac{V_i^2}{R_i} + \frac{V_{i+1}^2}{R_{i+1}} \right] R_i \Delta\varphi = \frac{1}{2} m [V_i^2 - V_{i+1}^2]. \quad (12)$$

После простейших преобразований уравнение (12) примет вид

$$K_p \left[\frac{V_i^2}{R_i} + \frac{V_{i+1}^2}{R_{i+1}} \right] R_i \Delta\varphi = V_i^2 - V_{i+1}^2. \quad (13)$$

Из уравнения (9) следует

$$\frac{V_i^2}{R_i} \cos \varphi_i = \frac{V_{i+1}^2}{R_{i+1}} \cos \varphi_{i+1}. \quad (14)$$

Полученные уравнения (8–14) позволяют определить координаты точек профиля реза и построить его [4].

Далее, поворачивая профиль реза вокруг точки входа потока, можно определить зависимость глубины резания (толщины разрезаемого образца) от КФ (рис. 4). Как видно из графика, в конкретных условиях обработки при $\alpha = 60$ – 65° профиль реза обладает максимальной глубиной.

В дополнение к представленным зависимостям, следующим из уравнения (10), может быть установлена взаимосвязь между потерями кинетической энергии и углом поворота траектории $\Delta\varphi$. Проведенные расчеты показали, что максимальная глубина резания при $\alpha = 90^\circ$ составляет 0,05058 м.

Моделирование влияния кинематического фактора на эффективность ультразвуковой очистки

Проведенный анализ показал, что КФ оказывает существенное влияние не только на эффективность гидрорезания, но и на технологию ультразвуковой очистки материалов. Для подтверждения данного предположения проведем расчеты по определению влияния угла атаки ультразвуковой жидкости на примере очистки трудноудаляемых

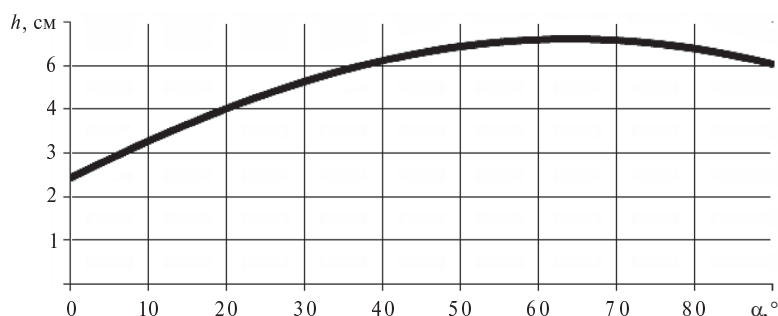


Рис. 4. Зависимость глубины резания h от кинематического фактора α



загрязнений с поверхности детали. Для моделирования динамического взаимодействия струи жидкости и многослойной преграды воспользуемся аппаратом механики сплошной среды (МСС) и потенциалам современного компьютерного обеспечения (*AutoDyn v.6.1* от *Ansys*).

Постановка задачи МСС заключается в составлении замкнутой системы уравнений, которая описывает движение и состояние сплошной среды с учетом ее физико-механических свойств, и внешних силовых факторов, позволяя найти все функции, определяющие движение и состояние среды в зависимости от координат и времени. Необходимо пройти следующие шаги для правильной постановки задачи МСС.

1. Выбор системы отсчета и систем координат, по отношению к которым рассматривается движение деформируемой среды.

Моделирование производится в относительной системе координат (рис. 5), которая располагается в точке начального соприкосновения струи и преграды.

2. Выбор модели сплошной среды для изучаемого процесса. Для данного вида взаимодействия с учетом природы и условий процесса необходимо выбрать мультиматериальную эйлерову модель описания движения деформируемой сплошной среды, которая заключается в исследовании изменения величин, описывающих движение и состояние сплошной среды для каждой из точек пространства.

3. Составление системы исходных уравнений для выбранной модели сплошной среды.

4. Выбор основных неизвестных и построение систем нахождения этих неизвестных. В данной задаче в некоторых точках пространства модели необходимо фиксировать следующие характеристики среды: скорость струи во время ее движения и взаимодействия с преградой, а именно колебания скорости в струе; колебания давления и плотности внутри преграды; зоны упругого и пластического деформирования, а также разрушения среды; зоны распространения избыточного давления взаимодействия струи и преграды. Для этого в поле расчетной модели необходимо ввести некоторые характерные точки — реперные точки или маркеры (*gauges*).

5. Формулировка начальных и граничных условий:

к начальным условиям (*initial conditions*) относятся: начальная скорость струи $V_0 = 0,4$ —

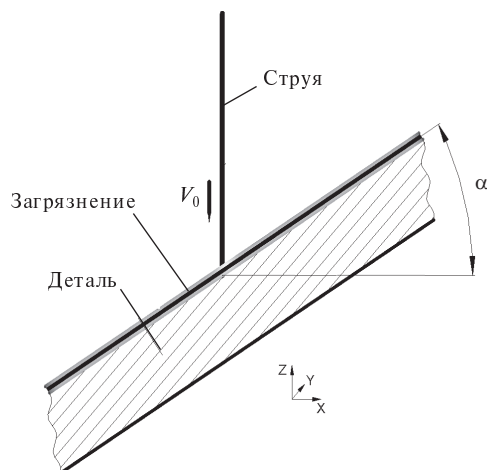


Рис. 5. Схема взаимодействия струи и преграды в относительной системе координат

— 1,0 км/с, $K\Phi(\alpha)$; начальные физико-механические характеристики материалов детали, жидкости (струи) и воздуха;

к граничным условиям (*boundaries*) относятся: исходящий поток из области (*flow out*), который отсекает ненужный движущийся материал (находится по краям области); контактные напряжения в точках взаимодействия водной струи и поверхности преграды; поток, входящий (*flow in*) в область, который вводит в расчетную зону воду; максимальные напряжения разрушения материалов; максимальное значение скорости любой точки области; неограниченный разброс по энергии между каждым шагом интегрирования; неограниченный разброс по энергии за весь период расчета.

Благодаря реализации предложенной расчетной модели, была установлена динамика развития процесса очистки детали с покрытием на масляной основе струей воды диаметром $d = 1$ мм и скоростью $V = 600$ м/с (рис. 6).

На рис. 7 в качестве иллюстрации представлена одна из характеристик процесса взаимодействия струи и детали — динамика изменения скорости V_x детали по координате x .

В заключение анализа процесса моделирования и его результатов отметим следующее:

при УСО детали в диапазоне скоростей струи жидкости 400—1000 м/с характер движения металлической основы детали носит колебательный характер. При этом ее напряженно-деформируемое состояние находится в зоне упругости $\sigma_{i\max} < \sigma_T$, где σ_T — предел текучести материала детали;

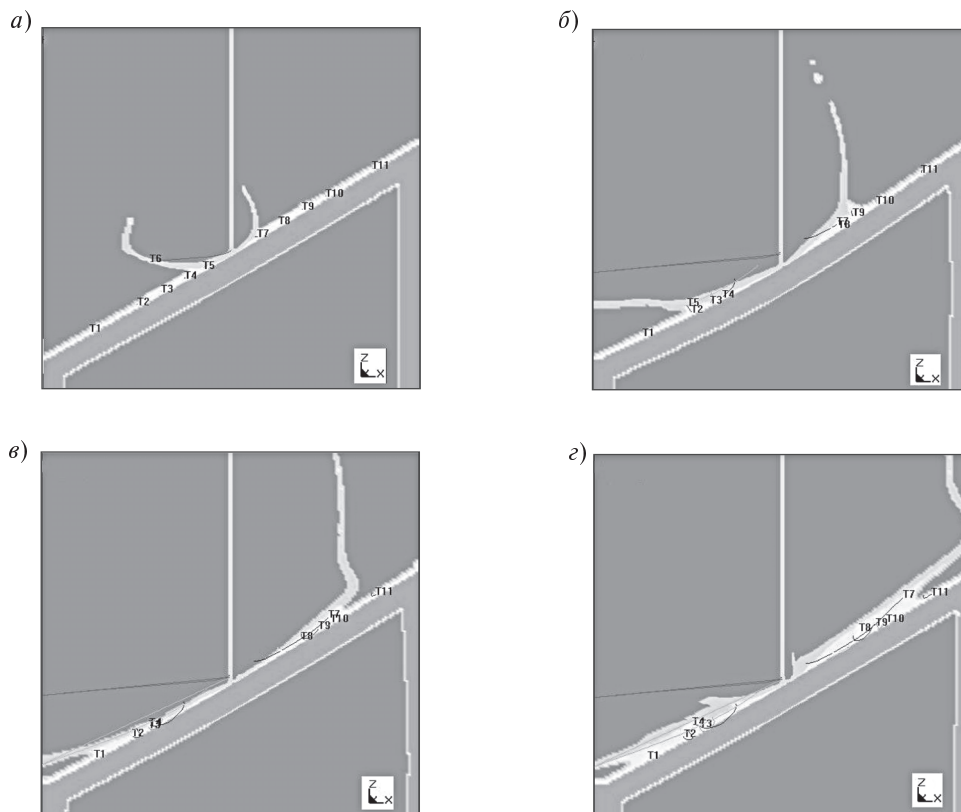


Рис. 6. Динамика развития процесса ультразвуковой очистки при $\alpha = 30^\circ$:
 а — момент первоначального соударения струи технологической жидкости с поверхностью детали (покрытием); б — начало процесса снятия покрытия с поверхности детали;
 в — развитие процесса очистки; г — окончательный этап очистки детали на данном участке

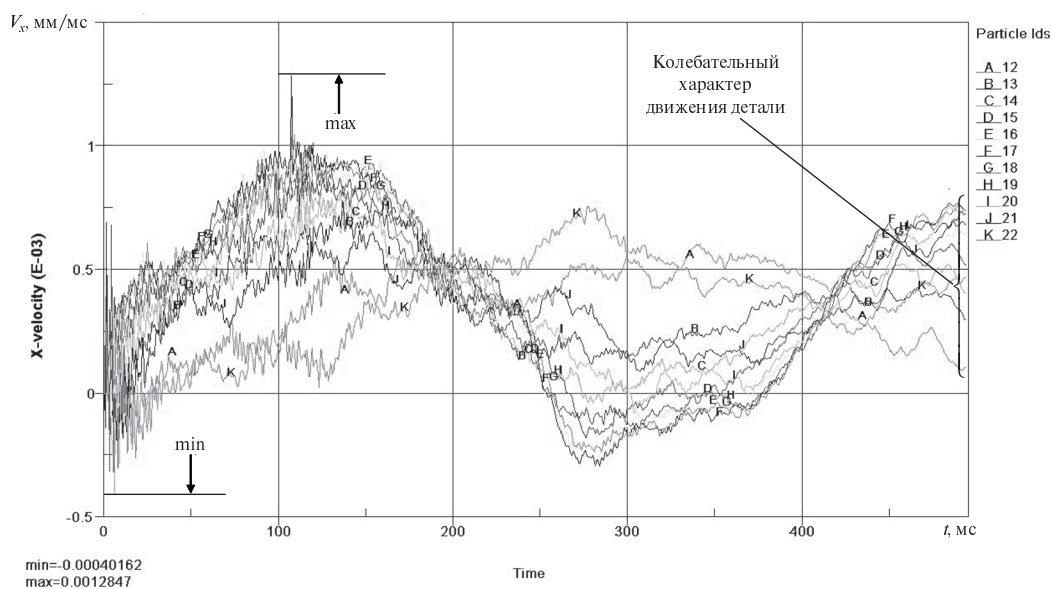


Рис. 7. Динамика изменения скорости детали, V_x



при удалении “маслянистых” участков покрытий с поверхности детали в диапазоне скоростей струи жидкости 400–800 м/с, $\alpha = 30^\circ$ наблюдается достаточно широкая область эффективного действия струи $(20-30)d$, где d — диаметр струи. С увеличением угла обработки до 60° пятно эффективного удаления несколько уменьшается до $(15-20)d$, а скорость удаляемых частиц увеличивается. При этом выявлен механизм удаления покрытия, заключающийся в совмещении колебательного движения детали с действием на нее набегающего потока жидкости, скользящего вдоль ее поверхности. Первое движение приводит к “встряске” частиц покрытия и отделению их от металлической основы детали, второе — к удалению частиц с поверхности детали;

при обработке детали с твердым покрытием эффективной с точки зрения удаления является только область в зоне контакта струи с деталью, при этом максимальная скорость удаления частиц не зависит от скорости (400–1000 м/с) и угла ($30-60^\circ$) обработки.

Экспериментальное изучение кинематического фактора

Целью экспериментальной проверки и подтверждения достоверности математических моделей и теоретических зависимостей было определение профиля реза и его глубины в зависимости от различных значений КФ (угла атаки). Для обеспечения возможности наблюдения за результатом гидроабразивного воздействия струи в качестве экспериментального материала было выбрано оргстекло.

Для наглядного подтверждения сделанных выводов на рис. 8 продемонстрировано изображение экспериментального образца с надрезом, выполненным при $\alpha = 60^\circ$ и наложенной на него теоретической зависимостью, рассчитанной для того же значения α .

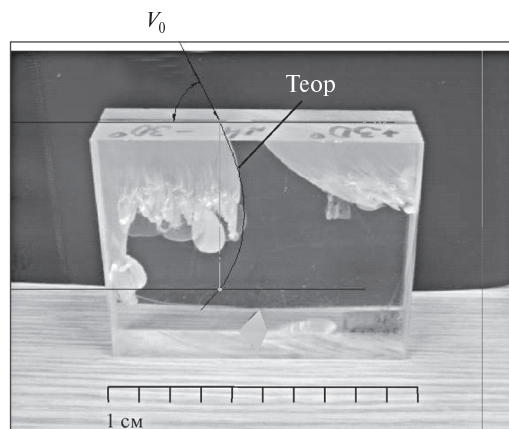


Рис. 8. Графическое сопоставление экспериментальной и теоретической траектории реза для $\alpha = 60^\circ$

В заключение отметим, что полученные результаты — лишь промежуточный этап в исследовании и анализе влияния кинематического фактора ультразвуковой струи на эффективность гидрообработки материалов.

Перспективными направлениями исследований при этом должны стать:

изучение влияния нестационарности КФ гидроабразивной струи на производительность резания (вибродружное резание);

проведение анализа высокочастотной динамики процесса взаимодействия гидроабразивной струи с преградой, например методом акустической эмиссии;

исследование влияния КФ на результативность использования гидроабразивной струи как средства изменения потребительских свойств самой рабочей жидкости.

Кроме того, отметим, что экспериментальные данные, частично изложенные в работе [1], подтверждают адекватность предложенной детерминированной модели влияния КФ на эффективность процесса гидроабразивного резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзов, А.А. Физико-технологические возможности ультразвуковой обработки материалов и жидкостей. Физическая гидродинамика [Текст] / А.А. Барзов, В.С. Пузаков, С.К. Сальников [и др.] // Препринт № 6 / МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический фак-т. — 2004. — 25 с.
2. Барзов, А.А. Анализ влияния кинематического фактора на эффективность ультразвуковой обработки [Текст] / А.А. Барзов, С.К. Сальников, Н.Н. Сысоев

[и др.] // Препринт № 6 / МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический фак-т. — 2006. — 27 с.

3. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов. — М.: Наука, 1974. — 640 с.

4. Барзов, А.А. Технология ультразвуковой обработки и диагностики материалов [Текст] / А.А. Барзов, А.Л. Галиновский // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 246 с.

УДК 620.179

Е.Н. Лахова, В.В. Носов

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НАХЛЕСТОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Для повышения надежности деталей машин и конструкций необходимо получать достоверные оценки их текущего состояния и остаточного ресурса. Эта задача может быть решена путем интерпретации данных акустико-эмиссионных испытаний подобных объектов с использованием микромеханической модели акустической эмиссии (АЭ) [1, 2]. При этом необходимо учитывать неоднородность распределения прочностных свойств и напряжений по объему материала. С этой целью в микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенного материала (ММАЭГМ) введено распределение показателя состояния структурных элементов по объему, учитывающее одновременно оба эти фактора. В предлагаемой статье рассматривается вопрос о возможности раздельной оценки влияния на прочностные свойства изделия неоднородности макронапряженного состояния и неоднородности структуры (в качестве примера рассматриваются образцы нахлесточных сварных соединений). Решение этой проблемы может способствовать оптимизации технологии изготовления деталей. Например, уменьшить неоднородность структуры можно проведением соответствующей термообработки, снизить неоднородность макронапряженного состояния — введением конструктивных изменений, понижением концентрации напряжений.

В ММАЭГМ [1, 2] твердое тело представляется в виде связанных между собой структурных элементов. Являясь событием случайным, разрушение связей происходит в различных точках тела, координаты которых на начальной стадии процесса (когда количество разрушенных связей меньше 1 %) равномерно рассеяны по всему телу. Концентрация C микротрещин (разрушенных структурных элементов — атомных или молекулярных связей, волокон, кристаллов, зерен, ячеек и др.) изменяется при этом во времени t по закону

$$C(t) = \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{dt}{\Theta_{cp}(t)} \right) \right), \quad (1)$$

где $C(0)$ — начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения, Θ_{cp} — среднестатистическое время ожидания разрушения одного структурного элемента, задаваемое формулой Журкова, при начальном условии $C(0) = 0$.

Формула Журкова [4] устанавливает связь времени τ до разрушения с величиной напряжения σ :

$$\tau = \tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{KT} \right), \quad (2)$$

где $\tau_0 = 10^{-12} - 10^{-14}$ с — величина, сопоставимая с периодом атомных колебаний; U_0 — энергия активации процесса разрушения (ее значение постоянно для конкретного материала); γ — структурно-чувствительный параметр; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

В некоторый момент времени $t = \tau^*$ концентрация C достигает критической величины C^* , при которой разрушение каждого структурного элемента уже существенно влияет на напряженное состояние вокруг соседнего, ранее разрушенного [2]. Достижение критической концентрации микротрещин приводит к их объединению и образованию кластера — области разрушенных связей, размеры которой связаны с размерами объединяемых структурных элементов. Если размеры кластера не опасны, то дальнейшее разрушение переходит на следующий, более крупномасштабный этап дисперсного разрушения в виде накопления концентрации кластеров данного размера. Этот этап разрушения описывается аналогичными закономерностями и также лимитируется моментом накопления критической концентрации областей разрушения с размером как у рассматриваемого кластера. Этапы дисперсного разрушения



сменяют друг друга до тех пор, пока размер очередного кластера не станет опасным, т. е. таким, при котором дальнейшее разрушение локализуется и происходит в виде прорастания опасного кластера (трещины) в поле создаваемых им перенапряжений вплоть до полного разделения тела на части.

Принято считать, что твердое тело разрушено, если количество разрушенных структурных элементов составляет 0,01–0,1 от числа начальных, т. е. когда $C^* = 0,01–0,1 C_0$ [4].

Из-за неоднородности структурного и напряженного состояний материала среднестатистические значения времени разрушения структурных элементов тела в общем случае неодинаковы. Для характеристики неоднородности состояния материала в [2] введена функция $\Psi(\omega)$ плотности распределения значений величины $\omega = \gamma\dot{\sigma}/KT$ по структурным элементам.

Оценка характеристик прочности и ресурса состоит в прогнозировании времени $\tau_{\text{ост}}^*$, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин C^* , путем определения параметров и решения следующей системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} \int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} \Psi(\omega) \left[1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{dt}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0}{KT} - \omega(t) \right)} \right) \right] \times d\omega = \frac{C^*}{C_0}; \\ \tau_{\text{ост}}^* = \tau^* - \tau_{\text{пр}}, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{пр}}$ — предварительно потерянный объектом ресурс; ω_0 и $\omega_0 + \Delta\omega$ — соответственно минимальная и максимальная величины параметра ω .

Чем выше степень несовершенства структуры материала и значения напряжений, тем больше величина параметра ω . Таким образом, определив параметры функции $\Psi(\omega)$ при известных значениях τ_0 , U_0 , T , $\tau_{\text{пр}}$ и отношения C^*/C_0 , мы получаем возможность прогнозировать разрушения материала и оценивать остаточный ресурс объекта.

Определение параметров функции $\Psi(\omega)$ возможно на основе использования метода акустической эмиссии, так как, согласно ММАЭГМ [2], число зарегистрированных сигналов акустической эмиссии $N(t)$ пропорционально числу разрушенных связей $C(t)$:

$$N(t) = k_{AE} C(t), \quad (3)$$

где k_{AE} — коэффициент пропорциональности (акустико-эмиссионный коэффициент).

Оценка параметров функции $\Psi(\omega)$ может быть осуществлена на основе акустико-эмиссионного наблюдения за микротрещинообразованием в материале, например при его нагружении с постоянной скоростью роста напряжений. В таком случае

$$\omega = \frac{\gamma\dot{\sigma}}{KT},$$

где $\dot{\sigma}$ — скорость роста напряжений, и для характеристики неоднородности структурно-напряженного состояния материала может быть использована функция плотности распределения по структурным элементам параметра $\bar{\omega} = \frac{\gamma\dot{\sigma}}{KT}$ [2] или $\tilde{\omega} = \gamma\dot{\sigma}$ (при условии постоянства температуры по объему тела).

Нами были проведены испытания образцов нахлесточных сварных соединений разного типа с различным положением и числом дефектов швов (рис. 1). Пластины образцов первого типа соединены лобовым швом, второго типа — лобовым и двумя фланговыми швами, третий тип имеет два фланговых шва. Материал пластин — сталь СтЗпс, толщина пластин 6 мм, сварные швы Н1-катет 6 мм по ГОСТ 14771-80, сварочная проволока СВ08Г2С ОМ Ø 1,2 мм, углекислота по ГОСТ 8050-85. В различных местах швов были просверлены отверстия диаметром 6 мм. Верхняя часть каждого образца закреплялась в неподвижном захвате испытательной установки, нижняя — в подвижном, образцы испытывались на растяжение при постоянной

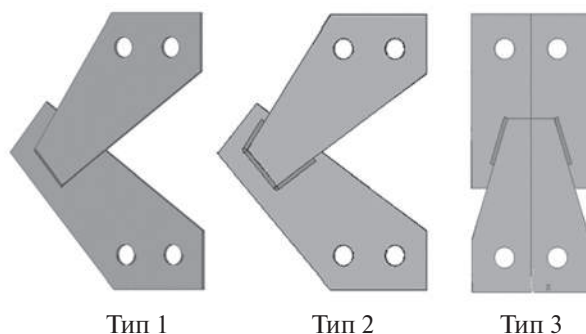


Рис. 1. Образцы нахлесточных сварных соединений

скорости перемещения второго захвата. В процессе нагружения при помощи компьютеризированной двухканальной измерительной акустико-эмиссионной системы проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии.

С использованием пакета ANSYS [5] для каждого из образцов была создана модель сварного соединения, состоящая из двух пластин и одного или нескольких швов. Сварной шов рассматривался как твердое тело, прикрепленное двумя своими гранями к соответствующим граням пластин. Для всех элементов сварного соединения был выбран один и тот же однородный изотропный материал с модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Рассматривался случай растяжения образца единичной силой. На рис. 2 показано полученное при этом для образца первого типа распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу). Для данного типа образцов максимальные напряжения возникают в нижней части шва в месте его соединения с двумя пласти-

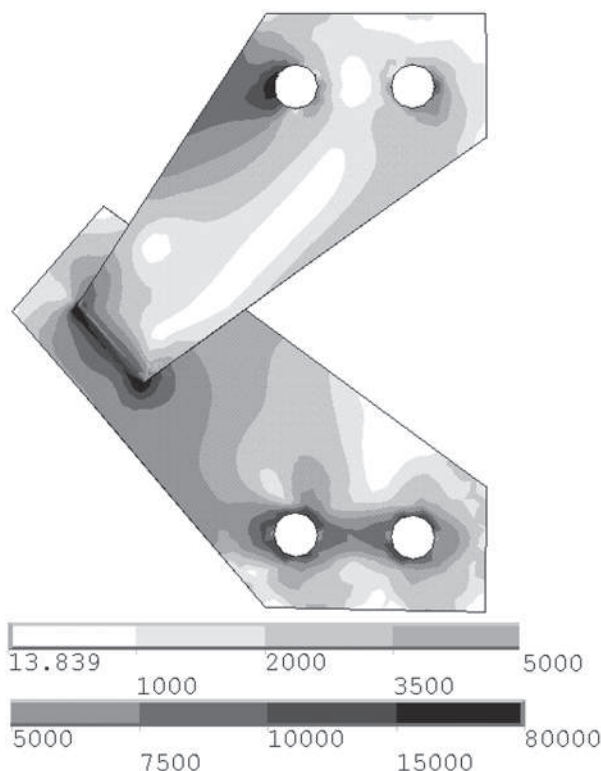


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в образце нахлесточного сварного соединения типа 1

нами. Напряженное состояние характеризуется высокой неоднородностью.

По данным, полученным при расчете эквивалентных напряжений в образцах нахлесточных сварных соединений, были построены распределения относительной величины напряжений по объему сварного шва $\Psi_V(\sigma/\sigma_{\max})$, где σ_{\max} — максимальное напряжение в шве (рис. 3). Из графика следует, что для каждого образца существует значение напряжения, испытываемое максимальным числом элементов, и чем выше напряжение, тем меньшему числу структурных элементов оно соответствует. Максимальные же напряжения сосредоточены в очень небольшом объеме.

В данной работе рассматривается нагружение образцов только в пределах упругого участка, когда величина напряжения пропорциональна величине деформации и в первом приближении можно принять, что скорость роста напряжения в какой-либо точке тела пропорциональна величине напряжений в этой точке. Исходя из принятых допущений, для материала сварного шва можно определить функцию плотности распределения по объему скорости роста эквивалентных напряжений $\Psi_V(\dot{\sigma})$.

Поскольку $\dot{\omega}$ — произведение структурно-чувствительного параметра γ на величину скорости роста напряжений, вид функции $\Psi_{\omega}(\dot{\omega})$ плотности распределения $\dot{\omega}$ по структурным элементам зависит как от характеристик напряженного состояния материала, так и от степени несовершенства его структуры. В качестве функции $\Psi_{\omega}(\dot{\omega})$ в зависимости от степени неоднородности состояния материала может

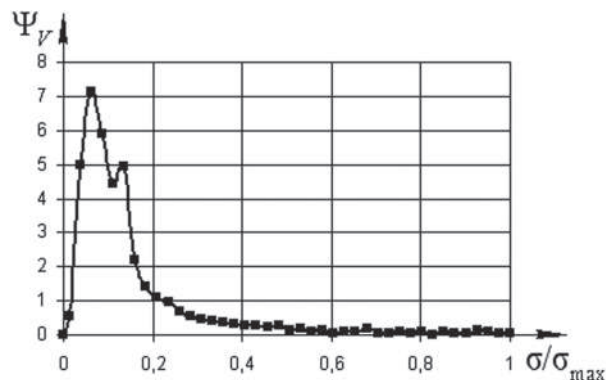


Рис. 3. Функция плотности распределения эквивалентных напряжений по объему шва образца нахлесточного сварного соединения



быть использовано равномерное, логарифмически-нормальное или двухпрямоугольное распределение [2]. Рационально для образцов нахлесточных сварных соединений выбрать логарифмически-нормальное распределение.

В том случае, когда уже построены кривые распределения двух величин ($\tilde{\omega}$ и $\tilde{\sigma}$), нахождение кривой распределения величины, равной их отношению ($\gamma = \tilde{\omega} / \tilde{\sigma}$), не составляет большого труда и может быть осуществлено по методу Монте-Карло. Для этого в соответствии с распределением $\Psi_{\omega}(\tilde{\omega})$ случайным образом выбирают n значений $\tilde{\omega}$, аналогично в соответствии с распределением $\Psi_{\sigma}(\tilde{\sigma})$ выбирают n значений $\tilde{\sigma}$, из соотношения $\gamma = \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\sigma}}$ определяют n случайных значений γ и по ним строят кривую распределения γ по структурным элементам — $\Psi_{\gamma}(\gamma)$.

Построение кривой $\Psi_{\gamma}(\gamma)$ дает возможность оценивать структурную неоднородность состояния материала объекта, а по кривой распределения $\Psi_{\gamma}(\sigma/\sigma_{\max})$ (или $\Psi_{\sigma}(\tilde{\sigma})$) можно судить о степени неоднородности его напряженного состояния.

Временная зависимость логарифма числа импульсов АЭ $N(t)$ (рис. 4), полученная для образцов нахлесточных сварных соединений, имеет три характерных участка, сопоставление которых с диаграммой нагружения позволяет считать их участками кинетически неоднородного разрушения ($a-b$), где происходит разрушение небольшого числа наиболее поврежденных структурных элементов материала, кинетически однородного разрушения

($b-c$) и пластического разрушения ($c-d$), когда скорость нагружения начинает снижаться, увеличивается средняя длительность сигналов и коэффициент их перекрытия [1].

При использовании метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля прочность объекта контроля может быть оценена по параметрам зависимости логарифма числа импульсов АЭ от времени $\ln(N(t))$ на этапе кинетически-однородного разрушения. На этом этапе зависимость $\ln(N(t))$ линейна (рис. 4), и, поскольку он соответствует упругим деформациям материала, для образцов нахлесточных сварных соединений в случае перемещения подвижного захвата нагружающего устройства с постоянной скоростью линейна также зависимость нагружающей силы от времени $F(t)$. Исходя из этого в данной работе значение концентрационно-кинетического показателя kY_{AE} [3], характеризующего прочность образца, определялось как отношение углового коэффициента линейного участка зависимости $\ln(N(t))$ к угловому коэффициенту зависимости $F(t)$, определенному на том же промежутке времени.

Прочность нахлесточных сварных соединений конкретного типа зависит от числа и расположения дефектов в швах (в данном случае отверстий), определяющих величину максимальных напряжений. Рассмотрим изменение максимальных эквивалентных напряжений и показателя kY_{AE} для различных образцов нахлесточных сварных соединений. На графике (рис. 5) образцы каждого типа размещены в порядке возрастания числа дефектов и опасности

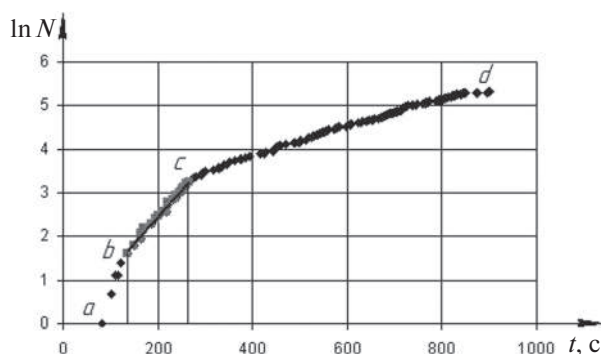


Рис. 4. Зависимость логарифма числа импульсов АЭ от времени для образца нахлесточного сварного соединения

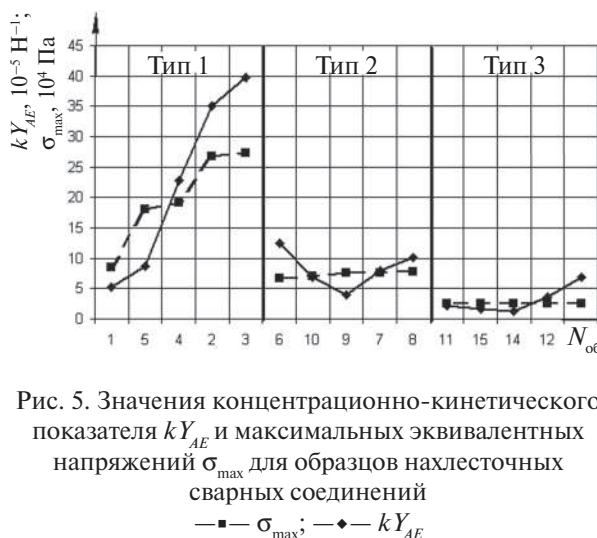


Рис. 5. Значения концентрационно-кинетического показателя kY_{AE} и максимальных эквивалентных напряжений σ_{\max} для образцов нахлесточных сварных соединений
— σ_{\max} ; — kY_{AE}

их расположения, что соответствует постепенному росту максимальных эквивалентных напряжений (на оси абсцисс приведены номера образцов). Увеличение числа отверстий в шве от 0 до 4 приводит к увеличению максимальных напряжений в 3,2 раза в образце первого типа, для образцов второго и третьего типов напряжения повышаются менее значительно (соответственно на 17 и 5 %). Коэффициент корреляции значений показателя kY_{AE} и величин максимальных напряжений, вычисленный для всех 15 образцов, оказался равен 0,93, что говорит о высокой чувствительности характеристик прочности к макрогеометрии (тип образца).

Рассмотрим теперь каждый тип образцов в отдельности. В образцах типа 1 увеличение числа отверстий и соответствующее увеличение максимальных расчетных напряжений сопровождалось повышением значений показателя kY_{AE} , причем корреляция между двумя последними величинами составила 92 %. Для образцов третьего типа она значительно ниже (39 %), для образцов второго типа коэффициент корреляции оказался отрицательным.

Величины $\tilde{\omega}$ и kY_{AE} связаны между собой, в простейшем случае однородного структурно-напряженного состояния материала, когда $\tilde{\omega} = \text{const}$, в соответствии с формулами (1), (2) и (3):

$$kY_{AE} = \frac{\gamma \dot{\sigma}}{KT\dot{F}} = \frac{\tilde{\omega}}{KT\dot{F}},$$

где \dot{F} — скорость роста нагружающей силы. Поскольку в данной работе рассматривается нагружение в пределах упругого участка, при заданной в эксперименте постоянной скорости деформирования $\dot{\sigma} = \text{const}$ и $\dot{F} = \text{const}$.

Аналогично связи между kY_{AE} и σ_{\max} коэффициент корреляции между средним значением $\tilde{\omega}$ и величиной средней скорости роста напряжений оказался максимальным для образцов нахлесточных сварных соединений первого типа (0,73), для образцов третьего типа его значение меньше (0,55), для второго типа образцов коэффициент корреляции отрицателен.

Коэффициент корреляции между средним значением $\tilde{\omega}$ и величиной средней скорости роста напряжений минимален для образцов нахлесточного сварного соединения второго типа. Рассмотрим кривые $\Psi_{\omega}(\tilde{\omega})$ и $\Psi_{\sigma}(\dot{\sigma})$, построенные для двух образцов данного типа (рис. 6).

Шов 6-го образца не имеет отверстий; в шве девятого образца просверлены три отверстия, что приводит к увеличению расчетных напряжений. Скорость нагружения 9-го образца при проведении эксперимента также была выше скорости нагружения 6-го. Учет этих двух факторов приводит к повышению расчетного среднего значения скорости роста напряжений в 9-м образце в 1,25 раза по сравнению с 6-м. В то же время среднее значение $\tilde{\omega}$ для 9-го образца более чем в 2 раза ниже этой же величины для 6-го образца. Построим для данных образцов кривые

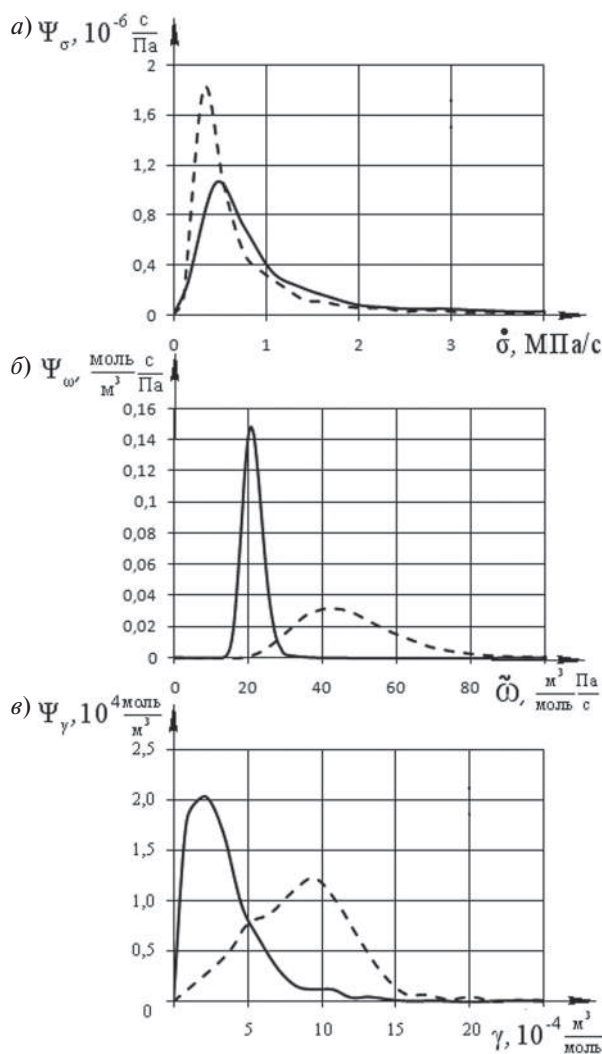


Рис. 6. Кривые распределения параметров $\tilde{\omega}$ (б), γ (в) и скорости роста напряжений $\dot{\sigma}$ (а) по структурным элементам для двух образцов (— образец 9; --- образец 6) нахлесточного сварного соединения второго типа



распределения $\Psi_\gamma(\gamma)$ (см. рис. 6). Кривая $\Psi_\gamma(\gamma)$ 6-го образца по сравнению с 9-м сдвинута в область больших значений γ , средняя величина структурно-чувствительного параметра 6-го образца превышает среднюю величину γ 9-го образца более чем в 3 раза. Такое значительное повышение величины γ говорит о наличии в материале 6-го образца скрытых дефектов, которые не учитывались при расчете напряжений. При внимательном осмотре образца в сварном шве был обнаружен подрез.

По найденным распределениям $\Psi_\omega(\tilde{\omega})$, $\Psi_\sigma(\tilde{\sigma})$ и $\Psi_\gamma(\gamma)$ были определены средние значения величин $\tilde{\omega}$, $\tilde{\sigma}$ и γ для каждого из образцов. Для каждого типа образцов вычислялись средние квадратичные отклонения ($\tilde{\sigma}_\omega$, $\tilde{\sigma}_\sigma$ и $\tilde{\sigma}_\gamma$) и коэффициенты вариации (v_ω , v_σ и v_γ) средних значений $\tilde{\omega}$, $\tilde{\sigma}$ и γ (см. таблицу). Среднее квадратичное отклонение средних значений как $\tilde{\omega}$, так и $\tilde{\sigma}$ для второго и третьего типов образцов меньше, чем для первого типа, но при этом $\tilde{\sigma}_\sigma$ уменьшается в 2–3 раза значительнее $\tilde{\sigma}_\omega$. Это можно объяснить большей величиной $\tilde{\sigma}_\gamma$ для второго и третьего типов образцов по сравнению с первым типом. Коэффициент вариации средних значений γ превышает коэффициент вариации средних значений $\tilde{\sigma}$ в 1,8 раза для первого типа образцов; для второго и третьего типов отношение v_γ/v_σ значительно больше и составляет соответственно 3,7 и 5,1. Таким образом, изменение параметра $\tilde{\omega}$ для последних двух типов образцов в более значительной степени определяется изменением параметра γ , чем $\tilde{\sigma}$. Этим и можно объяснить отмеченное ранее для образцов второго и третьего типов ухудшение корреляции величины максимальных напряжений с величиной параметра kY_{AE} (см. рис. 5).

Таким образом, подводя итоги исследования, можно утверждать следующее.

Построение на основе результатов акустико-эмиссионных испытаний кривой распределения параметра ω ($\tilde{\omega}$) по структурным элементам позволяет оценить степень неоднородности структурно-напряженного состояния материала. Чем большие значения принимает ω , тем ниже прочностные характеристики объекта и его остаточный ресурс. Найдя распределение ω по структурным элементам (данные акустико-эмиссионных испытаний) и распределение напряжений по объему (расчет по методу конечных элементов) и применив метод Монте-Карло, можно получить подобное распределение параметра γ и оценить степень структурной неоднородности материала объекта.

В случае, когда полученное распределение параметра γ говорит о низкой неоднородности структуры материала, изменение ω в основном определяется изменением макронапряженного состояния объекта, что позволяет проводить оценку его прочности по результатам расчета напряжений (первый тип образцов нахлесточных сварных соединений). Когда же вариации структурно-чувствительного параметра γ становятся существенными, корреляция напряжений и ω ухудшается, и появляется необходимость учета структурной неоднородности материала (второй и третий тип образцов).

Сравнение распределений параметра γ и напряжений позволяет оценить степень влияния изменения этих величин на изменение прочностного параметра ω . Такая оценка дает возможность выбора наиболее эффективного для конкретного случая пути снижения степени неоднородности структурно-напряженного

Характеристики параметров $\tilde{\omega}$, γ , $\tilde{\sigma}$ как случайных величин, рассчитанные по их распределениям, полученным экспериментально для образцов нахлесточных сварных соединений

Тип образцов	Среднеквадратические отклонения			$\frac{\tilde{\sigma}_\omega}{\tilde{\sigma}_{\omega 1}}$	$\frac{\tilde{\sigma}_\sigma}{\tilde{\sigma}_{\sigma 1}}$	$\frac{\tilde{\sigma}_\gamma}{\tilde{\sigma}_{\gamma 1}}$	Коэффициенты вариации			v_γ / v_σ
	$\tilde{\sigma}_\omega$, м ³ ·Па/(моль·с)	$\tilde{\sigma}_\sigma$, МПа/с	$\tilde{\sigma}_\gamma$, м ³ ·Па/(моль·с)				v_ω	v_σ	v_γ	
1	34,4	0,43	2,03	1	1	1	0,74	0,37	0,66	1,8
2	11,8	0,07	2,25	0,34	0,16	1,11	0,31	0,12	0,44	3,7
3	28,9	0,11	2,43	0,84	0,26	1,20	0,99	0,17	0,86	5,1

состояния материала и, таким образом, повышения прочности детали или конструкции. Неоднородность структуры может быть снижена, например путем проведения соответ-

ствующей термообработки, а неоднородность напряженного состояния — путем введения конструктивных изменений, снижения концентрации напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов, В.В.** Микромеханика акустической эмиссии гетерогенных материалов [Текст] / В.В. Носов; Санкт-Петербургский политехнический ун-т // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2006. — № 3. — С. 20–27.

2. **Носов, В.В.** Методология оценки прочности и ресурса технических объектов с помощью метода АЭ [Текст] / В.В. Носов; Санкт-Петербургский политехнический ун-т // Труды СПбГПУ. — № 504. — 2007. — С. 119–132.

3. **Носов, В.В.** Оценка прочности и ресурса сварных конструкций с помощью метода акустической эмиссии [Текст] / В.В. Носов // Дефектоскопия. — 2009. — № 2. — С. 58–66.

4. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. — М.: Наука, 1974.

5. **Чигарев, А.В.** ANSYS для инженеров [Текст]: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.

УДК 621.719.048.4

Н.Б. Кириллов, С.Д. Васильков, В.И. Новиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Состояние поверхности деталей и конструкций во многом определяет их срок службы. Под качеством поверхностного слоя деталей машин принято понимать совокупность характеристик, т. е. не только шероховатость поверхности, но и физико-механические свойства металла [1].

К важнейшим параметрам качества поверхностного слоя изделия относятся микроструктура и технологические остаточные напряжения (ОН). Их изменение на последнем этапе обработки может повлечь изменение сроков эксплуатации изделия. Величина, знак ОН на поверхности и характер распределения эпюры по глубине существенно влияют на усталостную и коррозионно-усталостную прочности как при малоцикловом, так и при многоцикловом нагружении, а также на ударно-циклическую прочность и коррозионную стойкость. При наличии в поверхностном слое остаточно-

го напряжения растяжения происходит интенсивное растрескивание элементов конструкций, работающих в коррозионной среде, даже если отсутствуют внешние нагрузки.

Велика роль ОН в зарождении и развитии трещин, при наличии в зоне дефекта критических ОН растяжения трещины зарождаются и начинают развиваться практически после первых циклов нагружения. Когда же дефекты располагаются в зонах ОН сжатия, началу зарождения трещин предшествует значительный инкубационный период, а дальнейшее развитие трещины тормозится и происходит с меньшей скоростью.

Одним из перспективных методов формирования поверхностей с заданными свойствами считается процесс электролитно-плазменного полирования (ЭПП). В отличие от химического и электрохимического полирований технология ЭПП позволяет обрабатывать детали

из легированных сталей в среде нетоксичных электролитов [2]. Несмотря на наличие литературных данных по данной теме, отсутствует информация о влиянии ЭПП на уровень остаточных напряжений в поверхностных слоях обработанных изделий.

Классическим методом изучения эпюр признан разрушающий метод на образцах, вырезаемых из исследуемого изделия, подвергнутого различным физико-механическим воздействиям, — по измеренной деформации образцов при удалении напряженных слоев судят о механических напряжениях в них. Одна из новейших технологий, позволяющая проводить стопроцентный неразрушающий контроль ответственных конструкций, — резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля, использующий скин-эффект для определения удельной электрической проводимости (электросопротивление) на нескольких глубинах с дальнейшим пересчетом в остаточные напряжения.

Определение напряжений после ЭПП производилось на аппаратуре СИТОН-ТЕСТ [3]. Измерения проводились на глубинах от 5 до 2500 мкм в зависимости от свойств материала. Аппаратура включает (рис. 1): источник-приемник-интерфейс (ИПИ), специальный датчик и программный комплекс. Метод основан на корреляции между электрическими и механическими характеристиками металлов и сплавов (деформирующая способность остаточных

напряжений и удельная электрическая проводимость γ металла).

При отсутствии ОН металл имеет номинальное значение периода решетки d_0 и соответствующее номинальное значение удельной электрической проводимости γ_0 . Под действием механических напряжений $\Delta\sigma$ изменяется период решетки металла на величину Δd . В зоне упругих деформаций это изменение можно считать пропорциональным механическому напряжению (изменения электропроводности $\Delta\gamma$ также пропорциональны механическим напряжениям $\Delta\sigma$):

$$\Delta\gamma = K_\sigma \cdot \Delta\sigma,$$

где K_σ — экспериментально определяемый коэффициент, зависящий от характеристик материала.

Таким образом, измеряя электрические свойства проводящих изделий, можно находить механические напряжения в них. При этом необходимо определять распределение электрических параметров и механических напряжений по глубине изделий.

Использование явления скин-эффекта позволяет послойно исследовать проводящее изделие путем приложения к нему электромагнитного поля различной частоты и измерения сигнала-отклика, параметры которого связаны с изменением напряженного состояния изделия. Уменьшение частоты поступающего в изделие переменного тока позволяет увеличивать толщину исследуемого слоя. Выбором полосы рабочих частот можно обеспечить требуемый диапазон исследования по глубине изделия.

Тестовый сигнал — измерительный синусоидальный ток — задается генератором с девятью ступенями сканирования в определенном диапазоне токов с заданными частотами. Сигнал-отклик представляет собой падение напряжения на поверхности объекта. Значение тестового сигнала и сигнала-отклика для всего цикла измерений передаются в компьютер (ПК) по USB-интерфейсу. Протокол обмена между ИПИ и ПК — двунаправленный, он формирует цикл измерений. Специальный алгоритм позволяет по измеренным электрическим величинам определять величину средних напряжений в h -слое с последующим их пересчетом в интеграл напряжений и действительных напряжений [4].

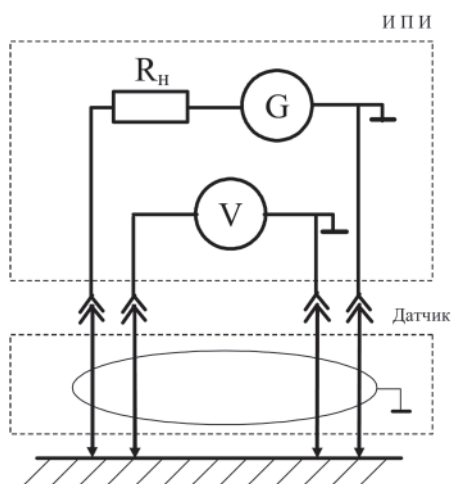


Рис. 1. Функциональная схема ИВК СИТОН (R_n — сопротивление нагрузки; G — генератор тока; V — вольтметр)

Для исследования были использованы од-
нотипные образцы после фрезерования (рис. 2),
обработанные ЭПП на различных режимах.

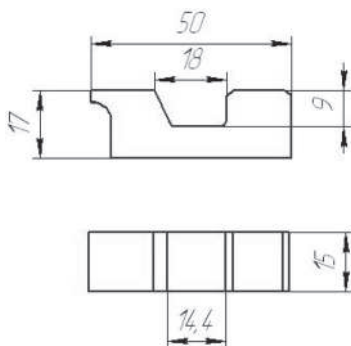


Рис. 2. Исследуемый образец (две проекции)

Результаты исследования представлены на
рис. 3. Как можно заметить, в приповерх-
ностной зоне остаточные напряжения носят
отрицательный характер, т. е. имеют место
напряжения сжатия, однако их уровень в зави-
симости от параметров обработки уменьшается
относительно начального уровня, поскольку

происходит снятие слоя деформированного
механически металла. Чем интенсивнее режим
обработки, тем больший слой металла снима-
ется и тем значительнее влияние на уровень
ОН. Подобный эффект наблюдается и при
электрохимическом полировании [5].

Чтобы выявить влияния ЭПП на структуру
и оценки качества обработанного поверх-
ностного слоя у образцов из исследуемых матери-
алов, были проведены металлографические ис-
следования в режиме, близком к получению
минимальной шероховатости (для низколе-
гированной и высоколегированной сталей), и
в режимах, граничных по таким параметрам,
как концентрация электролита, время обраб-
тки, величина рабочего напряжения (для низко-
легированной стали). Шлифы для микрострук-
турного анализа изготавливались системой
шлифоподготовки фирмы BUEHLER, иссле-
дование структуры производилось на микро-
скопах Axio Observer (Carl Zeiss).

Микроструктуры поверхностных слоев и ис-
ходных материалов представлены на рис. 4–6
(оптимальный режим обработки), рис. 7 (ис-
ходная поверхность) и рис. 8, 9 (граничные

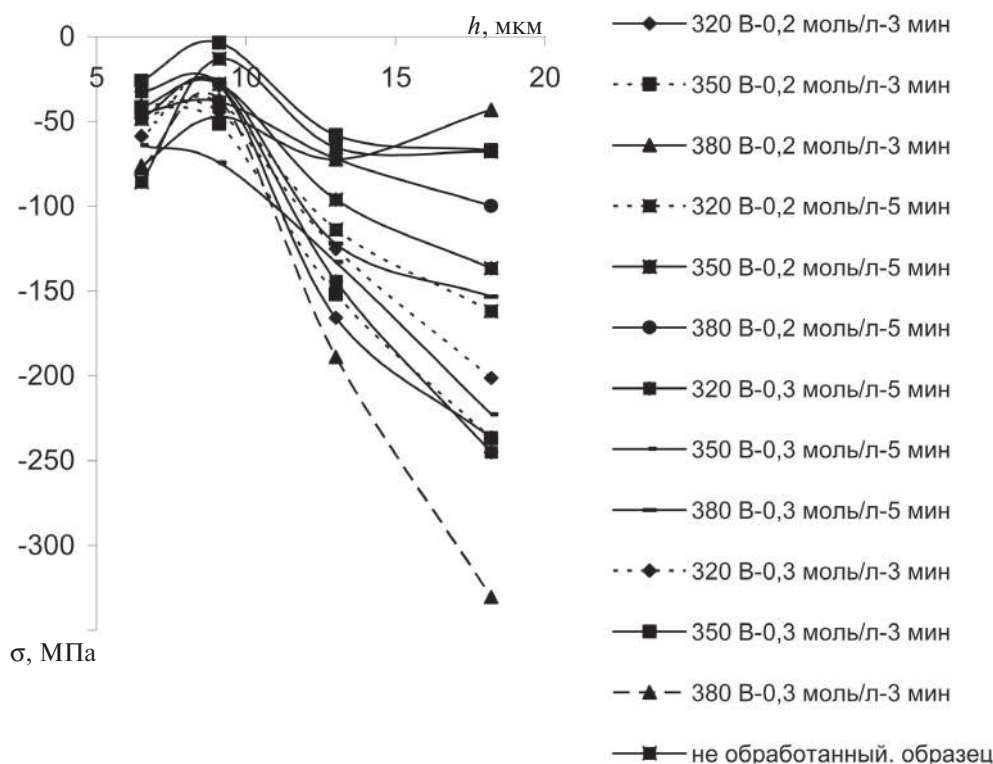


Рис. 3. Распределение уровня остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя.

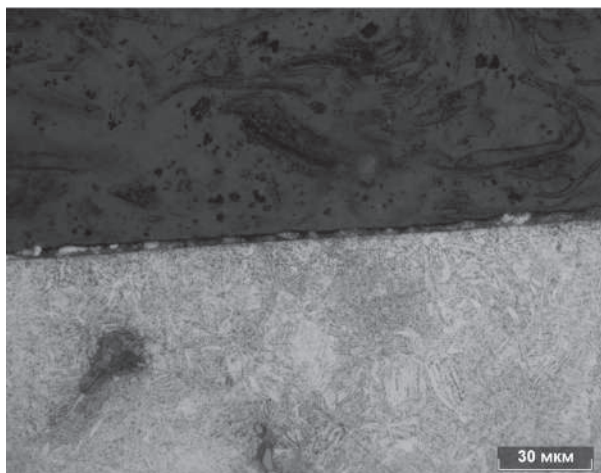


Рис. 4. Сталь 30ХГСА, приповерхностная зона ($U = 300$ В; $\times 500$)

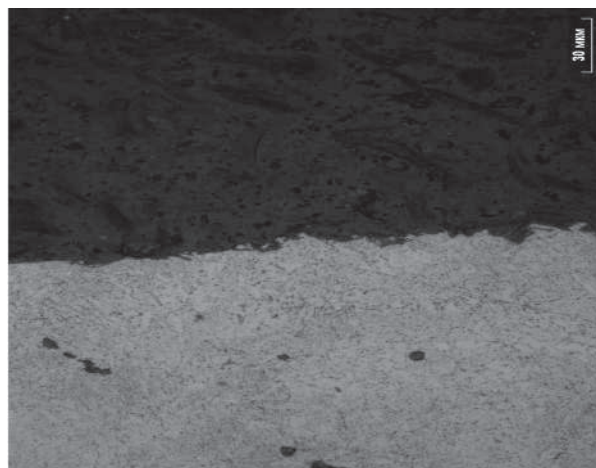


Рис. 5. Сталь 30ХГСА, исходная микроструктура ($\times 500$)

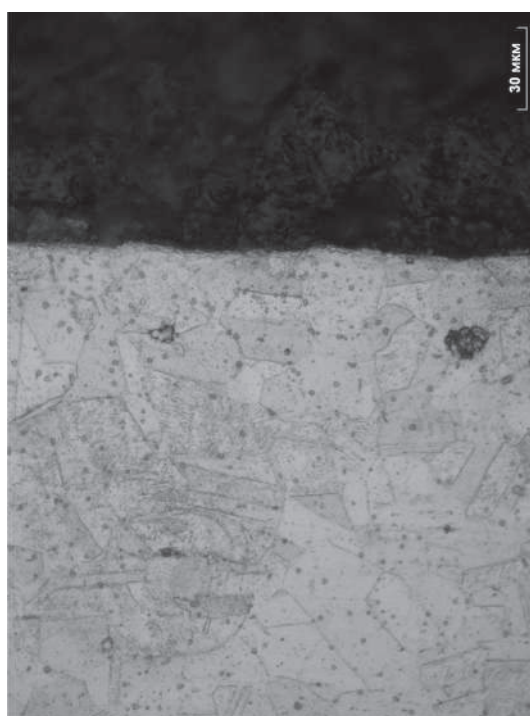


Рис. 6. Сталь 12Х18Н10Т, приповерхностная зона ($U = 300$ В; $\times 500$)

режимы обработки). Исследованием установлено, что строение структуры поверхностных слоев и исходные структуры идентичны. Различные по своей структуре зоны не выявлены. Приповерхностная зона и исходная низколегированная сталь представляют собой мелкозернистую бейнитную структуру (смеси пересыщенного углеродом феррита и карбида це-

ментитного типа), высоколегированная сталь имеет структуру аустенита с присутствием карбидов внутри аустенитного зерна и небольшим наличием карбонитридов.

Один из широко распространенных видов испытания металла — определение его твердости. По значению твердости металла можно составить представление об уровне его проч-



Рис. 7. Сталь 12X18H10T, исходная микроструктура ($\times 500$)

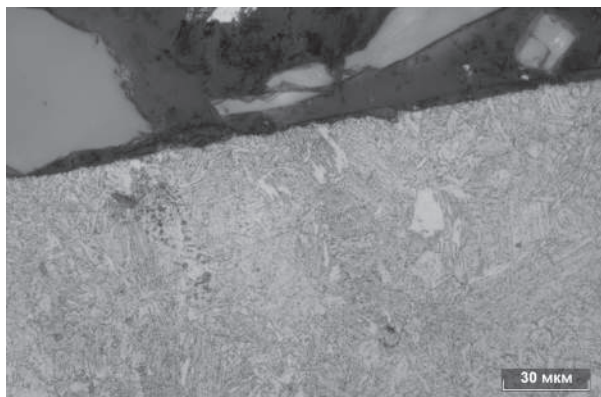


Рис. 8. Приповерхностная зона ($U = 360$ В; $\times 500$)

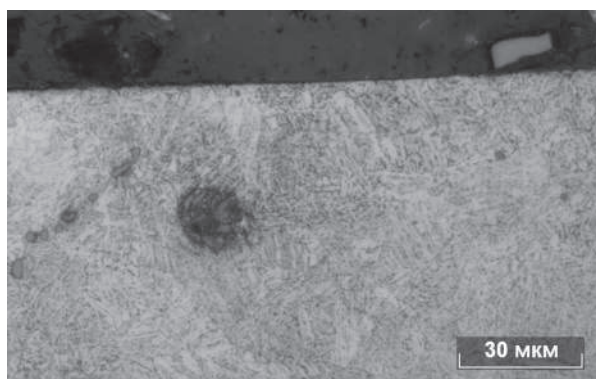


Рис. 9. Приповерхностная зона ($U = 240$ В; $\times 100$)

ностных свойств [6]. Исследования микротвердости, проводившиеся с помощью микротвердомера MicroMet 5103 (BUENLIER), выявили похожую тенденцию. На рис. 10 представлена зависимость усредненных значений микротвердости от глубины слоя. Как видно, с увеличением глубины поверхностного слоя значение микротвердости не претерпевает существенного изменения, регистрируемые уменьшение или увеличение микротвердости могут быть связаны с погрешностью измерения.

Таким образом, не выявлено существенных изменений величины микротвердости обработанных образцов по сравнению с исходной. Отмечено, что при пропускании через водный раствор электролита электрического тока у одного из электродов происходит интенсивное парообразование. Образующиеся пузыри экранируют электрод, уменьшая площадь со-

прикосновения его с электролитом (при этом повышается плотность тока) вплоть до полного разрыва электрохимического контакта между электролитом и электродом. Прохождение тока через газовый промежуток

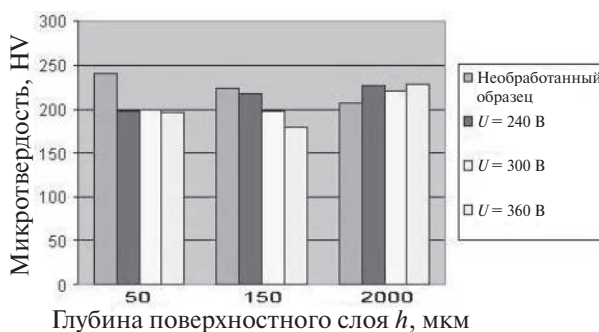


Рис. 10. Диаграмма значений микротвердости при различной величине рабочего напряжения для низколегированной стали



происходит в виде электрического разряда с образованием вокруг электрода ионизированного пароплазменного слоя. Характер электрического разряда и результаты воздействия его на электрод существенно зависят от полярности приложенного к нему напряжения. На аноде образуется тонкая светящаяся ионизированная оболочка, устойчиво существующая при определенных условиях. При этом электрод нагревается до определенной температуры, а с его поверхности удаляется слой материала.

Объяснить высокое качество поверхностного слоя при электролитно-плазменном полировании можно тем, что время жизни образовавшегося разряда с температурой плазмы 5000–10000 °С довольно короткое — около 10^{-6} с. За такое время тепло не успевает распространиться в глубь металла, что подтверждается построенной при помощи пакета «Cosmos Works» имитационной модели [6]

К существенным результатам проведенных исследований можно отнести следующее:

1. Определен характер влияния процесса ЭПП на уровень остаточных напряжений. Выявлено незначительное изменение (примерно 20–40 МПа) напряжений после ЭПП, зависящее от интенсивности снятия механически деформированного поверхностного слоя металла.

2. Показано отсутствие влияния ЭПП на микроструктуру поверхностного слоя обработанных изделий вследствие того, что время жизни образовавшегося разряда с температурой плазмы 5000–10000 °С довольно короткое — около 10^{-6} с.

3. Незначительное уменьшение (около 30 единиц) уровня микротвердости, вероятно, также связано с недостаточностью времени действия разряда и толщины снимаемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильков, Д.В.** Обеспечение стабильности качества поверхностного слоя изделий при механической обработке на основе алгоритмов автоматизированного проектирования [Текст] / Д.В. Васильков, А.Г. Ташевский, А.А. Лыченков // Металлообработка. — 2007. — № 6. — С. 8–11.

2. **Веселовский, А.П.** Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах [Текст] / А.П. Веселовский, С.В. Кюбарсэп, Л.А. Ушомирская // Металлообработка. — 2002. — № 6. — С. 29–31.

3. **Васильков, Д.В.** Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из никелевых сплавов после механической обработки [Текст] / Д.В. Васильков, Г.П. Анастаси-ади, Г.П. Юрова // Металлообработка. — 2008. — № 5. — С. 4–9.

4. **Патент № 2 327 124 С2 РФ МПК 601L 1/20.** Неразрушающий способ определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов [Текст] / Иванов С.Ю., Васильков Д.В., Гутнер А.Б. [и др.]; заяв. 09.06.06; опубл. 20.06.08. — Бюл. № 17.

5. **Федотьев, Н.П.** Электрохимическое травление, полирование и оксидирование металлов [Текст] / Н.П. Федотьев, С.Я. Грилихес. — М.; Л.: Машгиз, 1957. — 243 с.

6. **Ушомирская, Л.А.** Особенности чистой обработки турбинных лопаток [Текст] / Л.А. Ушомирская, А.И. Фоломкин, В.И. Новиков // Металлообработка. — 2008. — № 4. — С. 19–21.

ОСОБЕННОСТЬ СОСТОЯНИЯ НАХЛЕСТОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИХ ПРОЧНОСТИ

Среди видов сварных соединений наиболее распространены нахлесточные, которые просты в сборке, обеспечивают возможность подгонки размеров за счет регулирования величины нахлестки, не требуют подготовки кромок. К особенностям таких соединений относятся повышенная силовая и структурная неоднородности, вызванные неравномерным распределением нагрузки вдоль фланговых швов и изгибом в лобовом шве, изменением направления силового потока, наличием дефектов и повреждений, возможным проникновением влаги и распирающим воздействием продуктов коррозии. Основные очаги развития усталостного разрушения: различные полости, «карманы», щели, возникающие при сварке прерывистыми швами, концевые балки; места скопления влаги; внутренние закрытые поверхности. Коррозия под напряжением, встречающаяся, например, в крановых конструкциях, служит источником развития усталостных трещин, что приводит к коррозионным растрескиванию и усталости. При длительном хранении кранов или их эксплуатации на открытом воздухе во внутренних закрытых полостях может скапливаться вода и конденсат, вызывающие внутреннюю коррозию поясных листов и сварных швов. Трещины в сварных швах и элементах металлических конструкций грузоподъемных кранов имеют усталостный характер и относятся к одним из самых распространенных дефектов. Достаточно часто трещины от сварного шва распространяются на основной металл. Неоднородность состояния приводит к непрогнозируемости поведения соединений. Для решения проблемы необходимо сформулировать критерий неоднородности, детальное исследовать процесс разрушения в его условиях и предложить неразрушающий контроль прочности.

Под неоднородностью прочностного состояния технического объекта в данной работе будем понимать различие значений време-

ни до разрушения его структурных элементов. Пространственная неоднородность ограждает объект от полного разрушения, приводит к локализации процесса разрушения и его переходу к стадии образования и роста трещины. Для такой локализации необходимо достижение критической концентрации микротрещин в ограниченном объеме материала, размер которого определяет размер кластера, или скачка магистральной трещины. Кинетическая неоднородность проявляется в форме снижения интенсивности разрушения и сравнительном упрочнении материала.

Для анализа разрушения неоднородных материалов применяют разнообразные методы, основанные на приведенной формулировке критерия неоднородности и его учете при описании кинетики трещинообразования [1, 2]. Большинство из них не учитывают локальной прочности микрообъемов и микромеханических аспектов разрушения, что часто не позволяет воссоздать реальную картину. С нашей точки зрения, неоднородность состояния объекта должна проявляться при разрушении и может быть охарактеризована разбросом значений долговечности θ структурных микроэлементов, описываемых формулой Журкова

$$\theta(\omega(t)) = \tau_0 \exp[U_0 / (KT) - \omega(t)],$$

где τ_0 — величина порядка периода атомных колебаний; U_0 — энергия активации процесса разрушения; $\omega = \gamma\sigma(t) / KT$ — параметр прочностного состояния; γ — структурно-чувствительный коэффициент; $\sigma(t)$ — растягивающее напряжение; t — текущее время; K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Разброс θ обусловлен главным образом структурной неоднородностью материала (вариация параметра γ — «технологическая» составляющая разброса), а также неоднородностью поля механических напряжений, в котором находятся структурные элементы (вариация



параметра σ — «силовая» составляющая разброса). Помимо этого, как известно [2], разброс значений θ определяется также и статистической природой разрушающих термофлуктуаций («термофлуктуационная» компонента разброса), которая, однако, не связывается нами с неоднородностью механического состояния объекта и наиболее явно проявляет себя только при несущественности «технологической» и «силовой» составляющих. Различие значений времен и до разрушения его структурных микроэлементов в ограниченном объеме служит признаком кинетической неоднородности локализованного процесса трещинообразования; момент его завершения определяется наиболее долговечным и из разрушаемых структурных элементов. Если количество таких элементов окажется достаточно большим (более 1–10 % от общего их количества), то этап кинетически неоднородного разрушения будет завершающим и именно он определит ресурс.

Процесс разрушения состоит из двух стадий [3–6]. Первая стадия протекает в виде роста во времени t концентрации C микротрещин в материале, который происходит рассеянно по всему объему либо локально, в области влияния концентратора напряжений объекта и описывается уравнением

$$C(t) = C_0 \int_{\Theta_{\min}}^{\Theta_{\max}} \Psi(\Theta') \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\Theta(\bar{t})} \right] \right\} d\Theta',$$

где C_0 — начальная концентрация структурных микроэлементов; Θ_{\min} , Θ_{\max} — крайние значения долговечности элементов; $\Psi(\Theta)$ — функция плотности распределения количества структурных элементов по долговечности. Стадия заканчивается и переходит на новую в момент t^* достижения концентрацией C^* микротрещин критического значения, т. е. $C(t^*) = C^*$. Оценка характеристик прочности и ресурса состоит в прогнозировании времени $\tau_{\text{ост}}^*$, оставшегося до момента накопления критической концентрации микротрещин C^* путем определения параметров и решения следующей системы уравнений:

$$\int_{\mu}^{\mu + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^{t^*} \frac{d\bar{t}}{\Theta(\omega(\bar{t}))} \right] \right\} d\omega = C^* / C_0; \quad (1)$$

$$\tau_{\text{ост}}^* = t^* - \tau_{\text{пр}},$$

где $\tau_{\text{пр}}$ — предварительно потерянный ресурс.

Вторая стадия разрушения проходит в виде процесса локализованного образования (роста) трещины, протекающего упруго либо пластически и описываемого методами механики разрушения.

Неоднородность прочностного состояния микроэлементов материала разбивает первую стадию процесса разрушения на кинетически различные этапы разрушения, соотношение длительностей которых характеризует степень этой неоднородности. Учитывая доминирование «технологической» и «силовой» составляющих разброса долговечностей θ структурных микроэлементов, наиболее информативным относительно этой степени следует считать соотношение параметров $\Delta\omega$, ω_0 , ω_1 , ω_2 , σ , μ , входящих в функцию $\Psi(\omega)$ распределения значений параметра состояния ω по структурным элементам (рис. 1), моделируемую одним из следующих законов:

прямоугольным

$$\psi(\omega, \omega_0, \Delta\omega) = \frac{1}{\Delta\omega}, \quad \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \Delta\omega],$$

двухпрямоугольным с весами соответственно 0,99–0,999 и 0,01–0,001

$$\Psi(\omega, \omega_0, \omega_1, \omega_2) =$$

$$= \begin{cases} 0,99 / \omega_1, & \omega \in [\omega_0, \omega_0 + \omega_1]; \\ 0,01 / \omega_2, & \omega \in (\omega_0 + \omega_1, \omega_0 + \omega_1 + \omega_2], \end{cases}$$

логарифмически-нормальным

$$\Psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3\omega} \exp \left[- \frac{1}{2\sigma_3^2} (\ln(\omega) - \mu)^2 \right].$$

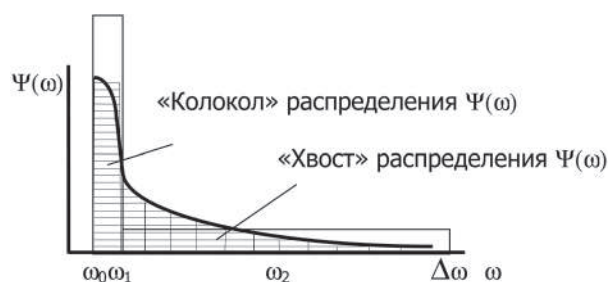


Рис. 1. Моделирование функции распределения по структурным элементам материала параметра прочностного состояния ω

Ограничения распределения отражают физическую природу минимально и максимально возможной прочности структурных элементов материала. Максимальным значениям ω функции $\Psi(\omega)$ и верхнему ограничению $\omega_0 + \Delta\omega$ величины ее аргумента свойственна изменчивость поведения. Эти значения соответствуют неустойчивым, наименее долговечным структурным элементам, количество которых зависит от технологии изготовления, наличия дефектов в материале, их формы, размеров и может изменяться во времени в связи, в частности, с релаксационными процессами, протекающими в местах концентрации напряжений. Графически распределение может быть разделено на две части: «колокол», в области которого значения ω невелики (они соответствуют наиболее долговечным структурным элементам) и изменяются незначительно, и «хвост» распределения с большими значениями величины ω (они соответствуют наименее долговечным структурным элементам), где вариация ω (ω_2) существенна.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены сваренные встык и внахлест «прямые» и «косые» образцы с лобовыми, фланговыми и комбинированными угловыми швами; затем в различных местах швов просверливались отверстия диаметром 6 мм, моделирующие коррозионные повреждения. Материал пластин — сталь Ст3пс5, толщина пластин 6 мм, сварные швы Н1 — катет 6 мм, выполнены по ГОСТ 14771-80, сварочная проволока СВ08Г2С ОМ Ø 1,2 мм, среда — углекислота по ГОСТ 8050-85 (рис. 2, а, б, в). К образцам прикладывалась растягивающая нагрузка, значения которой фиксировались через различные промежутки времени. Наблюдение за процессом разрушения проводилось с помощью диагностической акустико-эмиссионной системы (рис. 2, г). Определение параметров модели производилось на основе сопоставления результатов АЭ-наблюдений с результатами имитации процесса разрушения с помощью оригинальной программы Graph, написанной в среде Microsoft Excel 97. Данная программа используется в учебном процессе по курсу «Диагностика машин и оборудования» кафедры машиноведения и деталей машин СПбГПУ. Идентификация стадии и этапов разрушения проводилась по временным зависимостям на-

грузки (при постоянной скорости деформирования), числа импульсов N и длительности сигналов АЭ, а также по визуально наблюдаемому образованию трещины, в соответствии с которой выбирался временной интервал обрабатываемой части эксперимента. Анализировались временные зависимости параметров АЭ при нагружении образцов, образовании и развитии трещины. Характер разрушения образцов показан на рис. 3.

Сопоставление результатов моделирования процесса разрушения и зарегистрированных в экспериментах временных зависимостей числа $N(t)$ сигналов акустической эмиссии образцов стыковых сварных соединений, выполненных без искажений напряженного состояния или с ярко выраженным концентратором, показало, что соотношения параметров функции $\Psi(\omega)$ таковы:

$$\Delta\omega/\omega_0 < 1; \omega_1/\omega_0 < 1, \omega_2/\omega_0 < 1; \omega_2/\omega_1 \approx 1; \sigma_3 < \mu.$$

Разрушение протекает главным образом кинетически однородно, длительность первого этапа не превышает 30 % от продолжительности первой стадии (рис. 4, а)

Для образцов нахлесточных сварных соединений соотношения приведенных параметров существенно варьировались. По мере роста соотношений ω_2/ω_1 и ω_2/ω_0 уменьшается вогнутость расчетной зависимости $C(t) \sim N_{\Sigma}(t)$ равномерно нагружаемых образцов, при некотором значении $\omega_2/\omega_1 > 1$; $\omega_2/\omega_0 > 1$ и $\sigma > \mu$ она приобретает характер, близкий к прямолинейному, а при дальнейшем увеличении — выпуклость. Такая ситуация имитирует связанное с увеличением доли разнородных элементов уменьшение темпов выхода из процесса разрушения наименее долговечных структурных элементов со значениями ω из области «хвоста» функции $\Psi(\omega)$. Длительность неоднородного этапа разрушения таких образцов превышала 40 % от продолжительности первой стадии (рис. 4, б).

Для неразрушающего контроля качества сварных соединений используют в основном радиографический, капиллярный и ультразвуковой методы. Однако перечисленные методы имеют ряд существенных недостатков. В частности, радиографический метод, предназначенный для обнаружения трещин и непроваров в сварном шве, не гарантирует выявления

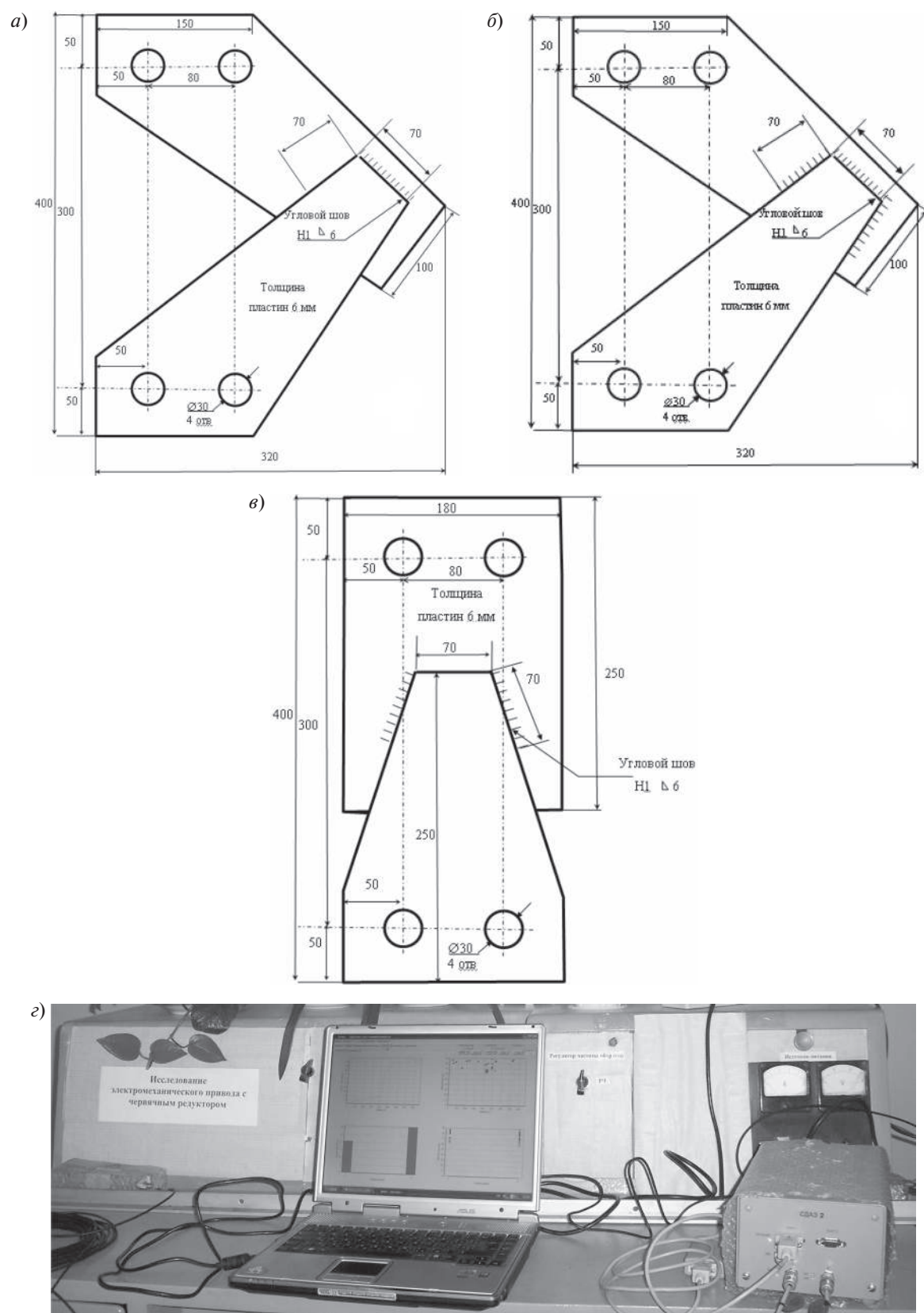


Рис. 2. Образцы нахлесточных соединений 1-го (а), 2-го (б) и 3-го (в) типов и внешний вид АЭ-системы (г)

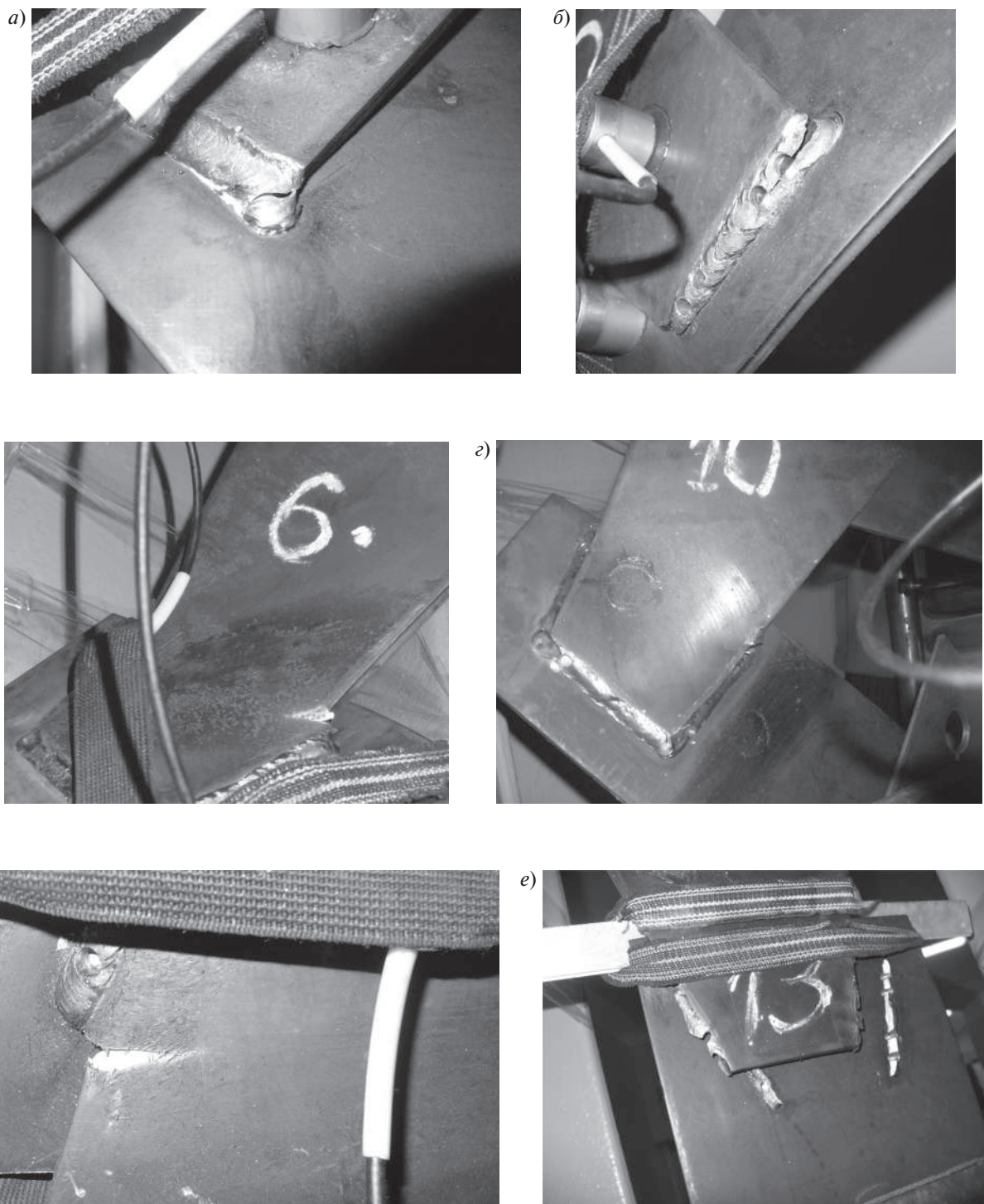


Рис. 3. Виды разрушения образцов нахлесточных сварных соединений
1-го (а, б), 2-го (в, г) и 3-го (д, е) типов

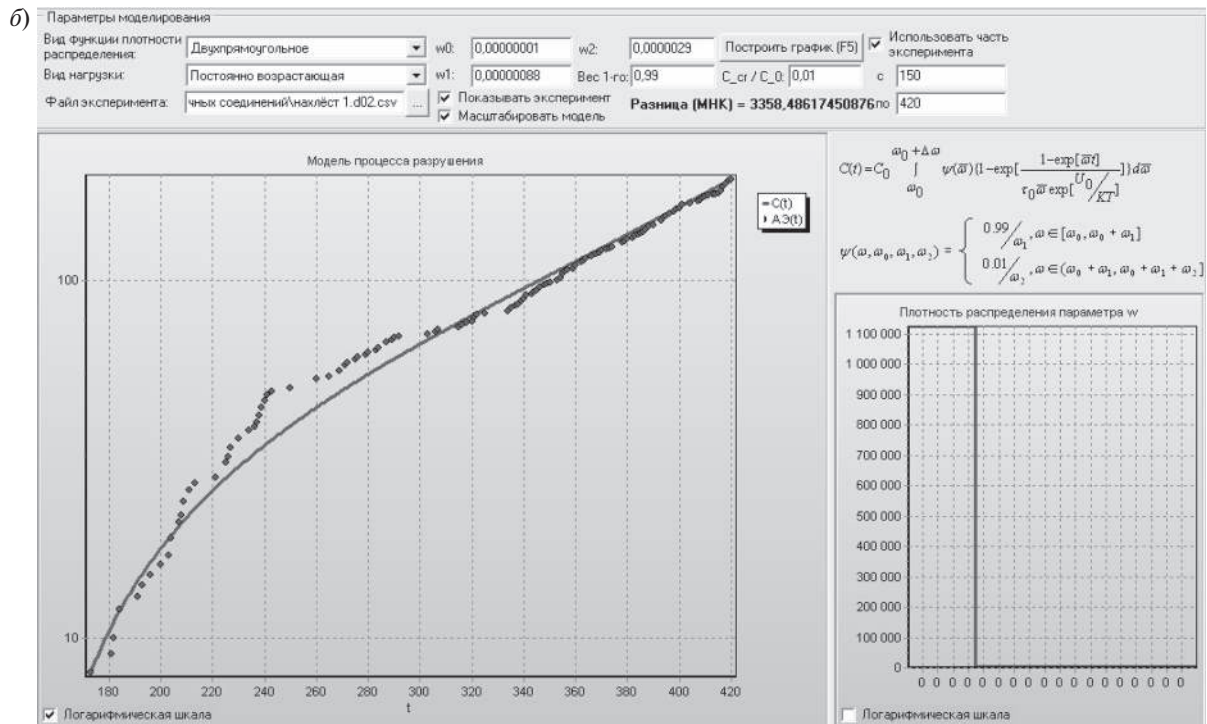
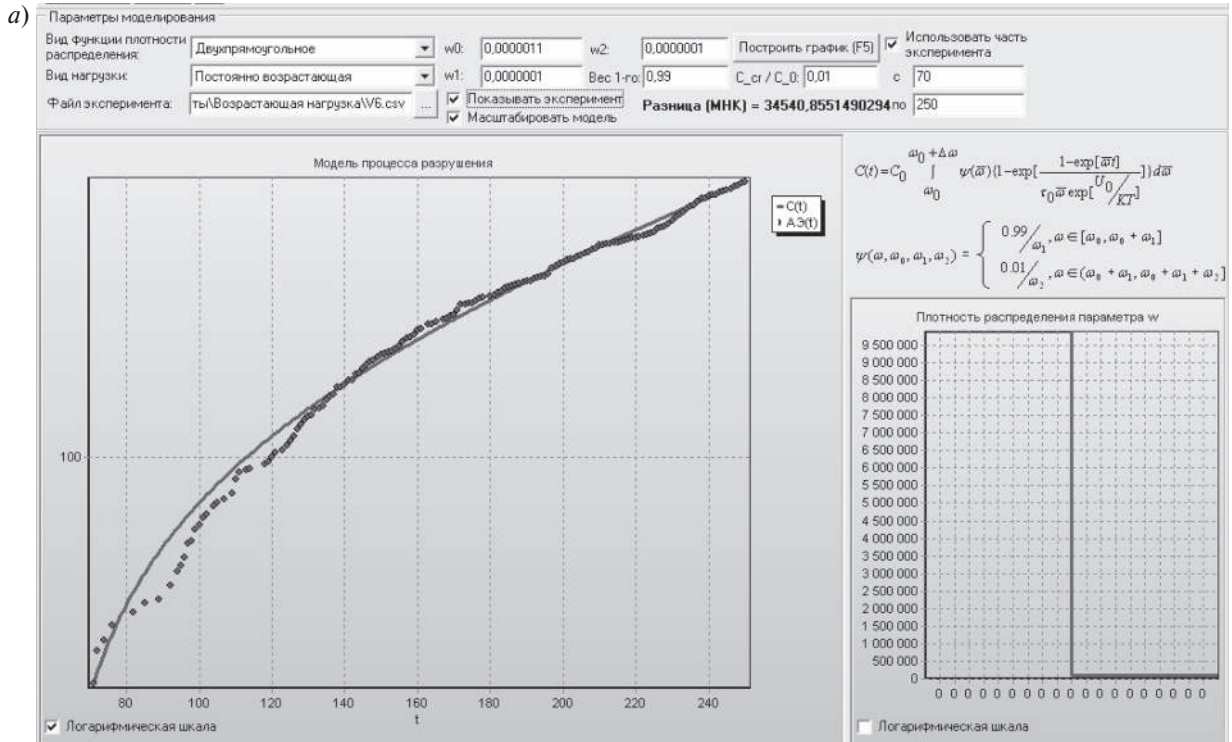


Рис. 4. а — АЭ равномерно нагружаемого однородного образца стыкового сварного соединения.

Двухпрямоугольное распределение $\Psi(\omega)$, $\omega_1/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_0 < 1$, $\omega_2/\omega_1 = 1$;

б — кинетика АЭ и результаты имитации разрушения бездефектного образца нахлесточного соединения 1-го типа с лобовым угловым швом $\Psi(\omega)$, $\omega_1/\omega_0 > 1$, $\omega_2/\omega_0 > 1$, $\omega_2/\omega_1 > 1$

дефектов, плотность распределения которых не совпадает с направлением измерений. Капиллярный метод, обладая значительной чувствительностью к поверхностным дефектам типа трещин, не обеспечивает выявления внутренних дефектов. Ультразвуковой метод, обеспечивающий выявление дефектов типа трещин, предъявляет значительные требования к чистоте обработки поверхности околошовной зоны в месте установки приемного датчика. Все перечисленные методы используются, как правило, на завершающей стадии изготовления изделий и не дают информации о моменте и причине появления дефектов, а также о степени их опасности, что, в свою очередь, затрудняет их своевременное устранение.

Особое место среди методов неразрушающего контроля сварных соединений занимает метод АЭ, широко используемый в большинстве развитых стран мира. Наряду с практическим использованием явления АЭ активно ведутся работы по развитию самого метода. Для оценки степени опасности дефектов (склонности к разрушению) с применением АЭ используются рекомендуемые ПБ-03-593-03 критерии и системы классификации источников АЭ [7]. Наибольшее распространение имеют методы, основанные на регистрации средней амплитуды, скорости счета, суммарного числа импульсов, энергии или активности АЭ.

Регистрируя эти параметры АЭ в процессе диагностического нагружения, оценивают степень опасности трещины и запас долговечности объекта. При использовании амплитудного критерия в качестве информативных параметров выбирают амплитуду и число импульсов АЭ, а присвоение источнику конкретного класса производится по факту превышения средней амплитудой $U_{\text{ср}}$ сигналов некоторого значения U_r , предварительно определенного по формуле

$$U_r = B_1 U_{\text{пор}} + B_2 U_c,$$

где $U_{\text{пор}}$ — значение порога амплитудной дискриминации; U_c — величина превышения порога сигналом АЭ, соответствующим росту трещины в материале; B_1, B_2 — экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от материала контролируемого объекта.

Классификация источников АЭ по каждому из этих критериев основана на возможно-

сти регистрации особенностей АЭ каждого из этапов разрушения (кинетически неоднородный, однородный мелкодисперсный, образование и рост трещины). Общими недостатками описанных методов АЭ-диагностирования являются зависимость входящих в уравнения эмпирических коэффициентов от большого количества факторов и неустойчивость корреляционных связей, дестабилизирующая результаты АЭ-наблюдений. Это сужает значение устанавливаемых корреляций и требует проведения большого количества предварительных испытаний для каждого типа объекта. В случае же существенной неоднородности объекта статистический подход к АЭ диагностированию становится неприемлемым.

Более обоснованы локально-динамический и интегрально-динамический критерии. Здесь также в качестве информативных параметров используются активность, число импульсов или суммарный счет АЭ и их амплитуда, однако в основе интерпретации результатов наблюдений здесь лежат представления механики разрушения о повреждаемости и развитии трещины, понятия о концентрационном критерии разрушения. Классификацию источника проводят, сопоставляя скорости роста числа импульсов и нагрузки, времени нагружения, средней амплитуды или энергии сигналов АЭ. Зависимость активности N' АЭ от параметров нагружения описывается показательной функцией

$$N' = AK_1^m, \quad (2)$$

где K_1 — коэффициент интенсивности напряжений; A, m — эмпирические коэффициенты. Характеристикой активности источника АЭ служит либо показатель степени m этой функции (локально-динамический показатель классификации Иванова—Быкова), либо концентрационно-динамический показатель, отражающий степень концентрации индикаций источников АЭ и динамику изменения картины этих индикаций [7]. Данные критерии более точны, поскольку позволяют различать источники по степени опасности в рамках одной стадии разрушения. При этом излучение импульсов АЭ, регистрируемое во время равномерного нагружения, рассматривается как соответствующее стадии роста магистральной трещины, что используется в качестве прогностического признака приближающегося разрушения.

Проанализируем данные критерии по точности АЭ-оценки прочностного состояния нахлесточных сварных соединений в сравнении с концентрационно-кинетическим показателем [5, 6]:

$$kY_{AE} = k\gamma/KT = d\ln\xi/dF, \quad (3)$$

где $k = \sigma/F$, σ — номинальные напряжения; F — нагрузка на образец; ξ — число импульсов АЭ, активность или суммарная амплитуда, дБ. При этом принимается

$$C(t) \sim \xi(t) = B \exp[\sigma(t)Y_{AE}],$$

где B — эмпирическая константа. Влияние видимых геометрических факторов (тип образцов, количество и координаты расположения дефектов в сварных швах) на состояние образцов оценивалось также расчетными значениями напряжений:

эквивалентными напряжениями по Мизесу, рассчитываемыми с использованием пакета ANSYS на случай действия растягивающего усилия в 1 Н;

максимальными касательными напряжениями, рассчитываемыми по формулам сопротивления материалов с учетом ослабления сечения шва отверстиями (номинальные напряжения).

С напряжениями сравнивалось общее число сигналов АЭ $N_{\text{упр}}$, средняя амплитуда $U_{\text{ср}}$ и энергия импульсов $E_{\text{ср}}$, зарегистрированные на этапе упругого нагружения (табл. 1). Как видно из таблицы, наилучшую корреляцию с расчетными значениями эквивалентных напряжений из перечисленных критериев имеет концентрационно-кинетический показатель kY_{AE} , по значениям которого из (1) определяются стандартные показатели прочности и ресурс (табл. 2). Коэффициент корреляции между значениями эквивалентных и номинальных напряжений был равен 0,93. Рассчитанное из (3) среднее значение параметра Y_{AE} (при $F = 1 \text{ Н}$ $k = \sigma/F = \sigma$, м^{-2}) составляло $0,00912 \text{ МПа}^{-1}$, что согласуется с данными, полученными на стальных образцах стыковых соединений [6]. Сравнение этого показателя с локально-динамическим критерием m по точности относительной оценки опасности источника АЭ отражают табл. 3 и рис. 5.

Таблица 1

Корреляция значений различных показателей АЭ образцов нахлесточных сварных соединений с величиной расчетных напряжений

Тип образца	Число отверстий в шве	Максимальные напряжения (по Мизесу), Па	$N_{\text{упр}}$	$U_{\text{ср}}$, дБ	$E_{\text{ср}}$, мВ ² ·мс	kY_{AE} , 10^{-6} Н^{-1}	m
1	0	85679	188	65,7	46,9	53	0,16
	1 (в нагр. зоне)	191562	28	64,7	24,4	227	0,67
	1 (в разгр. зоне)	180963	26	71,7	167,2	91	0,26
	2	267166	38	67,6	111,2	349	1,05
	4	272232	8	70,7	1475	387	1,19
2	0	66045	48	69,8	198,4	114	5,78
	3 (в нагр. зоне)	76696	22	67,9	155,6	44	1,14
	3 (в разгр. зоне)	71085	51	67,2	49,7	65	3,67
	6	75532	62	65,8	88,8	78	3,62
	12	77589	26	71,7	174,4	89	2,44
3	0	24504	27	70,1	209,4	19	2,41
	2 (в нагр. зоне)	25591	79	70,1	131,1	11	1,27
	2 (в разгр. зоне)	25464	27	67,4	179,3	15	6,43
	4	25713	41	79,4	782,1	42	2,06
	8	25847	50	63,9	7,2	66	1,74
Коэффициент корреляции			-0,24	0,23	0,38	0,93	0,48

Таблица 2

Оценка ресурса и стандартных показателей прочности с помощью показателя Y_{AE}

Показатели прочности	Формула для оценки показателя прочности
Коэффициент запаса статической прочности	$S_{ст} = \frac{\sigma_B Y_R}{\sigma_{раб} Y_{AE}}$
Коэффициент снижения предела выносливости	$K_{прБ} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{RD}} = \frac{(\ln N_B - \ln N_B)/Y_R}{(\ln N_B - \ln N_B)/Y_{AE}} = \frac{Y_{AE}}{Y_R}$
Исходный ресурс (от начала эксплуатации до образования трещины)	$N_{ц} = \omega_N C^* \tau_0 / C_0 \exp\left(\frac{U_0}{KT} - Y_{AE} \sigma\right) = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma)$
Остаточный ресурс	$N_{ост} = N_B / \exp(Y_{AE} \sigma) - N_{пр}$

Примечание. σ_B , σ_R , σ_{RD} — пределы прочности и выносливости стандартного образца и реальной детали; $\sigma_{раб}$ — рабочие напряжения; ω_N — частота нагружения; $N_{пр}$ — предварительно отработанный ресурс; Y_R , N_B , N_B — параметры кривой усталости [6]

Таблица 3

Иллюстрация повышения точности относительно оценки на основе сравнения с локально-динамическим критерием Иванова—Быкова*

Класс источника	Показатель Иванова—Быкова (ПБ-03-593-03 от 09.06.03)	Концентрационно-кинетический показатель Y_{AE}	Состояние объекта, активность источника АЭ
I	$m \leq 0$	$Y_{AE} \leq 0$	Работоспособное, неактивный
II	$0 < m \leq 1$	$0 < Y_{AE} \leq Y_R$	Работоспособное, активный
III (неопределенный)	$1 < m \leq 6$	$Y_r < Y_{AE} \leq [S] Y_R$ (сужение диапазона неопределенности)	Ограниченная работоспособность, критически активный (рекомендуется привлечение других методов)
IV	$m > 6$	$Y_{AE} \geq [S] Y_R$	Неработоспособное, катастрофически активный

* См. правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ-03-593-03 от 09.06.03).

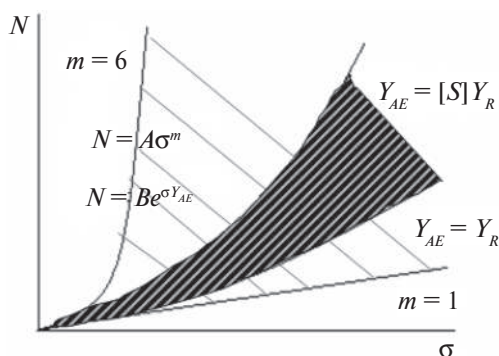


Рис. 5. Сравнение точности относительной оценки с показателем Иванова—Быкова

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Неоднородность структурно-напряженного состояния нахлесточных соединений связана как с неоднородностью поля механических напряжений, так и со структурной неоднородностью, разбросом значений критических напряжений и геометрических параметров структурных элементов.

2. Критерием степени неоднородности прочностного состояния материалов служит соотношение параметров микромеханической модели разрушения и акустической эмиссии



материалов, определение которых возможно на основе сопоставления результатов регистрации сигналов АЭ и имитационного компьютерного моделирования.

3. Для описания разрушения на неоднородном этапе в качестве функции плотности распределения параметра прочностного состояния материала следует использовать функцию логарифмически-нормального или двухпрямоугольного закона, при однородном разрушении достаточно распределения равномерного.

4. Наиболее длительный этап неоднородного разрушения (до 60 % от общего времени до образования трещины) наблюдается у бездефектных прямых (тип 3) и косых образцов нахлесточных соединений с лобовым швом (тип 1). У образцов с дефектами и любых образцов 2-го типа этап кинетически неоднородного разрушения не превышал 30 %, как и у стыковых соединений. После образования трещины образцы разрушаются однородно, как с концентратором напряжений.

5. Комбинированный шов образцов 2-го типа вначале разрушается однородно, так как там всегда есть концентратор — у края флангового шва. После образования трещины происходит ее пластичное (с длительными сигналами АЭ) развитие по сварному шву или по листу с разгрузкой напряженных зон сварного шва, как при неоднородном разрушении.

6. Этап развития трещины (пластичного либо хрупкого) более длителен, чем у стыковых соединений, и протекает кинетически неоднородно с разгрузкой напряженных зон. Упругое поведение трещины (без ее развития и без длительных сигналов АЭ) идентично влиянию концентратора напряжений и приводит к однородному разрушению.

7. Информативным показателем прочностного состояния нахлесточных сварных соединений является концентрационно-кинетический показатель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ромалис, Н.Б. Разрушение структурно-неоднородных тел [Текст] / Н.Б. Ромалис, В.П. Тамуж. — Рига: Зинатне, 1989. — 224 с.

2. Петров, В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов [Текст] / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень. — СПб.: Политехника, 1993. — 475 с.

3. Носов, В.В. Микромеханика акустической эмиссии гетерогенных материалов [Текст] / В.В. Носов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2006. — № 3. — С. 20–27.

4. Носов, В.В. Методология оценки прочности и ресурса технических объектов с помощью метода АЭ [Текст] / В.В. Носов // Труды СПбГПУ. — 2007. — № 504. — С. 119–132.

5. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии [Текст] / В.В. Носов, А.И. Потапов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. — 2009. — № 2. — С. 47–57.

6. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций с помощью метода акустической эмиссии [Текст] / В.В. Носов // Дефектоскопия. — 2009. — № 2. — С. 58–66.

7. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика [Текст]: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев; под ред. В.В. Клюева. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Машиностроение, 2003.

УДК 621.771

А.М. Золотов, С.В. Ганин, Р.А. Паршиков, Е.С. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВ В КАПСУЛАХ

Получение компактных конструкционных и функциональных материалов с ультрамелкозернистой структурой из порошков при использовании традиционных методов порошковой металлургии связано со значительными технологическими трудностями [1]. Одно из перспективных направлений создания таких материалов — применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности кручение под гидростатическим давлением и равноканальное угловое прессование (РКУП) [2, 3].

Наиболее перспективно применение этих методов для компактирования наноструктурных порошков и композиций на основе микро- и нанопорошков. Вместе с тем к одной из особенностей процессов компактирования нанопорошковых материалов относится их повышенная чувствительность к температуре обработки, которая выражается в консолидации частиц при относительно низких температурах. Так, например, консолидация наноразмерных частиц железа начинается уже при температуре 400 °С.

Особенность РКУП — совмещение процессов воздействия на заготовку повышенного гидростатического давления во входном канале и больших сдвиговых деформаций в переходной зоне канала. Такие условия деформирования применительно к компактированию порошковых заготовок позволяют увеличить площадь контакта частиц и разрушить оксидные пленки, что ведет к образованию новых ювенильных поверхностей, которые способствуют схватыванию порошков при значительных сдвиговых деформациях [3]. Эти особенности процесса также могут привести к снижению температуры прессования.

Чтобы оценить возможности применения РКУП для компактирования порошковых материалов, этот процесс был предварительно проанализирован с помощью математического моделирования.

Математическое моделирование процесса РКУП проводилось с использованием метода конечных элементов, при этом были приняты следующие представления: модель материала — упругопластическое тело, модель деформирования — плоская деформация [4]. Условия трения на поверхности контакта деформируемого материала с инструментом описывались путем задания коэффициента трения $\mu = 0,2$. Предполагалось также, что все рассмотренные процессы идут при комнатной температуре. В качестве модельного материала использовался технический алюминий.

Моделирование процесса РКУ-прессования проводилось для канала, имеющего один поворот и следующую геометрию: угол пересечения входной и выходной частей канала $\Phi = 105^\circ$; внешний радиус сопряжения $R = 10$ мм, внутренний радиус сопряжения $r = 5$ мм; ширина прямолинейных участков $b = 20$ мм (рис. 1).

Поскольку в основе исследуемого процесса лежит принцип накопления деформации, одним из критериев, по которому производилась его оценка, был выбран параметр равномерности величины накопленной деформации в объеме заготовки. Известно, что пластическая

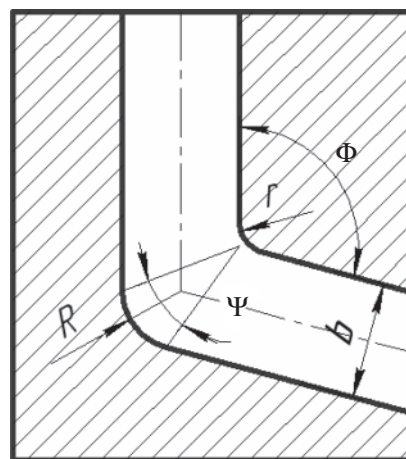


Рис. 1. Геометрия матрицы для РКУ-прессования



деформация в металле сопровождается снижением ресурса пластичности. При этом накопление поврежденности в металле зависит от величины накопленной пластической деформации, вида напряженного состояния в различных частях заготовки, а также от направления формообразования заготовки при многократном повторении процесса. По этой причине еще одним немаловажным для такого рода процессов критерием служит коэффициент жесткости напряженного состояния $k = \sigma_0 / \sigma_i$, т. е. отношение величины гидростатического давления к величине интенсивности напряжений.

На рис. 2 показан характер распределения интенсивности накопленной деформации в продольной плоскости канала после одного прохода.

Из представленных результатов следует, что в передней части заготовки распределение накопленных деформаций носит неравномерный характер и их значения незначительны. Только на расстоянии, равном поперечному размеру заготовки от переднего торца, поле распределения накопленных деформаций стабилизируется и характеризуется относительной равномерностью в поперечном сечении. Характер этого распределения в значительной степени зависит от геометрии канала и условий трения на контактной поверхности.

На рис. 3 представлено распределение показателя жесткости напряженного состояния k для процесса РКУ-прессования.

Видно, что в деформируемой заготовке появляется область, прилегающая к верхней стенке выходного канала, глубиной порядка четверти высоты поперечного сечения, где значения коэффициента k больше нуля ($k_{\min} = 1,525$). Отмеченная смена знака в данном случае объясняется немонотонностью процесса деформирования вдоль наружной стенки канала: гидростатические напряжения при переходе через очаг деформации меняют знак. Прилегающие к внутренней стенке слои материала, находясь во входном канале, испытывают сжатие, а в выходном канале — растяжение. В случае обработки малопластичных материалов, к которым относятся порошковые пористые, возникающие растягивающие напряжения могут стать причиной образования несплошностей на их поверхности.

Эти особенности формообразования заготовок при РКУП объясняют, почему многочисленные попытки применения этого процесса непосредственно для компактирования порошковых материалов оканчивались неудачей.

Реализация этого процесса возможна только при использовании противодавления со стороны выходного канала, а также при создании условий снижения коэффициента трения на контактной поверхности. В противном случае возможно образование застойных зон [3, 5].

Полученные результаты предварительного анализа позволили сделать вывод о целесообразности применения для компактирования порошковых материалов методом РКУП специальных капсул, которые предохраняют прессуемый порошок от негативных внешних воздействий.

Для анализа процессов компактирования порошков в капсулах использовалось математическое моделирование. При этом сам порошок рассматривался как пористая среда.

При обработке давлением пористые материалы в отличие от компактных деформируются с необратимым изменением объема, увеличивая плотность за счет уменьшения размера пор [6, 7]. Для описания деформации некомпактных металлических материалов может быть применен математический аппарат механики сплошных сред, т. е. та же теория пластического течения, на базе которой исследуются процессы обработки давлением компактных материалов. Но для этого необходимо сформулировать условие пластичности уплотняемого материала и определить механические свойства в зависимости от пористости.

В статье рассматривается возможность анализа поведения пористого материала, исходя из представления поры как концентратора напряжений [6]. Эта отправная позиция приводит к эллиптическому условию пластичности. Идея представления пористого тела в виде полидисперсной среды с порами позволяет рассчитать пределы текучести на сдвиг и гидростатическое сжатие в зависимости от относительной плотности пористого материала при известном пределе текучести на растяжении компактного (матричного) материала.

Зависимости относительных пределов текучести на сдвиг и гидростатическое сжатие от

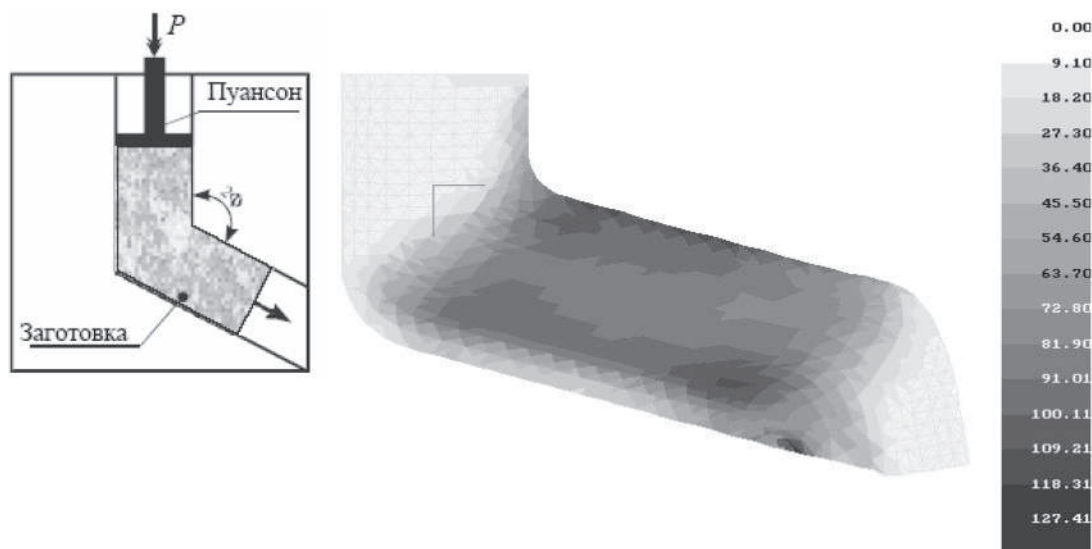


Рис. 2. Распределение интенсивности накопленной деформации в продольном сечении заготовки после однократного деформирования при РКУ-прессовании

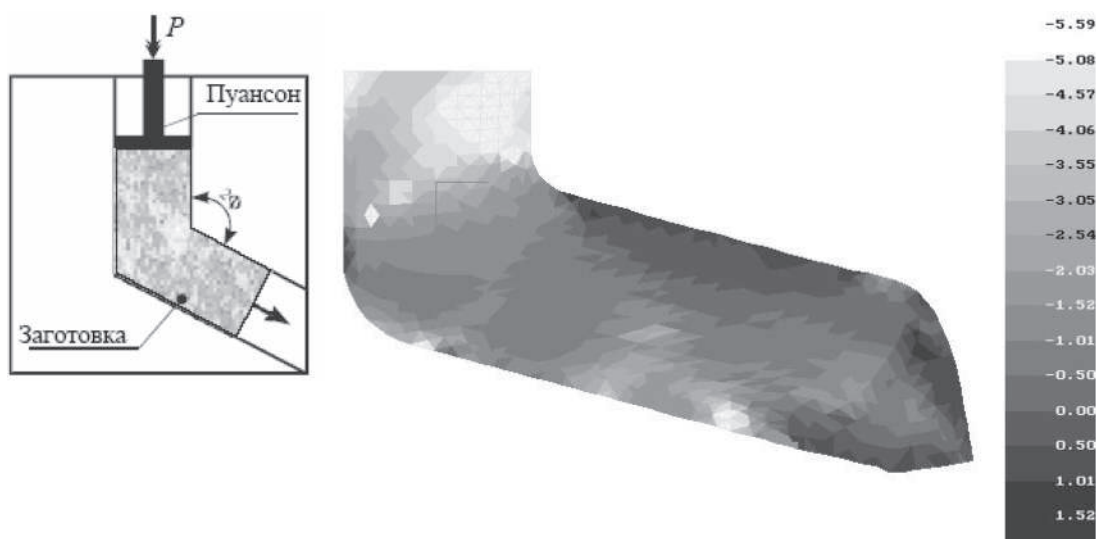


Рис. 3. Распределение показателя жесткости напряженного состояния k в продольном сечении заготовки после однократного деформирования при РКУ-прессовании

относительной плотности пористого материала представлены на рис. 4.

На первом этапе моделирования процесса исследовалась возможность деформирования порошковой заготовки в капсуле на первом проходе РКУП. На рис. 5, а представлена сетка конечных элементов порошковой заготовки в капсуле в исходном состоянии. Геометрия и размеры капсулы были определены на основании предварительных исследований, т. е. при-

нято, что минимальная толщина стенки капсулы должна быть больше высоты зоны положительных значений коэффициента k .

Результаты моделирования показали, что в отсутствие подпора со стороны выходного канала заготовка начинает терять устойчивость. Происходит ее изгиб в месте начала контейнера с порошком (рис. 5, б).

Результаты проведенных расчетов показали, что реализация процесса прессования без

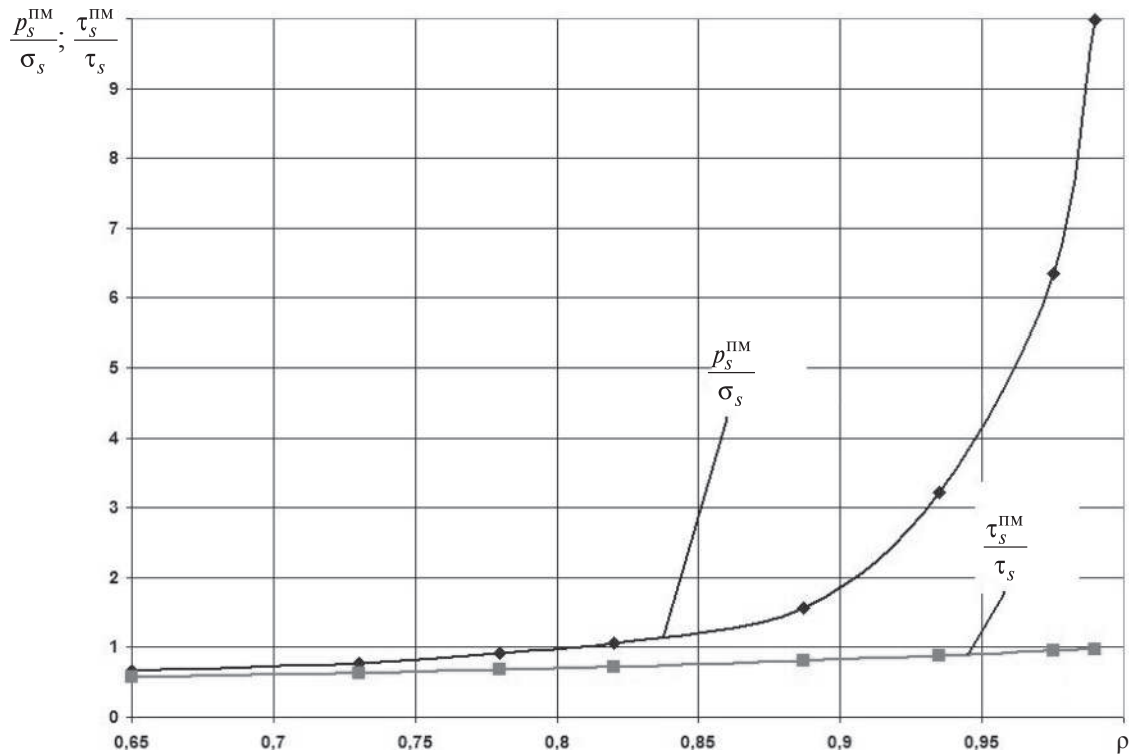


Рис. 4. Зависимости относительных пределов текучести на сдвиг и гидростатическое сжатие от относительной плотности пористого материала

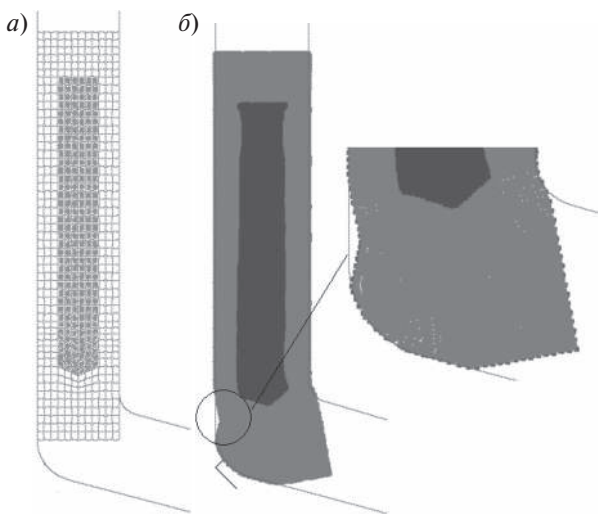


Рис. 5. Сетка КЭ капсулы с порошком (а); изгиб заготовки при деформировании в канале и потеря устойчивости (б)

создания противодействия со стороны выходного канала на начальных этапах процесса невозможна.

Для создания противодействия было предложено использовать в качестве первой заготовки при прессовании сплошную заготовку

из материала капсулы. После ее обработки во входной канал вставлялась капсула с порошком и производилось деформирование. Предварительно порошок в капсуле подпрессовывался до относительной плотности 0,65–0,67. Деформирование заготовки производилось в условиях изотермического прессования при температуре нагрева 300 °С. Материал капсулы — алюминий А7, коэффициент трения — 0,2.

Исходная сетка конечных элементов и положение заготовок в канале показаны на рис. 6.

На первом этапе прессования с подпором со стороны выходного канала происходит осадка капсулы с порошком с одновременным увеличением плотности пористого тела (рис. 7). Работает модель гидростатического сжатия пористой среды в зависимости от относительной плотности пористого материала. Толщина стенок капсулы при этом увеличивается, а высота капсулы уменьшается. Процесс осадки происходит аналогично процессу одностороннего прессования порошков в матрице, т. е. плотность пористой среды уменьшается сверху вниз. Это связано в основном с влиянием

контактного трения на боковых поверхностях матрицы.

По мере увеличения плотности пористой части заготовки характер неравномерности распределения пористости сохраняется до достижения некоторой критической стадии (рис. 8), хотя неравномерность уменьшается. Далее сопротивление компактированию капсулы с порошком при осадке превосходит сопротивление течению первой заготовки в канале. Начинается движение первой и второй заготовок по каналу совместно (см. рис. 8).

После прохождения донной части капсулы через очаг деформации включается механизм уплотнения пористой части заготовки в матрице за счет сдвиговых деформаций под давлением. При этом пористая часть заготовки в капсуле уплотняется значительно более интенсивно по сравнению с первым этапом формообразования — воздействием гидростатического давления (рис. 9).

Следует отметить, что выбранные параметры геометрии капсулы обеспечивают в очаге деформации и при выходе из канала благоприятные условия деформирования пористой части заготовки под воздействием отрицательных значений гидростатического давления и сдвиговых деформаций (см. рис. 9).

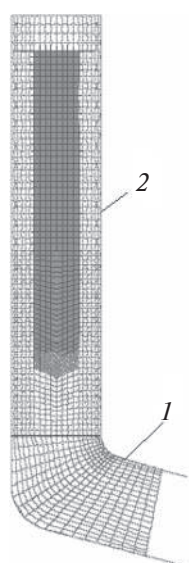


Рис. 6. Сетка конечных элементов капсулы с порошком при прессовании с подпором:
1 — первая заготовка; 2 — капсула с порошком

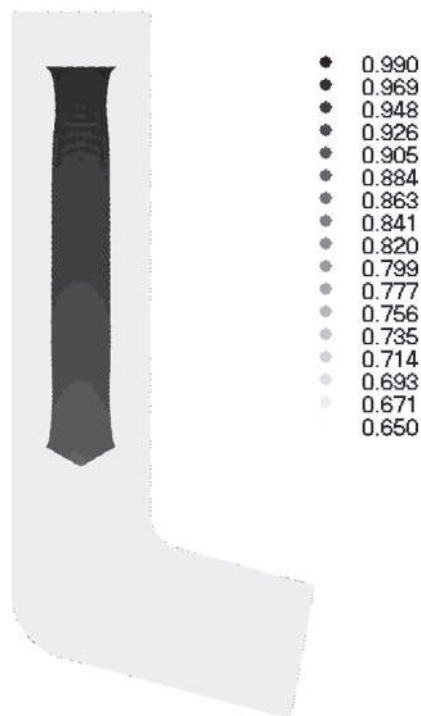


Рис. 7. Распределение плотности порошка заготовки при осадке во входном канале

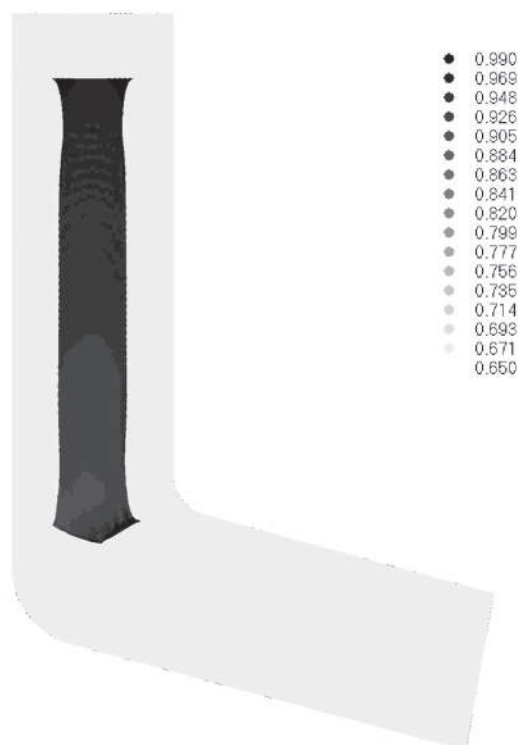


Рис. 8. Распределение плотности порошка заготовки при начале движения обеих заготовок в канале

В дальнейшем процесс выходит на стационарную стадию деформирования (рис. 10). Как можно видеть, уплотнение пористой заготовки в результате воздействия сдвиговых деформаций на границе раздела каналов происходит значительно более эффективно по сравнению с воздействием гидростатического давления во входном канале.

На рис. 11 представлено распределение пористости в порошковой части заготовки, полученное в результате экспериментального исследования процесса РКУП порошковых заготовок в капсулах. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются как качественно, так и количественно с результатами моделирования процесса.

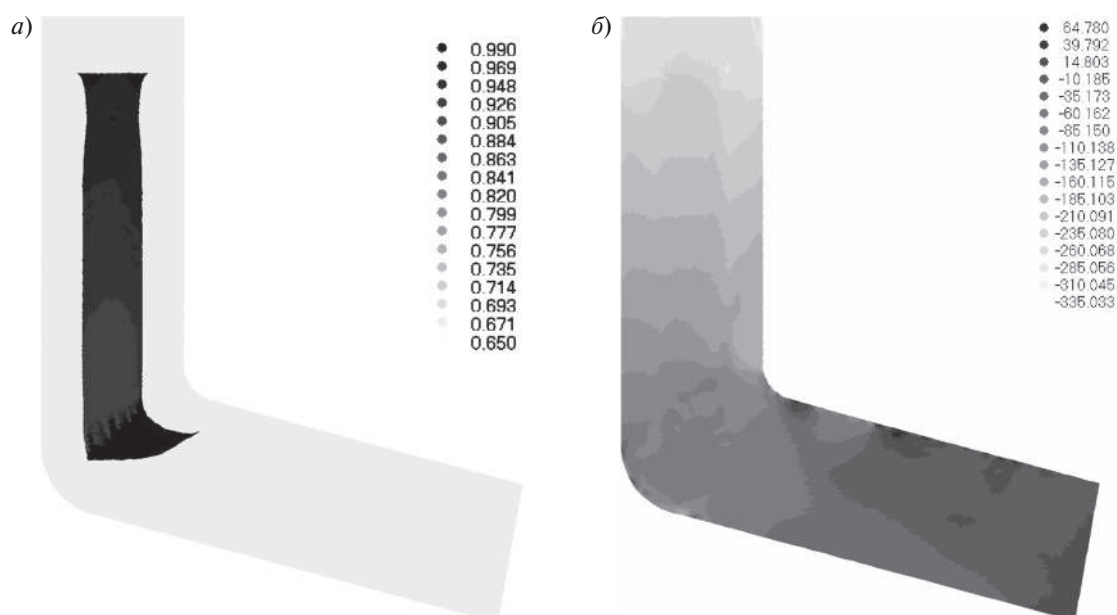


Рис. 9. Распределения плотности порошка заготовки (а) и гидростатического давления в заготовках (б) при выходе из очага деформации

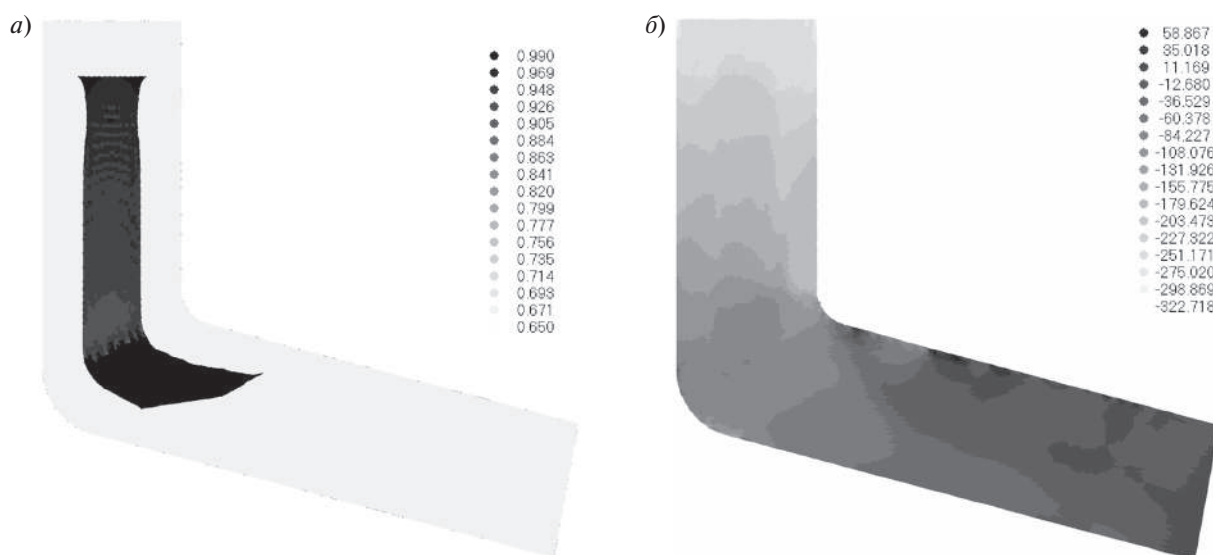


Рис. 10. Распределения плотности порошка заготовки (а) и гидростатического давления в заготовках на стационарной стадии деформирования

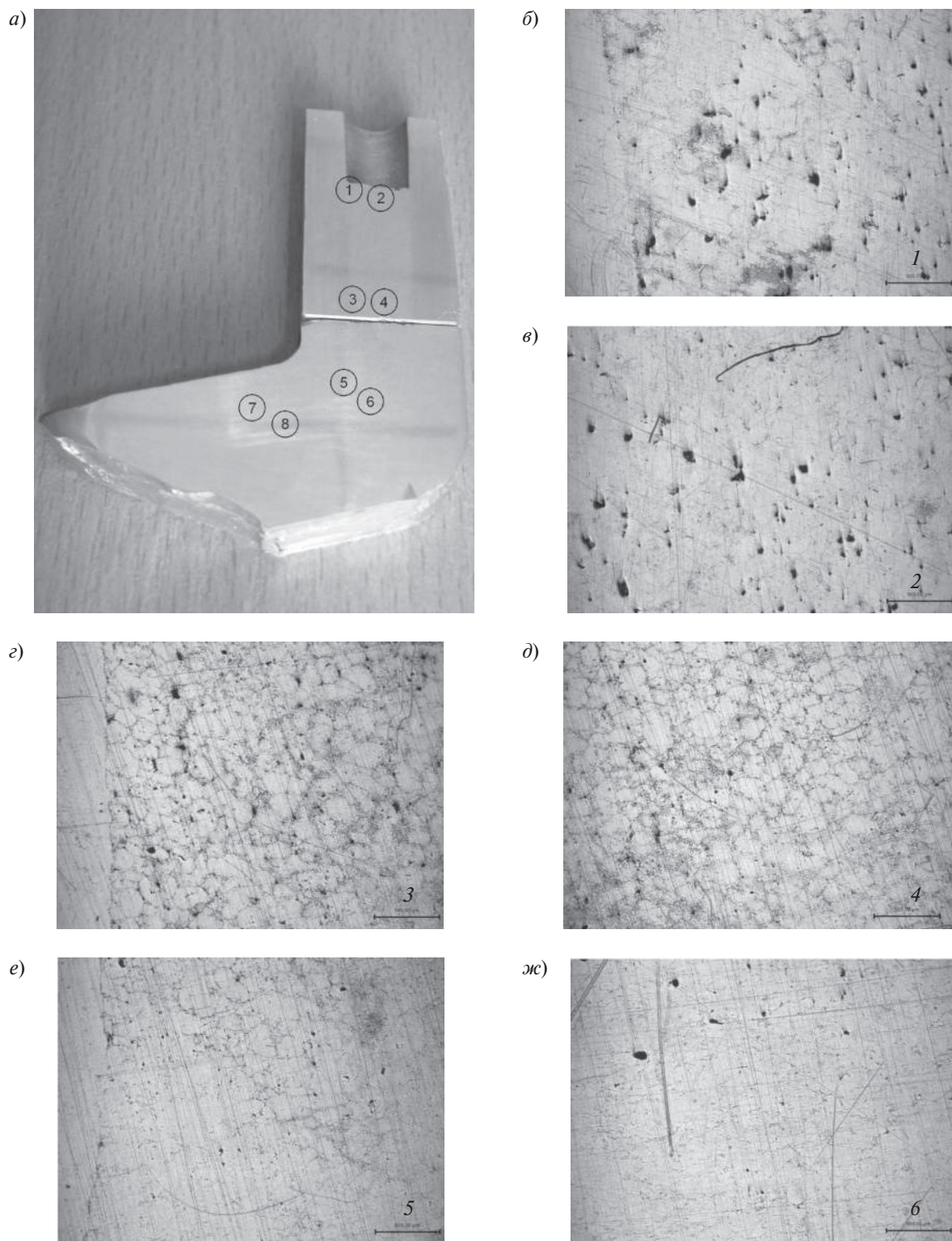


Рис. 11. Общий вид образца (а) и полученное при экспериментальном исследовании РКУ-прессования распределение пористости ($\times 50$) в отмеченных местах порошковой части заготовки:

б — на границе 1 порошка под пробкой; в — в середине 2 порошка под пробкой; г — на входной части 3 границы порошка; д — на входной части в середине 4 порошка; е — в очаге деформации 5 на границе; ж — в середине 6 очага деформации; з — в выходной части 7 на границе; и — в середине 8 выходной части

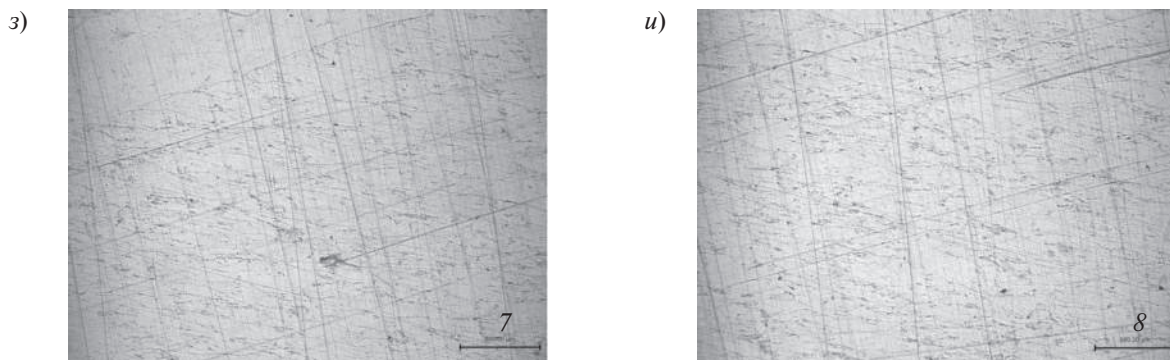


Рис. 11. Окончание (см. с. 152)

Основные результаты нашего исследования следующие:

1. С использованием методов математического моделирования определены основные стадии компактирования пористого материала в капсуле в условиях неустановившегося процесса РКУ-прессования с подпором.

2. Показано, что процесс компактирования порошковой заготовки можно разделить на две стадии: одностороннее прессование порошка в капсуле во входном канале и уплотнение порошка за счет сдвиговых деформаций под давлением в переходной зоне канала.

3. Уплотнение порошка во входном канале происходит за счет осадки капсулы с порошком

и его одновременного радиального обжатия внутренними стенками капсулы.

4. Определена наименьшая толщина стенки капсулы, позволяющая обеспечить надежное уплотнение пористого материала без его разрушения.

5. Результаты математического моделирования процесса хорошо согласуются с данными по пористости реальных порошковых заготовок полученных при РКУ-прессовании.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ (грант № 2.1.2/6955).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов, В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия [Текст] / В.Н. Анциферов [и др.]. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.

2. Valiev, R.Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Progress in materials science. — 2000. — V. 45. — № 10. — P. 103–189.

3. Русин, Н.М. Исследование особенностей пластического течения на макроскопическом уровне в порошковых телах при равноканальном угловом прессовании [Текст] / Н.М. Русин // Перспективные материалы. — 2007. — № 4. — С. 83–91.

4. Рудской, А.И. Анализ особенностей деформирования заготовок методами интенсивной пластической деформации [Текст] / А.И. Рудской [и др.] // Металлообработка. — 2009. — № 6 (54). — С. 41–43.

5. Production of dense compact billet from titanium alloy powder using equal channel angular extrusion [Text]: final report / ARC Centre of Excellence for Design in Light Metals, Dept. of Materials Engineering, Monash University; officials Rimma Lapovok and Dacian Tomus. — Clayton, Melbourne, VIC 3800, Australia. — 2007. — P. 50.

6. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. — СПб.: Наука, 2004. — 640 с. — ISBN 5-02-025040-6.

7. Рудской, А.И. Модель пористого материала и условие пластичности пористых тел [Текст] / А.И. Рудской, Ю.И. Рыбин, А.Э. Александров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2008. — № 4(63). — С. 249–254.

АКТИВАЦИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДВУХСТУПЕНЧАТОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Процессы диффузии играют существенную роль при производстве и термообработке порошковых материалов, так как определяют многие их механические, технологические и эксплуатационные свойства [1, 2]. Упрочнение изделий, активация процессов сращивания порошковых частиц и улучшение структуры материала относятся к приоритетным задачам при разработке новой технологии [3]. В частности, одним из физических методов активации диффузионных процессов является циклическое изменение температуры при спекании [3, 4]. При термоциклической обработке происходит значительное измельчение структуры (зерно № 9–10), снижение неоднородности распределения легирующих элементов, наблюдается увеличение плотности, ударной вязкости, пластичности и ширины прокаленной зоны [3, 5].

Целью нашей работы было установить закономерности массопереноса и взаимного растворения компонентов при циклическом изменении температуры на второй стадии процесса двухступенчатого спекания биметаллических порошковых материалов, основной слой которых изготовлен из порошка железа марки ПЖВЗ–160, а рабочий — из лигатуры порошков железа и Cr_7C_3 с добавками феррохрома ФХ-650. Это позволит повысить эксплуатационные и механические свойства, а также оптимизировать технологию получения изделий.

Слоистые кольцевые заготовки ($70 \times 40 \times 15$ мм) получали по технологии со следующими этапами: 1) установка перегородки в собранную пресс-форму (для получения рабочего слоя требуемой толщины) и заполнение обеих частей порошковой шихтой заданного состава; 2) формование статическим холодным

прессованием при давлении 400–500 МПа; 3) спекание в камерной печи при температуре 1150–1180 °С в течение 2 ч в среде диссоциированного аммиака; 4) высокотемпературный нагрев наружного слоя на индукционной установке с рабочей частотой 16 кГц в первом случае до 1350 °С с выдержкой 25 с, а во втором — с периодическим отключением генератора — от температуры 1250 до 1350 °С с интервалом в 50 °С, паузами в 10 с и выдержкой не менее 10 с на каждом интервале; 5) последующая закалка в охлаждающей среде [6]. Нагрев производился в графитовых тиглях, а температуру процесса контролировали с помощью инфракрасного термометра «Кварц — МА» (погрешность 0,8 %).

Структуру и состав материала исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Quanta 200, рентгеновском энергодисперсионном микроанализаторе EDAX GENESIS и микроскопе «Эпиквант», а также с помощью прибора ПМТ-3.

Микроструктурный анализ показал, что как в первом, так и во втором случае в наружном слое интенсивно протекают процессы диффузии атомов хрома в железо и на границе частиц образуется слой раствора Cr в Fe, выраженный в виде светлой каймы вокруг Cr_7C_3 (рис. 1, а–г). Видно, что после применения технологии нагрева с периодическим отключением генератора весь материал как в переходной зоне, так и на межслойных границах после травления 2%-ным раствором HNO_3 в спирте имеет более светлый оттенок (рис. 1, б), что, очевидно, обусловлено интенсификацией взаимной диффузии Cr и Fe. Подобный вывод косвенно подтверждается однородной структурой

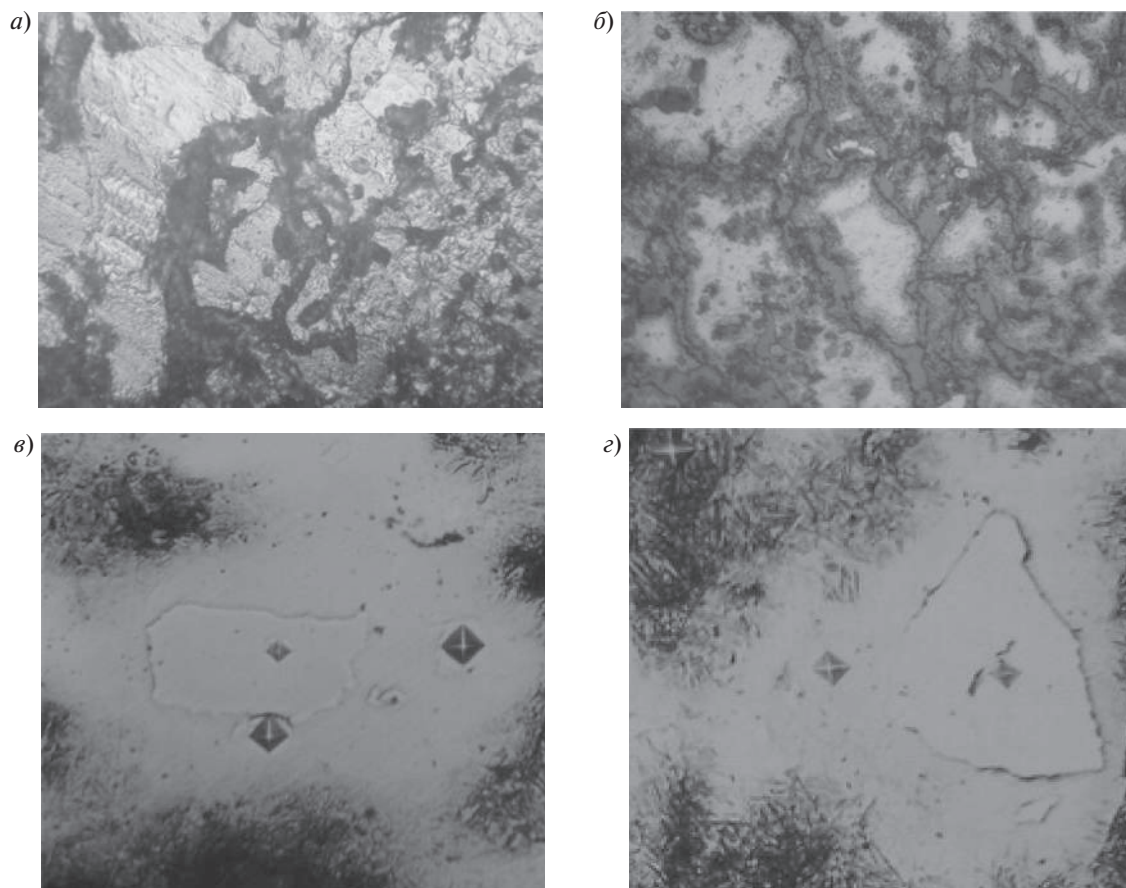


Рис. 1. Микроструктуры рабочего слоя порошкового биметаллического материала после двухступенчатого спекания (а, б — $\times 500$; в, з — $\times 1000$): при непрерывном высокотемпературном нагреве $T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 25\text{ с}$ (а, в) и после прерывистого нагрева в интервале $1250\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой по 10 с (б, з) на второй ступени

материала, получаемой после закалки (рис. 1, б, в). После непрерывного высокотемпературного нагрева диагональ отпечатка алмазной пирамидки меньше в центре карбидной частицы и больше в железной матрице, чем после спекания с применением термоциклирования, примерно в 1,2 раза. Это объясняется высокой диффузионной активностью как атомов железа, диффундирующих в карбид, так и атомов хрома, движущихся в противоположном направлении. Такой результат подтверждается и данными микрорентгеноспектрального анализа карбидной частицы после обоих технологических режимов спекания (рис. 2). Из рис. 2 видно, что диффузионная зона несколько возрастает (примерно на 15 мкм), а концентрация атомов Cr в карбидной частице снижается в результате применения термоциклирования на второй стадии спекания.

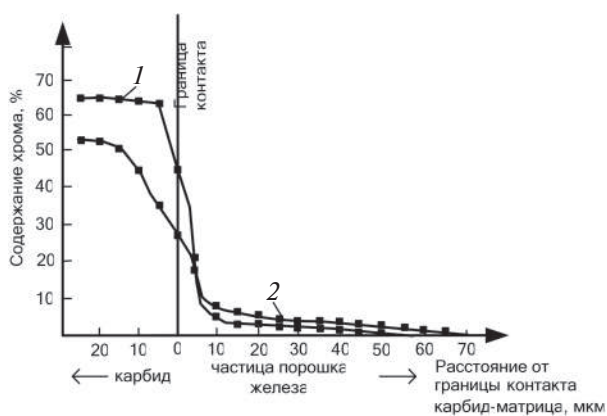


Рис. 2. Изменение концентрации (ат. %) Cr по ширине контакта частиц $\text{Cr}_7\text{C}_3\text{—Fe}$ в результате двухступенчатого спекания: 1 — после высокотемпературного нагрева при $T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $t = 25\text{ с}$; 2 — после термоциклирования в интервале $1250\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 10 с на второй ступени

Полученные результаты хорошо согласуются с представлениями феноменологической теории взаимной диффузии в порошковых материалах. Как известно [2], характерная особенность интенсификации диффузионных процессов в пористых материалах при повышении температуры спекания — это существенное изменение химического потенциала μ_i атомов компонентов; его приращение для любого компонента равно

$$\nabla \mu_i = \sum_{j=1}^{s-1} \frac{\partial \mu_i}{\partial c_j} \nabla c_j + \frac{\partial \mu_i}{\partial P} \nabla P + \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \nabla T, \quad (1)$$

где ∇c_j — градиенты концентрации i -го компонента в s -компонентной системе; ∇P и ∇T — градиенты давления и температуры.

Как указывается в [7], наличие градиента температуры способствует появлению некомпенсированных потоков атомов из объема частиц в направлении межчастичных контактов, а следовательно, приводит к активации объемной диффузии, т. е. увеличению массопереноса растворяемого компонента с поверхности пор и межчастичных контактов в объем частиц растворителя.

Как известно, в случае неизотермического процесса спекания плотность диффузионного потока i -го компонента в многокомпонентной системе определяется по следующей зависимости [6]:

$$J_i = -\frac{1}{V_i^a} \left(\sum_{j=1}^s \tilde{L}_{ij} \nabla \left(\frac{\mu_j}{T} \right) - \tilde{L}_{iT} \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \right), \quad (2)$$

где L_{ij} — кинетические коэффициенты (коэффициенты Онзагера); L_{iT} — кинетический коэффициент термодиффузии; s — число компонентов в системе.

С учетом формулы (1) выражение для J_i примет вид

$$J_i = -\frac{1}{V_i^a} \sum_{j=1}^s L_{ij} \times \left[\sum_{l=1}^{s-1} \frac{\partial \mu_j}{\partial c_l} \nabla c_l + \frac{\partial \mu_j}{\partial P} \nabla P + \frac{h_i - L_{iT} / L_{ij}}{T} \nabla T \right], \quad (3)$$

где $h_i = \mu_i - T \frac{\partial \mu_i}{\partial T}$ — энтальпия i -го компонента.

Градиент температуры по сечению порошковой заготовки в виде цилиндра при высокочастотном нагреве выражается следующей зависимостью [8]:

$$\nabla T = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{с}}}{T_{\text{п}} - T_0} = \left(1 - \left(\frac{r_{\text{с}}}{r_{\text{п}}} \right)^{1,51} \right) e^{-5,79(F_0 - 0,081)}, \quad (4)$$

где $T_{\text{п}}$ — температура поверхности заготовки, °C; $T_{\text{с}}$ — температура сердцевины, °C; $T_0 = 20$ °C —

исходная температура; $F_0 = \frac{at}{r_{\text{с}}}$ — критерий Фурье;

a — коэффициент температуропроводности; t — время нагрева заготовки в индукторе; $r_{\text{п}}$, $r_{\text{с}}$ — радиус соответственно поверхности и сердцевины заготовки.

Допустим, что перепад температуры в i -й точке сечения заготовки в данном случае можно описать зависимостью (4). Тогда пренебрегая величиной L_{iT} / L_{ij} ($L_{\text{CrT}} / L_{\text{Cr}} \ll h_{\text{Cr}}$ и $L_{\text{FeT}} / L_{\text{Fe}} \ll h_{\text{Fe}}$), получим

$$h_i \nabla T = h_i \frac{T_{\text{п}} - T_i}{T_{\text{п}} - T_0} = h_i \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_{\text{п}}} \right)^{1,51} \right) e^{-5,79 \left(\frac{at}{r_i} - 0,081 \right)}. \quad (5)$$

Таким образом, из выражения (5) следует, что наиболее важными параметрами, влияющими на градиент температуры по сечению материала, являются глубина проникновения тока и коэффициент температуропроводности. С увеличением температуры заготовки удельное сопротивление ее быстро падает, при этом глубина проникновения тока уменьшается, т. е. происходит перегрев поверхности и недостаточный нагрев более глубоких слоев. Поскольку диффузионная подвижность атомов углерода выше, чем у хрома, то в этом случае при диссоциации карбидных частиц значительное количество С диффундирует в глубь рабочего слоя. В результате возможно достижение такой разницы в концентрации атомов Cr и C, когда «перегретая» часть рабочего слоя не будет испытывать $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения вплоть до температуры плавления [3], что снижает эксплуатационные и механические свойства материала после закалки [5]. Тем самым, при применении прерывистого

нагрева на второй стадии спекания обеспечивается снижение температуры поверхности за счет теплопроводности и теплоотдачи во время «пауз» и проникновение тока на требуемую глубину при следующем включении генератора.

Коэффициент температуропроводности — величина, изменяющаяся с вариацией температуры. В работе [8] были экспериментально установлены значения коэффициента температуропроводности для спеченной прессовки из железного порошка в зависимости от температуры. Если пренебречь влиянием химического состава сплава (поскольку выше температуры точки Кюри температуропроводности сталей близки по значению), то методом наименьших квадратов получим

$$a = -3,929 \cdot 10^{-10} T + 4,453 \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где T — температура нагрева, °С.

Подставив выражения (5) и (6) в формулу (3) и используя методику составления уравнений диффузии в пористых системах, предложенную в монографии [2], получим

$$J_i^n = -\frac{1}{V_i^a} \left(\tilde{D}_i \frac{\partial c_i}{\partial x_i} + L_i V_i \alpha_i \frac{\partial k}{\partial x_i} + L_i h_i \sum_{l=1}^n \left(1 - \left(\frac{r_l}{r_n} \right)^{1,51} \right) e^{-5,79 \left(\frac{(-3,929 \cdot 10^{-10} T_i + 4,453 \cdot 10^{-6}) t}{r_i} - 0,081 \right)} \right), \quad (7)$$

где \tilde{D}_i — химический коэффициент объемной диффузии i -го элемента; L_i — диагональные значения коэффициента Онзагера в многокомпонентной системе.

Поскольку для сплошной среды $\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial J_i}{\partial x}$, скорость диффузии компонентов (хром, углерод и железо) в пористых системах можно оценить по следующей зависимости:

$$\frac{\partial c_i^n}{\partial t} = \operatorname{div} \left(\tilde{D}_i \nabla c_i + V_i^a L_i \nabla P_L + L_i h_i \sum_{l=1}^n \left(1 - \left(\frac{r_l}{r_n} \right)^{1,51} \right) \times e^{-5,79 \left(\frac{(-3,929 \cdot 10^{-10} T_i + 4,453 \cdot 10^{-6}) t}{r_i} - 0,081 \right)} \right). \quad (8)$$

Как следует из уравнений (7) и (8), в процессе прерывистого индукционного нагрева на второй стадии спекания скорости диффузионного массопереноса существенно возрастают, т. е. происходит интенсификация всех диффузионных процессов на всей требуемой глубине нагрева, в том числе на межслойных границах. Интенсификация диффузионных процессов приводит, в свою очередь, к более равномерному распределению атомов хрома в межслойных границах биметаллических материалов и увеличению ширины диффузионной зоны, что подтверждается данными рентгеноспектрального анализа (рис. 3).

Таким образом, установлено, что термодатический нагрев на второй стадии спекания порошковых биметаллических материалов оказывает существенное влияние на кинетику протекания диффузионных процессов и фор-

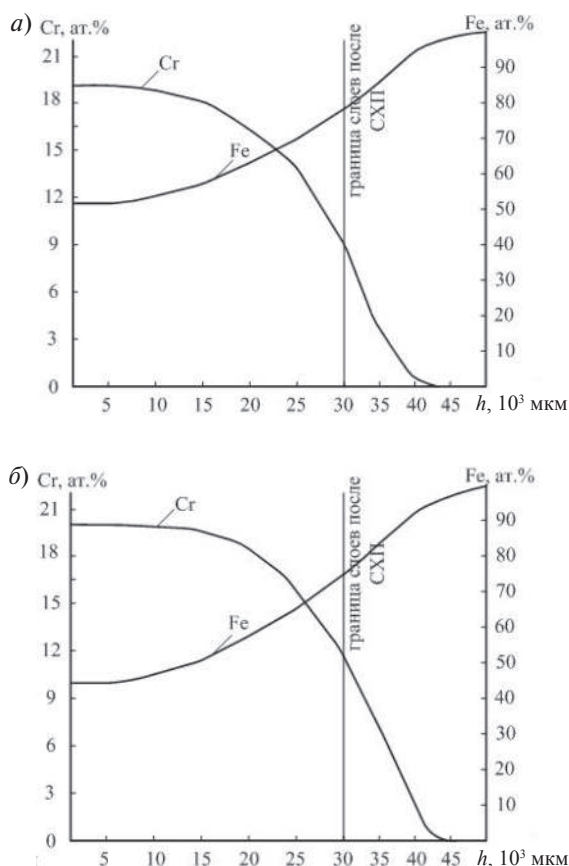


Рис. 3. Распределение (ат. %) Cr и Fe по сечению рабочего слоя и переходной зоны после двухступенчатого спекания в процессе с непрерывного (а) и прерывистого (б) высокотемпературного нагрева

мирование межслойных границ. В результате металлографического и рентгеноспектрального анализов установлено, что прерывистый высокотемпературный нагрев рабочего слоя токами высокой частоты позволяет добиться большей равномерности распределения атомов хрома в легированном слое. Установлены математические выражения, описывающие диффузионные процессы при термоцикличе-

ском нагреве. Используя их можно теоретически установить оптимальные технологические параметры для получения материала заданного состава. Показано, что технология двухступенчатого спекания с применением прерывистого высокотемпературного нагрева на второй стадии — эффективный механизм повышения эксплуатационных и механических свойств биметаллических и многослойных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов, В.Н. Спеченные легированные стали [Текст] / В.Н. Анциферов, В.В. Акименко. — М.: Металлургия, 1983. — 88 с.
2. Гасанов, Б.Г. Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых сплавах [Текст] / Б.Г. Гасанов. — Новочеркасск, 2002. — 113 с.
3. Ермаков, С.С. Порошковые стали и изделия [Текст] / С.С. Ермаков, Н.Ф. Вязников. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. — 319 с.
4. Дорофеев, Ю.Г. Влияние термической и химико-термической обработки на структуру и свойства высокоплотных порошковых материалов. Порошковая металлургия [Текст] / Ю.Г. Дорофеев, Л.Г. Мариненко, В.И. Устименко. — Тез. докл. на XV Всесоюз. науч.-техн. конф. — Киев, 1985. — С. 238–239.
5. Ермаков, Б.С. Ресурс материалов низкотемпературных конструкций [Текст] / Б.С. Ермаков, Ю.П. Солнцев. — СПб.: Химиздат, 2006. — 511 с.
6. Заявка 2009111157 (Российская Федерация). Разработка технологии производства порошковых многослойных материалов с износостойким рабочим слоем [Текст] / Б.Г. Гасанов, А.Д. Ефимов. — 2009.
7. Боровский, И.Б. Процессы взаимной диффузии в сплавах [Текст] / И.Б. Боровский, К.П. Гуров. — М.: Наука, 1973. — 359 с.
8. Дорофеев, В.Ю. Кинетика нагрева порошковых заготовок токами высокой частоты [Текст] / В.Ю. Дорофеев, С.М. Лапеев // Исследования в области горячего прессования в порошковой металлургии: Труды НПИ. — Новочеркасск, 1988. — С. 63–73.

УДК 669.21

М.И. Наторхин

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СВИНЦОВО-СЕРЕБРЯНОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ ХЛОРИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Постоянное обеднение полиметаллического сырья приводит к необходимости разработки новых технологий его переработки. Существующие пирометаллургические технологии чрезвычайно энергозатратны и трудоемки и не отвечают современным санитарно-экологическим требованиям. Гидрометаллургические технологии не только более экологичны, но и позволяют проводить комплексную перера-

ботку металлосодержащего сырья. Одно из перспективных направлений переработки сырья, содержащего тяжелые цветные металлы, — применение специальных растворов, использующих удивительные свойства комплексных соединений.

Известно, что комплексообразование существенно изменяет растворимость веществ, малорастворимых в обычных условиях. Например,

в литературе [1] уже давно опубликованы достаточно противоречивые мнения, характеризующие $PbCl_2$ как «совершенно нерастворимую в воде соль», тем не менее при взаимодействии Pb^{2+} с Cl^- происходит последовательное образование соединений — $PbCl^+$, $PbCl_2$, $[PbCl_3]^-$, $[PbCl_4]^{2-}$, характеризующихся константами K_1 , K_2 , K_3 , K_4 .

Общая растворимость S определяется в данном случае суммой концентраций всех содержащих свинец форм:

$$S = [Pb^{2+}] + [PbCl^+] + [PbCl_2 \text{ водн.}] + [PbCl_3]^- + [PbCl_4]^{2-},$$

или

$$S = \frac{Pr}{\gamma_{\pm}} \times \left[\frac{1}{[Cl^-]^2} + \frac{\beta_1}{[Cl^-]} + \beta_2 + \beta_3 [Cl^-] + \beta_4 [Cl^-]^2 \right], \quad (1)$$

где β_i — общие константы устойчивости ($\beta_i = K_1 \cdot K_2 \dots K_i$); γ_{\pm} — средний коэффициент активности.

Зная β_i , Pr , γ_{\pm} [2], а также $[Cl^-]$, можно рассчитывать растворимость $PbCl_2$ с учетом комплексообразования. Так, если при 20 °С растворимость $PbCl_2$ в обычной воде, по данным [6], составляет 1,06 %, то при концентрации хлоридов 12,5 моль/дм³ она составит 2,58 % при 20 °С и 7,8 % при 108 °С.

Что касается хлорида серебра $AgCl$, то его растворимость в хлоридных растворах также будет сильно зависеть от концентрации лигандов:

$$S = \frac{Pr}{\gamma_{\pm}} \times \left[\frac{1}{[Cl^-]} + \beta_1 + \beta_2 [Cl^-] + \beta_3 [Cl^-]^2 + \beta_4 [Cl^-]^3 \right]. \quad (2)$$

Все вышесказанное относится также к хлоридам висмута и к хлоридам меди; медь, кроме того, может растворяться в хлоридных растворах с выделением водорода и образованием комплексных соединений [4]:



так как за счет комплексообразования ее окислительно-восстановительный потенциал сдвигается в электро-отрицательную область.

Таким образом, в хлоридном растворе могут растворяться соли серебра, свинца, висмута, малорастворимые соли меди (I) и металлическая медь. В нерастворимом остатке должны находиться металлы платиновой группы и золото.

Для успешного проведения хлоридного растворения на практике используются растворы хлорида кальция $CaCl_2$, так как они позволяют достичь в растворе большей концентрации хлоридов, чем, скажем, растворы хлорида натрия $NaCl$ (см., например, патент Франции N 2495640, МПК. С 22 В 3/00, С 01 G 5/00, 1982 г. Способ включает селективное выщелачивание свинца и серебра из отходов путем обработки их подкисленным раствором $CaCl_2$ с последующим выделением металлов из раствора цементацией с помощью алюминия).

Тем не менее в результате наших исследований была найдена еще более интересная хлоридная система, использующая растворы хлорида цинка $ZnCl_2$ и позволяющая увеличить «хлоридный фон» в 2–3 раза по сравнению с растворами $CaCl_2$. Благодаря данному факту растворимость труднорастворимых соединений также может быть значительно (на порядок) увеличена.

В пользу применения концентрированных растворов хлорида цинка для растворения полиметаллического сырья говорит и тот факт, что подобные растворы имеют повышенную температуру кипения; как было установлено в наших исследованиях, 10М раствор $ZnCl_2$ кипит при 136 °С, в то время как 4,5М раствор $CaCl_2$ — при 108 °С. Увеличение температуры раствора значительно ускоряет интенсивность проведения процесса выщелачивания. Кроме того, по температуре раствора в точке кипения можно судить о концентрации солей в растворе и автоматически контролировать испарение воды с помощью контактного термометра и автоматического дозатора.

При проведении испытаний переработки анодных шламов в хлоридных растворах было установлено, что суммарная растворимость шлама Новгородского металлургического завода (его состав в %: Cu 17,3–19,8; Ag 2,19–2,2; Au 0,0074–0,0076; Pt 0,0010–0,0011; Pd 0,0043–0,0044; Pb 26,74–32,36; Ni 0,34–0,41; Zn 0,26–0,6

в 4,5М CaCl_2) составляет 3,5 г/дм³, в то время как в 1 дм³ 10М раствора ZnCl_2 растворяется 7,0 г шлама. Поэтому при проведении кинетических опытов для снятия ограничений, вызванных предельной растворимостью шлама в хлоридном растворе, брали по 1,0 г шлама на 1 дм³ раствора. Температура выщелачивания равнялась температуре кипения соответствующего раствора: 108 °С для раствора CaCl_2 и 136 °С для раствора ZnCl_2 .

Сравнительные результаты выщелачивания анодных шламов в 4,5М растворе CaCl_2 и в 10М растворе ZnCl_2 , полученные в результате кинетических опытов, представлены на рис. 1:

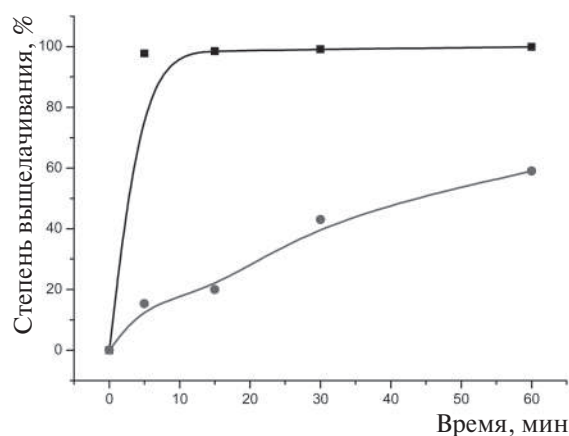
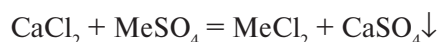


Рис. 1. Зависимость степени выщелачивания шлама от времени растворения:
— ■ — ZnCl_2 ; — • — CaCl_2

Из рис. 1 видно, что вскрытие и растворение большей части анодного шлама в 10М ZnCl_2 происходит достаточно быстро: за 5 мин в раствор переходит 97,7 % шлама. В случае выщелачивания анодного шлама в 4,5М растворе CaCl_2 в начальный момент времени происходит «сульфатизация» шлама из-за того, что в растворе в большом количестве присутствуют ионы кальция, а в шламе имеются сульфат-ионы. При взаимодействии сульфатов шлама с хлоридом кальция происходят обменные реакции:



(где Me — металлы, например Cu, Pb), в результате чего на поверхности частиц шлама образуется белый налет, препятствующий его растворению. За 15–30 мин выщелачивания

образование сульфатов кальция заканчивается и начинается их растворение; на кривой CaCl_2 (см. рис. 1) можно видеть увеличение угла наклона. Механизм растворения сульфата кальция еще недостаточно изучен.

Характер растворения в ZnCl_2 отличается тем, что растворение большей части шлама происходит в течение первых 5–10 мин, при этом сульфатизация его поверхности не наблюдается. После «почти полного» (99,85 %) растворения шлама в ZnCl_2 остается металлизированная фракция, состоящая из меди, золота и металлов платиновой группы в виде сплавов и химических соединений друг с другом.

Как уже было отмечено выше, металлы, переходящие в хлоридные растворы, находятся в этих растворах в виде устойчивых хлоридных комплексов. Выделение данных металлов такими способами, как химическое осаждение в виде малорастворимых соединений, сорбция, экстракция, затруднено и малоприменимо. Было установлено, что достаточно полное выделение металлов может быть осуществлено с помощью так называемой «цементации» — реакции обмена с некоторыми активными металлами. В данном случае, в качестве активного металла целесообразно использовать цинк, так как в случае раствора ZnCl_2 это открывает возможность создания замкнутой технологии.

Остаточная концентрация металла в растворе при его цементации другим, более активным металлом может быть рассчитана из условия равенства потенциалов двух металлов

$$E_{m1} = E_{m2}, \quad (3)$$

так как процесс растворения одного металла и осаждения на его поверхности другого происходит при реализации так называемого «смешанного» потенциала, при котором суммарная плотность тока растворения и осаждения равна нулю [5].

Для реакции восстановления металла — $\text{M}^{n+} + ne = \text{M}^0$ — потенциал металла в растворе его ионов описывается уравнением Нернста [5]:

$$E = E_{M^{n+}/M^0}^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \left[\frac{aM^{n+}}{aM^0} \right], \quad (4)$$

где E — окислительно-восстановительный потенциал, В; E^0 — стандартный окислительно-

восстановительный потенциал между металлом M^0 и ионами металла M^{n+} , В; R — газовая постоянная (8,3143 Дж/К·моль); T — температура, К; n — число электронов в уравнении полуреакции; F — число Фарадея (96485 Кл); α — активность металла и его ионов; M^{n+} — ион металла с зарядом $n+$.

Считая, что активность твердого металла $\alpha M^0 = 1$ и в первом приближении $\alpha M^{n+} \approx [M^{n+}]$, имеем под знаком логарифма концентрацию ионов, а не отношение активностей [5].

Потенциалы некоторых металлов в растворах 300 г/л NaCl, по данным Л.А. Салтовской [3], следующие:

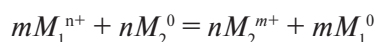
Металл	Zn	Al	Pb	Fe	Cu	Ag
Потенциал, мВ	-814	-729	-367	-340	-89	+100

Потенциалы металлов в растворе могут быть рассчитаны по формуле [5]

$$E = E_{M^{n+}}^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \alpha_m - \frac{RT}{nF} \cdot \ln C_m, \quad (5)$$

где C_m — концентрация металла в растворе, моль/дм³; α_m — мольная доля ионов металла в растворе.

При осуществлении реакции цементации



достижение равновесия приводит к равенству потенциалов (3), и тогда из уравнения (4) следует:

$$\begin{aligned} E_{M_1}^0 + \frac{0,058}{n} \lg [M_1^{n+}] &= \\ &= E_{M_2}^0 + \frac{0,058}{m} \lg [M_2^{m+}]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lg \frac{|M_1^{n+}|^m}{|M_2^{m+}|^n} = \frac{E_{M_2}^0 - E_{M_1}^0}{0,058}, \quad (7)$$

где $RT/F = 0,058$.

Зная стандартные потенциалы металлов, из данного отношения можно определить их равновесные концентрации. Допустим, серебро осаждается свинцом. Тогда

$$\lg \frac{|Pb^{2+}|}{|Ag^+|^2} = \frac{E_{Ag}^0 - E_{Pb}^0}{0,058}, \quad (8)$$

откуда

$$[Ag^+] = \sqrt{\frac{[Pb^{2+}]}{10^{\frac{0,799+0,126}{0,058}}}}. \quad (9)$$

Здесь +0,799 В — стандартный потенциал серебра, −0,126 В — стандартный потенциал свинца.

Тогда при $[Pb^{2+}] = 10$ г/дм³ получаем $[Ag] = 0,002$ мг/дм³, т. е. остаточная, равновесная концентрация серебра в растворе при его цементации свинцом составит 0,002 мг/дм³.

В случае же осаждения меди свинцом

$$\lg \frac{|Pb^{2+}|}{|Cu^+|^2} = \frac{E_{Cu}^0 - E_{Pb}^0}{0,058}, \quad (10)$$

откуда

$$[Cu^+] = \sqrt{\frac{[Pb^{2+}]}{10^{\frac{0,521+0,126}{0,058}}}}. \quad (11)$$

где +0,521 В — стандартный потенциал меди, −0,126 В — стандартный потенциал свинца.

Соответственно при $[Pb^{2+}] = 10$ г/дм³ будет $[Cu^+] = 0,038$ мг/дм³, т. е. остаточная, равновесная концентрация меди в растворе при ее цементации свинцом составит 0,038 мг/дм³.

Таким образом, как следует из предварительных теоретических расчетов, с помощью цементации можно достаточно полно удалить из растворов как медь (до остаточного содержания 0,038 мг/дм³), так и серебро (до 0,002 мг/дм³). В случае же осаждения цинком в первый момент времени будет происходить совместное осаждение свинца, меди и серебра, а после расходования цинка — осаждение меди и серебра свинцом.

На практике для успешного осаждения серебра, меди, висмута и свинца из концентрированных хлоридных растворов необходимо, чтобы в растворе образовалась так называемая структурированная свинцовая губка (общий вид ее показан на рис. 2) с высоко-развитой поверхностью в виде переплетенных нитей.

Структурированная свинцовая губка обладает чрезвычайно высокоразвитой поверхностью,

на которой успешно осаждаются другие металлы. Для образования структурированной свинцовой губки в хлоридный раствор при температуре 60 °С необходимо ввести активированную цинковую пыль. Активация цинковой пыли производится в 1–5%-м горячем (80–90 °С) растворе HCl при отношении ж/т = 20. Для успешного осаждения металлов цинковый порошок необходимо брать с 20%-м избытком от общего количества осаждаемых металлов. Для достижения лучшей полноты осаждения общее количество цинковой пыли необходимо вводить в 2–3 приема (но не менее 0,5 г за один прием) с выдержкой между подачами в 5 мин.

После завершения ввода цинка в хлоридный раствор и образования в объеме структурированной свинцовой губки необходимо выдержать 5 мин, затем перемешивать раствор вместе с частицами губки еще 10–15 мин, после чего губку следует удалить из раствора фильтрацией на бумажном нутч-филт্রে и промыть горячей разбавленной HCl.

Полученная губка может быть переработана в $PbCl_2$, Cu, Ag с помощью солянокислого растворения.

Общая технология переработки полиметаллического сырья в виде разработанной нами замкнутой схемы представлена на рис. 3.

Таким образом, возможна переработка анодных шламов с получением следующих товарных продуктов:

твердого, кристаллического хлорида свинца ($PbCl_2$), который можно использовать как самостоятельный товарный продукт, или металлического свинца;

металлического порошкообразного серебра; металлической меди;

концентрированного остатка металлов платиновой группы и золота.

В заключение хочется выразить благодарность моему научному руководителю, доктору технических наук профессору Анатолию Петровичу Гаршину за неоценимую помощь в ходе выполнения данной работы.

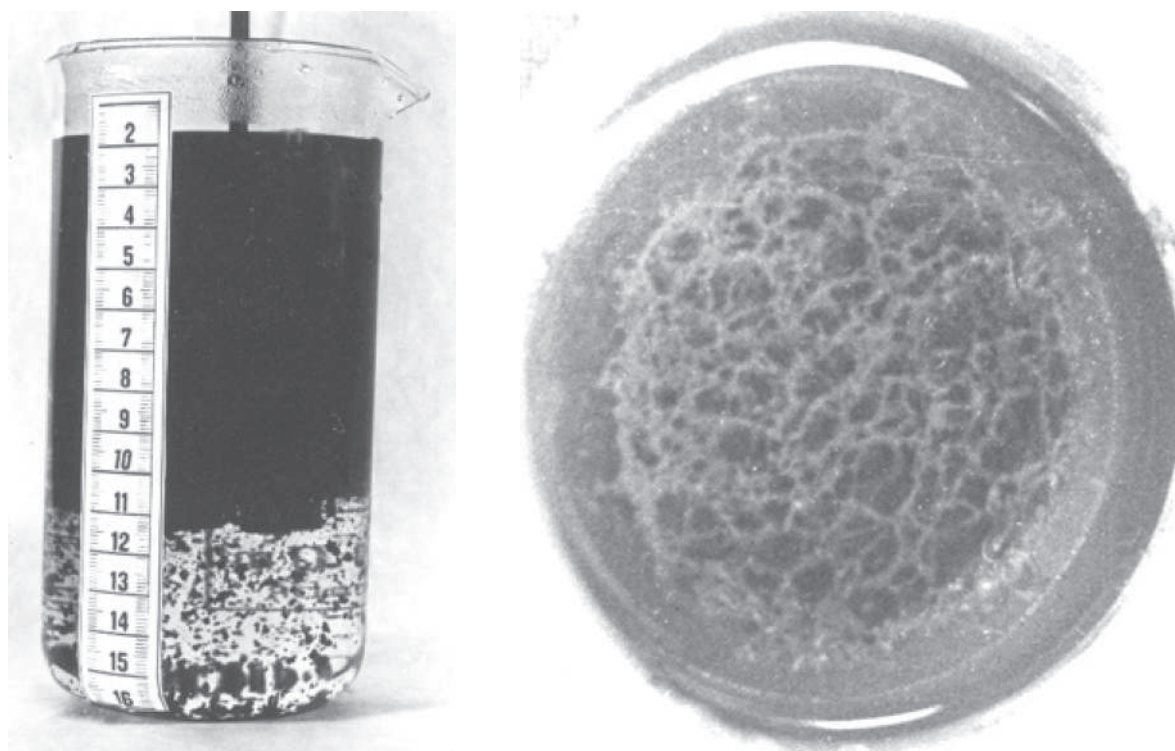


Рис. 2. Вид структурированной свинцовой губки в первый момент времени

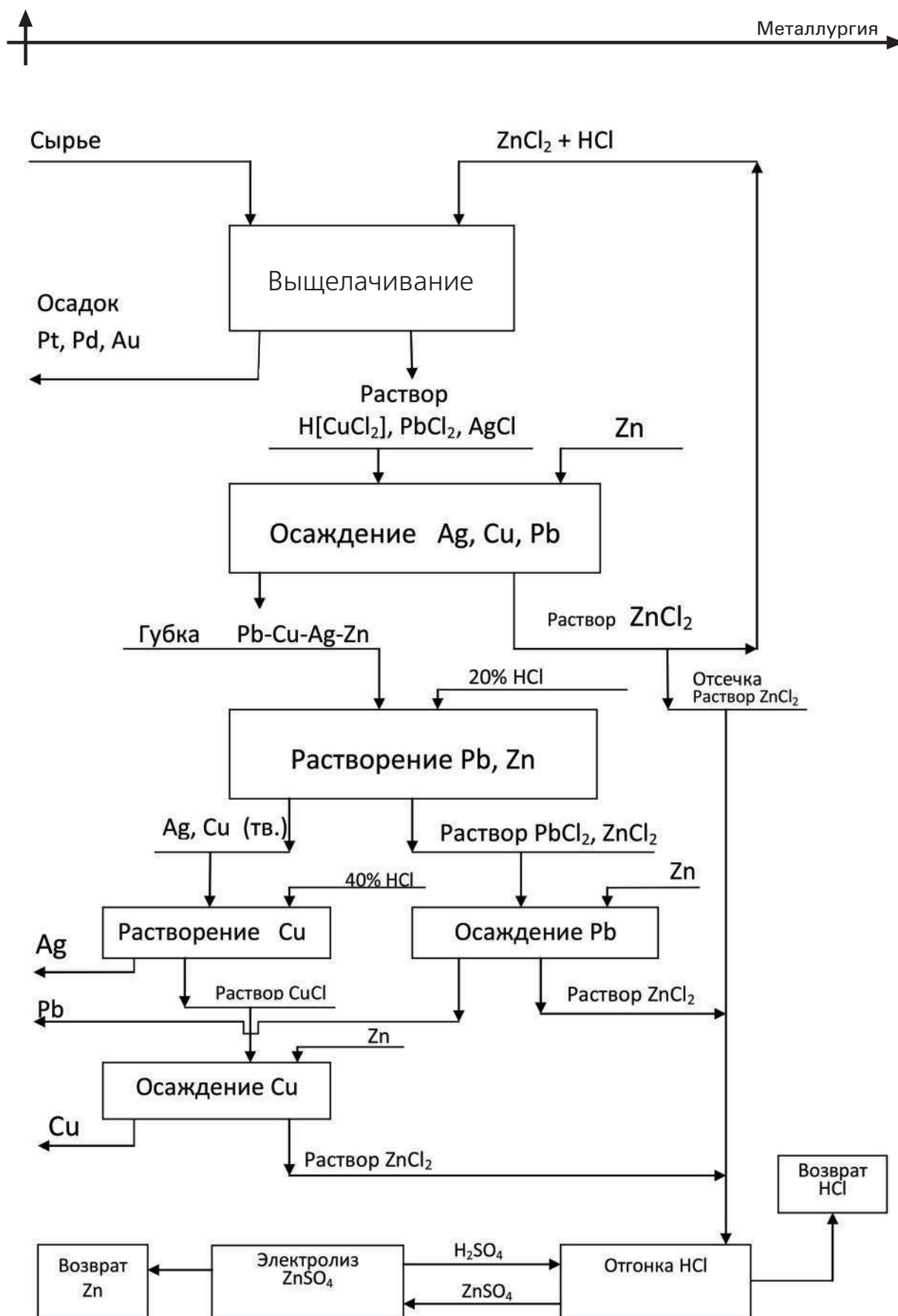


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема переработки свинцово-серебряного сырья с получением чистых металлов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лоскутов, Ф.М.** Металлургия свинца [Текст] / Ф.М. Лоскутов. — М.: ОНТИ, 1937. — 336 с.
2. **Гороновский, И.Т.** Краткий справочник по химии [Текст] / И.Т. Гороновский [и др.]. — Киев: Наукова думка, 1987. — 830 с.
3. **Салтовская, Л.А.** О цементации и электролитическом выделении свинца из хлоридных растворов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Алма-Ата, 1951. — 19 с.
4. **Коттон, Ф.** Современная неорганическая химия [Текст] / Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. — Т. 3 — М.: Мир, 1969. — 592 с.
5. **Феттер, К.** Электрохимическая кинетика [Текст] / К. Феттер. — М.: Химия, 1967. — 856 с.
6. **Карякин, Ю.В.** Чистые химические реактивы [Текст] / Ю.В. Карякин. М.: ГОНТИ, 1947. — 574 с.

К ОБОСНОВАНИЮ СТЕПЕННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛЕЙ ОСТАТОЧНОГО ЧЛЕНА

Исходные положения и выбор критерия достоверности

От основоположников математического анализа унаследована проблема остаточного члена в виде разности между величиной Δz и символом dz . Считается, что эта разность представляет бесконечно малую величину более высокого порядка малости по сравнению со значениями Δz и dz . Замена величины полного приращения Δz на величину дифференциала dz допускается, когда разность между ними принимается в виде линейного приближения, а поставленная задача позволяет пренебречь величинами более высокого порядка малости. Если членами более высокого порядка пренебречь нельзя, надо рассматривать нелинейные приближения, т. е. учитывать следующие члены разложения. Для подобных случаев учеными предложен ряд способов по определению влияния долей остаточного члена на факторы, но «различные предложения ... не были логически безупречно мотивированы и остались непринятыми» [1]. Стояла задача показать, что любое «число» (в данном случае остаточный член) есть не только результат произведения, но и выражает сумму некоторых слагаемых, соответствующих количеству сомножителей, — проблема, которая считалась неразрешимой. В статье предложено обоснованное разделение остаточного члена между вызвавшими его факторами, которое в литературе отсутствует.

Проблема остаточного члена с особой остротой встала в экономике при определении долей прироста производной двухфакторной функции, общая формула которой имеет вид

$$\Delta z = \Delta x Y_0 + \Delta y X_0 + \Delta x \Delta y, \quad (1)$$

где $\Delta x Y_0$ и $\Delta y X_0$ — факторы, а произведение $\Delta x \Delta y$ — остаточный, или третий, член, являющийся результатом взаимодействия независимых факторов. При дифференциальном исчислении третий член, как известно, интерпретируется как логическая ошибка и отбрасывается. Отбросить и исключить его из рассмотрения можно при заведомо допустимой точности вычисления и этому есть объяснение: точность вычисления не может быть выше точности измерения. Но при решении определенного класса задач приходится учитывать влияние частей остаточного члена на факторы. Возникает желание «разобраться» с этим членом и обоснованно распределить его между факторами. На основе графической интерпретации выражения (1) практически невозможно оценить влияние остаточного члена на каждый из факторов и разложить произведение из двух сомножителей на сумму из того же числа слагаемых. Различные варианты по его распределению известны под рубрикой «Экономический факторный анализ» [2].

В процессе длительного обсуждения этого вопроса сложилось негативное отношение к предложениям по разделению остаточного члена. Любое из них воспринимается как «очередное бесперспективное упражнение», утверждается, что произведение разложить в сумму функций от сомножителей вида $\Delta \lambda \Delta F = \varphi(\Delta \lambda) + \varphi(\Delta F)$ нельзя, поскольку задача имеет целый континуум решений [3]. Действительно, количество способов по разделению произведения на части не имеет ограничений, но решение, отвечающее заданному критерию достоверности, может быть только одно.

Критерием достоверности предлагаемого метода выступает требование по представлению

результатирующего показателя (Δz) в виде суммы приведенных факторов без остатка, т.е. без конструирования дополнительных условий и использования метода последовательных приближений. Присоединение долей остаточного члена к факторам и будет соответствовать их приведенным значениям (в данном случае $\varphi(\Delta\lambda)$ и $\varphi(\Delta F)$ — приведенные факторы).

Метод должен оставаться справедливым вне зависимости от абсолютных значений анализируемых величин, количества задействованных факторов и их одно- или разнонаправленного действия.

При определении долей остаточного члена выполнение этих требований является обязательным. Результат деления остаточного члена отражает аналогичные изменения факторов, а равенство факторов сопровождается равенством долей остаточного члена.

Задача исследования состоит в обосновании метода по точному и однозначному определению доли влияния каждого в отдельности фактора на результирующий показатель (общий прирост Δz). Алгебраическим путем предполагается получить алгоритм, с помощью которого достигаются однозначный результат вычисления долей остаточного члена и их участие в определении приведенных значений факторов. Алгоритм позволит разложить приращение функции нескольких независимых переменных на равное числу сомножителей количество независимых слагаемых. Каждое слагаемое должно обладать однородными признаками и содержать только ему присущую величину влияния на результирующий показатель. Вопрос касается установления правил по определению долей независимых слагаемых, в соответствии с которыми формируется величина остаточного члена.

Приступая к обоснованию решения, обратим внимание на следующее обстоятельство, которое является основополагающим. Принято считать, что сомножители, определяющие площадь, представляют результат произведения: налицо переход от независимых величин-факторов к их гибриду — объединению «разных» сомножителей. Представим иной подход к нахождению размера площади (в данном случае остаточного члена). Считаем, что каждый фактор-сомножитель участвует в его образовании как самостоятельная

и независимая величина, а в сумме они заполняют всю площадь.

В качестве необходимого признака долей остаточного члена принимаем условие о независимости определяющих его частей. Каждая доля включает только однородные и однопорядковые составляющие. Такое решение было найдено и его практическая работоспособность подтверждена в ряде публикаций на конкретных примерах и в сравнении с другими предложениями [4–7]. В качестве достаточного признака для определения долей остаточного члена принимаем условие об ограничении его величины конкретными границами, выход за которые недопустим.

Соблюдение необходимого и достаточного признака принимаем за выполнение критерия достоверности по определению долей остаточного члена.

Нахождение алгоритма для определения долей остаточного члена

В качестве типичного случая рассмотрим произвольную функцию двух независимых переменных, производная произведения которых в развернутом виде представлена выражением (1).

Имеются два независимых компонента X и Y , произведение которых равно Z . Их начальные значения обозначим как X_0 , Y_0 , Z_0 , последующие — через X , Y , Z . Переход от начальных величин к последующим дискретный, между ними не существует промежуточных значений, т.е. предполагается мгновенное изменение величин. Абсолютный прирост обозначим соответственно через $\Delta x = X - X_0$, $\Delta y = Y - Y_0$, $\Delta z = Z - Z_0$. Общий прирост находим по формуле

$$Z_0 + \Delta z = (X_0 + \Delta x)(Y_0 + \Delta y).$$

После умножения и сокращения приходим к формуле (1):

$$\Delta z = \Delta x Y_0 + \Delta y X_0 + \Delta x \Delta y.$$

С целью упрощения дальнейших выкладок представим компоненты и факторы в относительных величинах — темпах роста I_x , I_y , I_z и темпах прироста i_x , i_y , i_z .

Достоинство относительных величин — в их универсальности, что обеспечивает сопо-

ставимость и соизмеримость анализируемых факторов. Они обладают всеми необходимыми качествами для проведения исследования.

Начальные значения темпов роста равны единице, а темпов прироста — нулю. Разделив выражение (1) на $X_0 Y_0 = Z_0$, получаем

$$\Delta z / Z_0 = \Delta x / X_0 + \Delta y / Y_0 + \Delta x \Delta y / X_0 Y_0,$$

здесь каждая часть в темпах прироста равна соответственно $i_z = \Delta z / Z_0$, $i_x = \Delta x / X_0$, $i_y = \Delta y / Y_0$. В относительных приростных величинах общий прирост (результатирующий показатель) представляет формула

$$i_z = i_x + i_y + i_x i_y, \quad (2)$$

где $i_x i_y$ — остаточный член.

Требуется определить доли остаточного члена, которые должны быть присоединены к факторам (i_x и i_y) с тем, чтобы получить их приведенные значения:

$$i_z = i_x^{\text{пр}} + i_y^{\text{пр}},$$

где $i_x^{\text{пр}} = i_x + K_1 i_x i_y$ и $i_y^{\text{пр}} = i_y + K_2 i_x i_y$ при $K_2 = 1 - K_1$.

Выражение (2) позволяет с необходимой наглядностью дать геометрическое истолкование производной функции двух переменных в относительных величинах (см. рис. 1, на

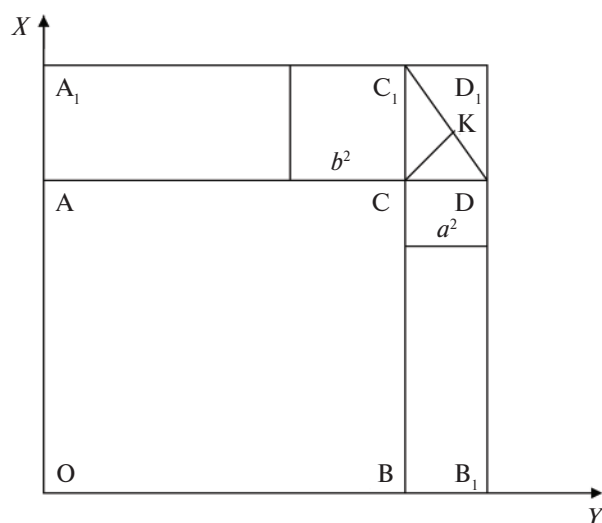


Рис. 1. Геометрическое истолкование производной функции двух переменных в относительных величинах

котором остаточный член представлен в качестве самостоятельного объекта исследования).

На рис. 1 представлено следующее:

первоначальная площадь квадрата OACB, равная $S_{OACB} = Ix_0 \cdot Iy_0 = 1 = Iz_0$;

прирост первоначальной площади по оси X —

$$S_{BCDB_1} = i_x \cdot Iy_0 = 1 \cdot i_x = i_x;$$

прирост первоначальной площади по оси Y —

$$S_{AA_1C_1C} = i_y \cdot Ix_0 = 1 \cdot i_y = i_y;$$

площадь остаточного члена — $S_{CC_1D_1D} = i_x i_y$;

прирост общей площади — $S_{AA_1D_1B_1BC} = i_z = i_x + i_y + i_x i_y$.

Требуется определить, из каких независимых и однородных частей образуется площадь остаточного члена с последующим присоединением полученных долей к своим однородным факторам (i_x или i_y) для получения их приведенных значений $i_x^{\text{пр}}$, $i_y^{\text{пр}}$.

С целью дальнейшего упрощения изложения произведем замену обозначений $i_x = a$, $i_y = b$; $i_x i_y = ab$ и сделаем дополнительное построение на рис. 1. В прямоугольнике CC_1D_1D проведем диагональ C_1D , которая является гипотенузой для двух равных прямоугольных треугольников: $\triangle CC_1D$ и $\triangle C_1DD_1$. На смежных сторонах прямоугольника построим квадраты, соответственно равные a^2 и b^2 , которые представляют собой составные части прироста площадей (по оси X — S_{BCDB_1} , по оси Y — $S_{AA_1C_1C}$).

По условию задачи факторы a и b — независимые величины, следовательно, и их квадраты a^2 и b^2 также независимы друг относительно друга. Величины a и a^2 , b и b^2 — однородные пары относительно друг друга. Площадь остаточного члена равна произведению $S_{CC_1D_1D} = i_x i_y$, которое по определению есть среднегеометрическая величина относительно значений a^2 и b^2 , что доказывается алгебраически. Поочередно умножая неравенство $a \leq b$ на a и b , получаем эквивалентные ему неравенства $a^2 \leq |ab|$; $|ab| \leq b^2$, объединяя которые имеем геометрическую прогрессию $a^2 \leq |ab| \leq b^2$ со знаменателем b/a .

Обоснованным и, что естественно, единственным будет решение, в соответствии с которым каждая доля остаточного члена включает только часть величины a^2 либо часть величины b^2 . Соблюдение этого условия означает, что необходимый признак по разделению остаточного члена на две независимые друг от друга части выполняется, и такое решение может быть только единственным. Для доказательства

его выполнения сделаем на рис. 1 дополнительное построение. В ΔCC_1D опустим на гипотенузу высоту $СК$ и получим два подобных прямоугольных треугольника $\Delta CDK \sim \Delta CC_1K$, которые подобны и треугольнику ΔCC_1D . Из подобия этих треугольников и свойства теоремы Пифагора находим, что

$$2S_{\Delta CDK} = a^2 ab / (a^2 + b^2), \quad (3)$$

$$2S_{\Delta CC_1K} = b^2 ab / (a^2 + b^2). \quad (4)$$

Эти площади в сумме определяют величину остаточного члена $S_{CC_1D_1D} = ab = i_{xy}$. Получено решение, в соответствии с которым одна доля остаточного члена пропорциональна только величине a^2 , другая — только b^2 . Очевидно, что решение единственное. Найденные выражения для долей позволяют заключить, что площадь остаточного члена представляет не механическое соединение двух независимых величин (ab), как принято считать, а образуется из двух разнородных долей, содержащих конкретную информацию о своем составе. Происходит не смешивание двух независимых величин, а их сложение, и получается нечто единое, или общее.

На основе представленного решения можно заключить, что фактически единого остаточного члена не существует, а есть две независимые друг от друга величины — доли, сумма которых и определяет величину остаточного члена. Его площадь в качестве единицы размерности содержит два различных квадрата, между тем как стороны остаточного члена имеют другую единицу размерности — длину.

В качестве иллюстрации необходимого признака приведем пример с двумя несмешивающимися жидкостями. Каждая из них растекается по всей площади остаточного члена и полностью заполняет ее. Графическая интерпретация процесса представлена на рис. 2.

На рис. 2 показано, что остаточный член образуется из двух независимых друг от друга частей (a^2 и b^2) аналогично независимым между собой величинам (a и b). Кривая L , соединяющая точки C и D_1 , находится методом вариационного исчисления, все данные для этого известны: $CD = a$; $DD_1 = b$; $S_{CLD_1D} = a^2 ab / (a^2 + b^2)$.

Отношение долей остаточного члена принимаем за коэффициент его деления: $d = S_{\Delta CDK} / S_{\Delta CC_1K} = a^2 / b^2$. Точно такое же отношение

имеет и квадрат, построенный на диагонали C_1D прямоугольника, площадь этого квадрата равна сумме $a^2 + b^2$, т. е. состав остаточного члена и квадрата подобен и однороден. Отсюда следует: площадь любого прямоугольника делится в том же самом отношении, что и площадь квадрата, построенного на диагонали этого прямоугольника (любой квадрат является частным случаем своего прямоугольника). Равенство коэффициентов деления прямоугольника и квадрата есть следствие, непосредственно вытекающее из теоремы Пифагора и характеризующее прямую зависимость между ними.

Пропорцию, в соответствии с которой находится площадь остаточного члена относительно суммы квадратов ($a^2 + b^2$), принимаем за алгоритм (Ал). Для двухфакторной функции он равен

$$\text{Ал} = ab / (a^2 + b^2). \quad (5)$$

Учтем следующий момент: a и b — независимые величины, следовательно, и отношения $n = a/b$ и $n^2 = a^2/b^2$ независимые. Заменив в выражении (5) a на nb , получим

$$\text{Ал} = n / (n^2 + 1).$$

Это означает, что найденный алгоритм — независимая величина относительно значения остаточного члена.

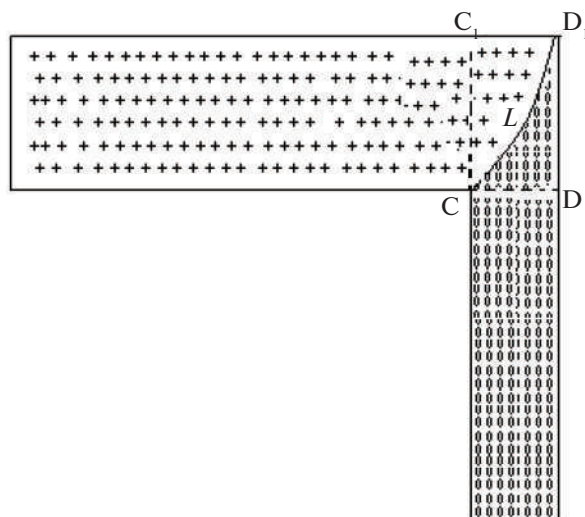


Рис. 2. Образование независимых долей остаточного члена



Алгоритм характеризует удельный вес остаточного члена (прямоугольника) относительно долей квадратов, построенных на смежных сторонах прямоугольника. Числитель алгоритма есть среднегеометрическая величина по отношению к квадратам a^2 и b^2 , которые определяют границу существования остаточного члена. Предложенное разделение представляет единственно обоснованное решение, поскольку одна часть площади остаточного члена пропорциональна только a^2 , а другая — только b^2 . При этом остаточный член находится в границах величин, отвечающих за его разделение и четко определяющих его местоположение.

Алгоритм получен на основе ясного геометрического построения и простых алгебраических преобразований. Благодаря этому любое произведение можно обоснованно разложить на сумму слагаемых без остатка при соблюдении необходимого и достаточного признаков (выполнение критерия достоверности). Для этого необходимо представить любое число-произведение частью общей системы, которая включает компоненты (начальные и последующие), их разность в виде факторов и произведение этих факторов — остаточный член. Достоверность решения, полученного на основе алгоритма, подтверждается выполнением критерия достоверности: деление остаточного члена происходит в отношении a^2/b^2 , а его величина ab ограничена «снизу» и «сверху» квадратами a^2 и b^2 как среднегеометрическая величина в геометрической прогрессии. Область, ограниченная квадратами a^2 и b^2 , включает множество чисел, но только одно из них соответствует значению остаточного члена.

При вещественных значениях a и b доли остаточного члена на основе алгоритма определяются точно и без всякого остатка единственно возможным способом на основе правил элементарной математики. Обоснованность предлагаемого метода подтверждается следствием, вытекающим из теоремы Пифагора: прямоугольник делится в том же самом отношении, что и квадрат, построенный на диагонали этого прямоугольника.

На основе предложенного алгоритма можно эффективно находить производную функцию при ее существовании, однозначно и обоснованно разложить остаточный член между вызвавшими его факторами, т. е. от

мультипликативной формы перейти к аддитивной с тем же самым числом слагаемых. В качестве подтверждения работоспособности предложенного метода рассмотрим конкретный пример.

Пример 1. Дано число a , которое представим произведением $1 \cdot a$ (остаточный член), где $i_x = 1$; $i_y = a$. По формуле $i_z = i_x + i_y + i_x i_y$ находим: $i_z = 1 + a + a = 1 + 2a$ при $i_x^{\text{пр}} = 1 + a/(1 + a^2)$, $i_y^{\text{пр}} = a + aa^2/(1 + a^2)$, сумма которых равна $i_z^{\text{пр}} = i_x^{\text{пр}} + i_y^{\text{пр}} = 1 + 2a$.

Пример 2. Дано $I_z = I_x I_y$, где темпы роста разнонаправлены: $I_x = 0,8$; $I_y = 1,4$; $I_z = 1,12$. Темпы прироста и остаточный член соответственно равны $i_z = 0,12$; $i_x = -0,2$; $i_y = 0,4$; $i_x i_y = -0,08$, т. е. $0,12 = -0,2 + 0,4 - 0,08$. Геометрическая прогрессия имеет вид $0,04$; $0,08$; $0,16$. Используя формулы приведенных значений $i_x^{\text{пр}} = i_x i_y^2 / (i_x^2 + i_y^2)$ и $i_y^{\text{пр}} = i_x i_y^2 / (i_x^2 + i_y^2)$, находим их численные значения:

$$i_x^{\text{пр}} = -0,2 - 0,008 \cdot 0,4 / (0,04 + 0,16) = -0,216;$$

$$i_y^{\text{пр}} = 0,4 - 0,2 \cdot 0,064 / (0,04 + 0,16) = 0,336;$$

$$i_z = i_x^{\text{пр}} + i_y^{\text{пр}} = -0,216 + 0,336 = 0,12.$$

При факторах, изменяющихся в противоположных направлениях, закон распределения остаточного члена подчинен общему правилу.

Имея методику разложения для двухфакторной модели, несложно вывести формулу для трехфакторных и более моделей. В темпах роста трехфакторная модель имеет вид $I_w = I_x I_y I_z$, а в темпах прироста —

$$i_w = i_x + i_y + i_z + i_x i_y + i_x i_z + i_y i_z + i_x i_y i_z. \quad (6)$$

С учетом зависимостей (3) и (4) получаем трехчленную формулу

$$i_w = i_x^{\text{пр}} + i_y^{\text{пр}} + i_z^{\text{пр}},$$

где $i_x^{\text{пр}}$, $i_y^{\text{пр}}$, $i_z^{\text{пр}}$ — приведенные значения темпов прироста трехфакторной модели. Алгоритм для трехфакторной модели имеет вид

$$\text{Ал}_3 = i_x i_y i_z / (i_x^3 + i_y^3 + i_z^3),$$

или

$$abc / (a^3 + b^3 + c^3).$$

Этот алгоритм выступает вослед предшествующему алгоритму — Ал.

$$i_x^{\text{пр}} = i_x + i_x^2 \frac{i_x i_y}{i_x^2 + i_y^2} + i_x^2 \frac{i_x i_z}{i_x^2 + i_z^2} + i_x^3 \frac{i_x i_y i_z}{i_x^3 + i_y^3 + i_z^3}; \quad (A)$$

$$i_y^{\text{пр}} = i_y + i_y^2 \frac{i_x i_y}{i_x^2 + i_y^2} + i_y^2 \frac{i_x i_z}{i_y^2 + i_z^2} + i_y^3 \frac{i_x i_y i_z}{i_x^3 + i_y^3 + i_z^3}; \quad (B)$$

$$i_z^{\text{пр}} = i_z + i_z^2 \frac{i_x i_z}{i_x^2 + i_z^2} + i_z^2 \frac{i_x i_y}{i_y^2 + i_z^2} + i_z^3 \frac{i_x i_y i_z}{i_x^3 + i_y^3 + i_z^3}. \quad (C)$$

Пример 3. Дано $I_w = I_x I_y I_z$, где темпы роста разнонаправлены: $I_x = 1,2$; $I_y = 0,7$; $I_z = 1,5$; $I_w = 1,26$. Темпы прироста и остаточный член равны соответственно $i_w = 0,26$; $i_x = 0,2$; $i_y = -0,3$; $i_z = 0,5$; $i_x i_y i_z = -0,03$, т. е. $0,26 = 0,2 - 0,3 + 0,5 - 0,06 - 0,15 + 0,1 - 0,03$. Подставив принятые значения темпов прироста в формулы (A), (B), (C), получим

$$i_x^{\text{пр}} = 0,2 - 0,0184615 + 0,0137931 - 0,002264 = 0,193066;$$

$$i_y^{\text{пр}} = -0,3 - 0,041534 - 0,039706 + 0,00764 = -0,3736;$$

$$i_z^{\text{пр}} = 0,5 + 0,086207 - 0,110294 - 0,035378 = 0,440535;$$

$$i_w = 0,193068 - 0,3736 + 0,440535 = 0,26.$$

По аналогии с определением алгоритма для трехфакторной функции находим алгоритм для четырехфакторной функции:

$$\text{Ал}_4 = i_x i_y i_z i_v / (i_x^4 + i_y^4 + i_z^4 + i_v^4),$$

который выступает вослед предшествующему Ал₃ при сохранении однопорядковости.

Однопорядковость достигается в результате учета соответствующих начальных значений компонентов, дополняющих и конкретно определяющих соответствующие слагаемые приведенных значений факторов, т. е. за счет содержательной стороны явления. Например, при трехфакторной функции приведенные значения фактора $i^{\text{пр}}$ с учетом начальных значений компонентов имеют вид

$$i_x^{\text{пр}} = I_{y_0} I_{z_0} i_x + I_{z_0} i_x^2 \frac{i_x i_y}{i_x^2 + i_y^2} + I_{y_0} i_x^2 \frac{i_x i_z}{i_x^2 + i_z^2} + i_x^3 \frac{i_x i_y i_z}{i_x^3 + i_y^3 + i_z^3}.$$

Здесь каждая доля остаточного члена состоит из однородных и однопорядковых частей, что придает методу универсальный характер, а учет коэффициента перед алгоритмом в показательной степени, соответствующий количеству сомножителей, позволяет назвать предложенное решение степенным методом.

Графическая интерпретация трехфакторной функции может быть представлена параллелепипедом, на трех сопряженных ребрах которого построены соответствующие кубы i_x^3, i_y^3, i_z^3 . Для объектов четырехмерных и более высокого порядка размерности графическая интерпретация затруднена, но сохраняется закономерность в отношении способа получения всех последующих алгоритмов.

Универсальность степенного метода позволяет получить общее выражение итогового приращения (i_n) для любой n -мерной функции.

Степенной метод позволяет:

с помощью простых алгебраических действий получить результат, который может быть определен с точностью до любого наперед заданного знака без остатка;

автоматически учитывать степень функции и знак ее членов; методом можно пользоваться долго не размышляя и не задумываясь, что важно для практики;

выражение алгоритма для n -мерной функции остается справедливым вне зависимости от абсолютных значений анализируемых величин;

многофакторные функции соответствуют объектам от прямоугольника до n -мерных фигур. Их разделение на слагаемые подчинено правилам элементарной математики, на основе которых достигается полная и достоверная информативность решения;

каждая доля остаточного члена состоит из однородных и однопорядковых значений в соответствии со степенью анализируемой функцией, которая определяется количеством сомножителей, входящих в нее;

при темпах прироста в пределах от 0 до 1 величина остаточного члена уменьшается; при



темпах прироста больше единицы она увеличивается;

однопорядковость членов, входящих в состав приведенных формул, обеспечивается в соответствии с содержательной стороной производимых над анализируемым объектом операций.

На основе степенного метода и его графической интерпретации можно:

предложить решение по разделению акватории Каспийского моря между сопредельными государствами математически обоснованным способом. Предложенный подход может быть взят за основу и при решении других аналогичных проблем;

дать оценку различным приближенным способам, которые существуют и вполне пригодны для практики [8];

наглядно пояснить, почему при умножении $(+5) \cdot (-2) = -10$, а при умножении $(-5) \cdot (-2) = +10$.

Степенной метод позволил получить общее выражение итогового приращения (Δz или i_z) не только для двучленной, но и для n -мерной функции. Он не зависит от абсолютных значений величин, представляющих остаточный член, а также их направленности и количества. Предложенный метод сам по себе имеет познавательную ценность. Вполне возможно, что он окажется востребованным не только для экономико-статистических расчетов оценки экономического роста (что, безусловно, важно), но и в иных областях и сферах научно-практической деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экономическая энциклопедия. Политическая экономия. [Текст]: Т. 1 / Гл. ред. А.М. Румянцев. — М.: Сов. энциклопедия, 1972. — С. 554.

2. Блюмин, С.Л. Экономический факторный анализ [Текст] / С.Л. Блюмин и др. — Липецк: Изд-во ЛЭГИ, 2004. — 148 с.

3. Раяцкас, Р.Л. Количественный анализ в экономике [Текст] / Р.Л. Раяцкас, М.К. Плакунов. — М.: Наука, 1987. — С. 135, 136.

4. Орлов, А.В. Два подхода к разложению прироста по факторам [Текст] / А.В. Орлов // Вестник статистики. — 1987. — № 3. — С. 61–66.

5. Орлов, А.В. Степенной метод разложения прироста по факторам [Текст] / А.В. Орлов; АН СССР, ЦЭМИ // Вероятностно-статист. мето-

ды в экономико-матем. моделировании. — М., 1988. — С. 99–119.

6. Орлов, А.В. Оценка эффективности приращенных ресурсов [Текст] / А.В. Орлов // Вестник статистики. — 1989. — № 12. — С. 54–57.

7. Орлов, А.В. Степенной метод разделения дополнительного прироста между вызвавшими его факторами [Текст] / А.В. Орлов // Науч.-техн. ведомости СПбГТУ. — 2007. — № 3 (51). — С. 193–204.

8. Орлов, А.В. Очерки общей экономической теории. Рационалистический подход [Текст] / А.В. Орлов. — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2004. — С. 124–125.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В ПЛОСКИХ КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТКАХ

Развитие вычислительной техники создает возможность проведения численного эксперимента как совокупности экспериментального и теоретического способов исследования течения. К достоинствам численного эксперимента относятся полнота получаемой информации, меньшая стоимость, высокая скорость получения результатов. Опыт показывает, что результаты численного эксперимента существенно зависят от методики их проведения: типа и количества элементов расчетной сетки, способа задания граничных условий, выбранной модели турбулентности. В связи с этим необходимо провести множество тестов, чтобы убедиться в том, что программы вычислительной гидродинамики способны предоставлять результаты, соответствующие действительному характеру течения [1].

Исследование [2] позволяет использовать его результаты при моделировании течения в ступенях центробежного компрессора. Ранее С.А. Галаевым была выполнена работа [3], в которой показывалась возможность использования пакетов вычислительной гидрогазодинамики применительно к турбинным решеткам с конфузорным характером течения. В предлагаемой статье рассмотрена возможность численного моделирования диффузорного течения в плоских компрессорных решетках с существенным влиянием вязкости. Авторы ставят в ней следующие задачи:

верификация результатов расчетов, выполняемая по данным модельных испытаний плоских компрессорных решеток в широком диапазоне режимов;

исследование методических вопросов постановки численного эксперимента;

оценка эффективности методов вычислительной гидрогазодинамики для анализа течения в плоских компрессорных решетках.

Выбор объекта исследования

Результаты численного моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными,

опубликованными в работе [4]. Объект исследования — плоская компрессорная решетка профилей 10А30/27.6П45. Маркировка исследуемого профиля указывает на основные геометрические параметры: относительная толщина — 10 %; исходный симметричный профиль — А-30; угол изгиба — 27,6°; средняя линия — парабола; абсцисса максимальной вогнутости — 45 % хорды. Геометрические параметры решетки профилей: густота решетки — 1,3; угол установки профилей — 62,6°; относительное удлинение профилей — 2,0.

Натурные испытания решетки проводились в аэродинамической трубе АТ-5 (рис. 1).

Установка состоит из воздухоподводящей магистрали 1, отбойника 2, сотового радиатора 3, решетки и сетки 4, сопла ресивера 5, сопла сопловой коробки 6, направляющей 8, приводов вертикального и горизонтального перемещения половин сопла 7, 9, отсоса пограничного слоя 10, 12, решетки профилей 11, оптического стекла 13, металлического зеркала 14 и дренажа лопатки 15.

Для проведения испытаний при различных величинах угла атаки исследуемая решетка профилей закреплялась во вращающейся обойме. Установка снабжена координатниками для измерения насадками полей параметров потока на входе в решетку и на выходе из нее. Для исследования решеток оптическим методом в одну из обойм вставлялось металлическое зеркало, на котором крепились лопатки. Зеркальный оптический прибор позволял фотографировать оптические картины течения по методу полос одновременно с измерением распределения давления по контуру центрального профиля и на стенке межлопаточного канала.

Измерение параметров потока (полного и статического давлений, температуры, углов) проводилось в контрольных сечениях на расстоянии полухорды от входной и выходной кромок лопатки.

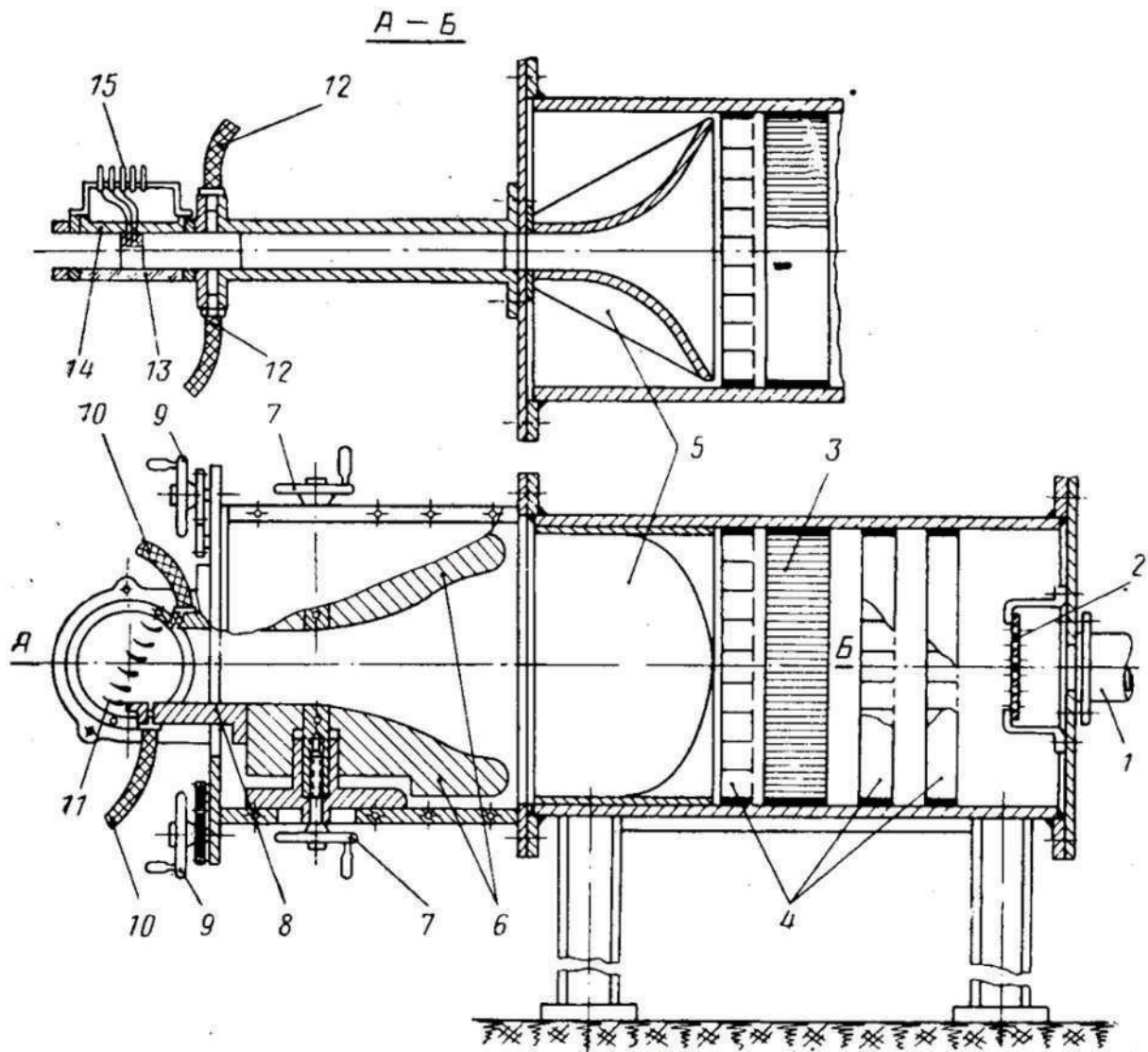


Рис. 1. Схема аэродинамической трубы АТ-5

Методика подготовки объекта численного моделирования

Построение геометрической модели. Геометрическое построение объекта исследования производилось в модуле BladeGen методом Angle/Thickness (угол/толщина), при котором задаются изменение толщины по длине хорды и закрутка лопатки относительно оси вращения.

Построение расчетной сетки. Построенная модель межлопаточного канала экспортировалась в модуль для создания гексагональной расчетной сетки TurboGrid. Была сгенерирована расчетная сетка, состоящая из 300 000 эле-

ментов. Проекция трехмерной расчетной сетки на плоскость показана на рис. 2.

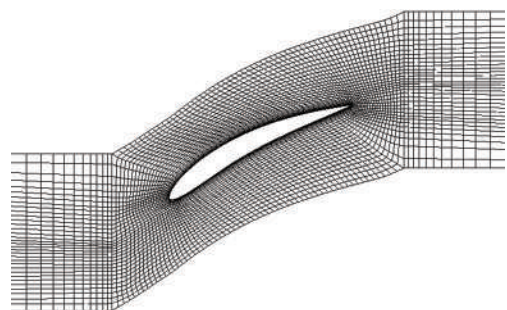


Рис. 2. Расчетная сетка объекта исследования

Задание граничных условий. В препроцессоре программы ANSYS CFX ставились граничные условия: на входе в расчетную область задавались значения давления и температуры торможения, на выходе из расчетной области — массовый расход.

При расчете течение описывалось уравнением Навье — Стокса, осредненным по числу Рейнольдса [5]. Для описания турбулентного течения была выбрана модель переноса сдвигового напряжения Shear Stress Transport (SST), предложенная Ф.Р. Ментором [6]. Эта модель турбулентности, объединившая в себе преимущества двухпараметрических моделей $k-\epsilon$ и $k-\omega$, хорошо зарекомендовала себя при численном моделировании течения в элементах турбомашин [7].

Анализ результатов расчета

В программном комплексе ANSYS был проведен расчет трехмерного дозвукового течения вязкого сжимаемого газа в плоской компрессорной решетке профилей при различных углах атаки ($-8 \dots +8^\circ$) при постоянном значении числа Маха, равном 0,4.

В постпроцессоре программы ANSYS CFX анализировались значения безразмерного расстояния от стенок до 1-го узла расчетной сетки Y^+ . Установлено: оно не превышает 10, что допустимо для расчета турбулентного течения высокорейнольдсовым методом на модели SST [8].

С помощью инструментов постпроцессора программы ANSYS анализировались поля скоростей при различных углах атаки i (рис. 3).

Картинки течения, полученные с помощью программы ANSYS CFX, физически обоснованы. В представленных режимах течение носит благоприятный безотрывной характер и может быть описано с помощью модели «след — струя» [9]. Зона наибольших потерь — область, примыкающая к выпуклой поверхности лопатки, на которой за счет понижения касательных напряжений формируется низкоэнергетическая зона, называемая следом.

Качественная оценка скоростей проведена на основании сопоставления рассчитанных и полученных экспериментально диаграмм поверхностных скоростей по профилям (рис. 4).

Поверхностные скорости по профилям рассчитывались по значениям статических давления и температуры в предположении невязкого потенциального потока с помощью инструментов постпроцессора программы ANSYS CFX. Рассчитанные поверхностные скорости качественно совпадают с экспериментальными (см. рис. 4), диаграммы носят схожий характер, однако общий уровень рассчитанных скоростей оказывается несколько завышенным по сравнению со скоростями, определенными экспериментально.

Авторами статьи [4] были получены оптические картинки течения в межлопаточном канале, на основе которых рассчитывались

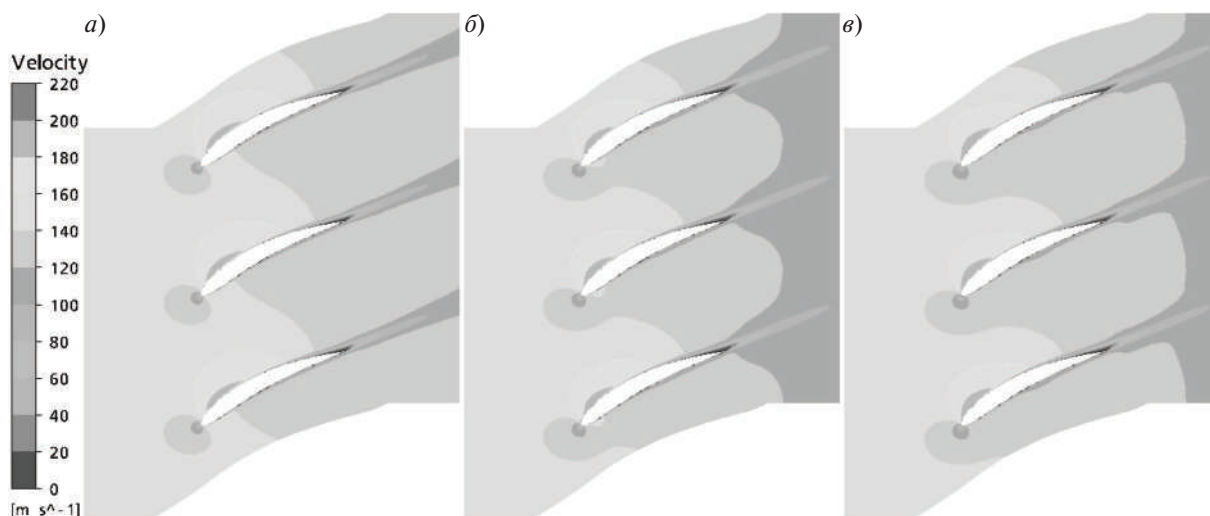


Рис. 3. Поля скоростей при углах атаки i , равных $-2,5$ (а), 0 (б) и $2,5$ (в)



значения коэффициента скорости. С помощью инструментов постпроцессора программы ANSYS данный эксперимент проводился численно. На рис. 5 сопоставлены изменения коэффициента скорости, полученные экспериментально и в результате расчета по программе ANSYS CFX.

В постпроцессоре программы ANSYS CFX на каждом из режимов осреднялись параметры потока в контрольных сечениях (они расположены на расстоянии полухорды от входной и выходной кромок профиля) и рассчитывались аэродинамические характеристики решетки профилей. На рис. 6 рассчитанные характеристики решетки профилей сопоставлены с экспериментальными данными.

Зависимости коэффициента потерь от угла атаки, рассчитанные по экспериментальным данным и данным ANSYS CFX (high-Re), носят схожий характер, однако численно существенно отличаются друг от друга на всех режимах, включая расчетный. Рассчитанные и определенные экспериментально углы поворота потока и углы отставания потока неплохо соотносятся между собой, за исключением режимов больших положительных углов атаки (когда угол поворота потока по данным ANSYS CFX продолжает расти, в то время как экспериментальная кривая имеет характерный изгиб).

Завышенное значение коэффициента потерь обусловлено тем, что турбулентное течение в пограничном слое моделировалось

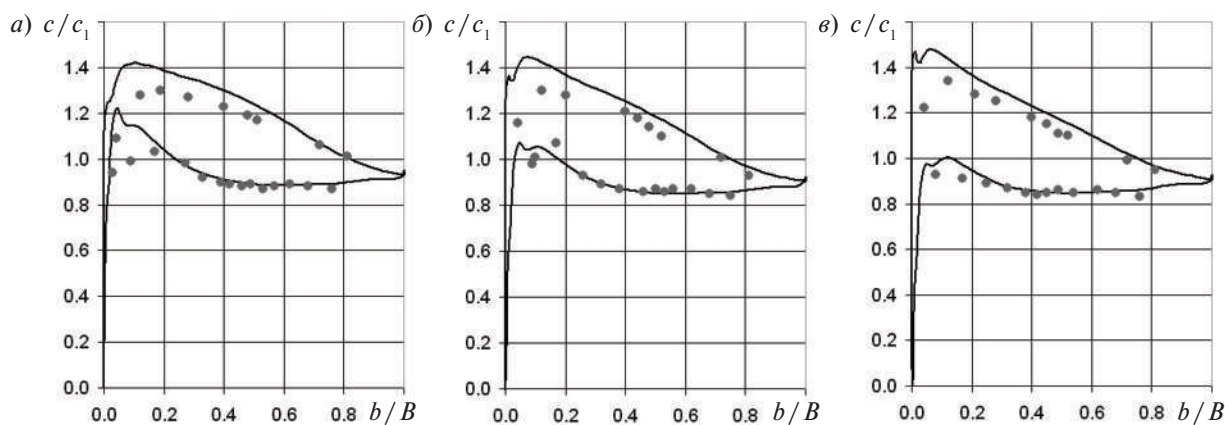


Рис. 4. Диаграммы поверхностных скоростей по профилям: при углах атаки $-2,5$ (а), 0 (б) и $+2,5$ (в)
• Experiment; — ANSYS CFX

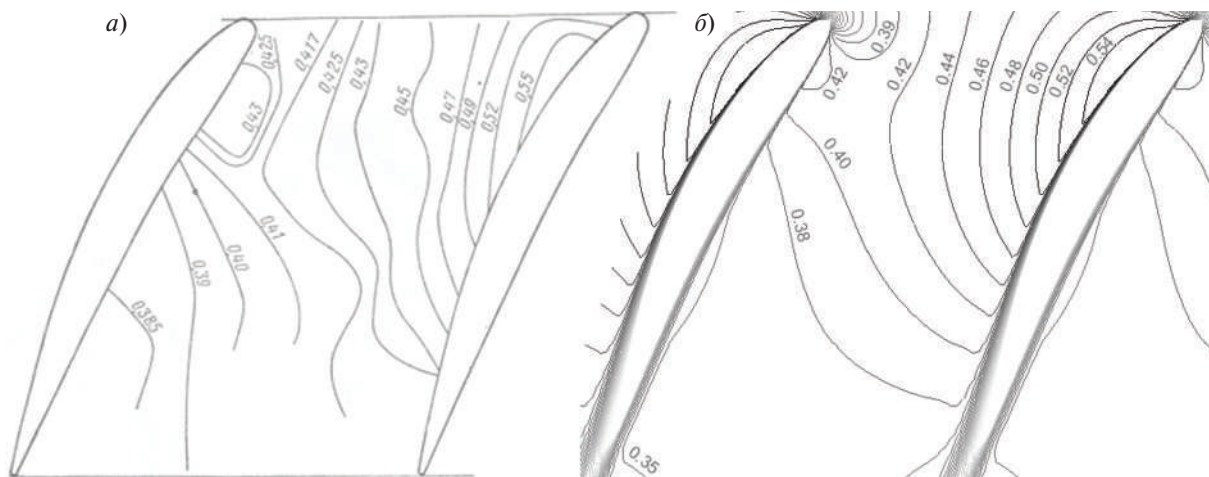


Рис. 5. Изменение коэффициента скорости, полученные экспериментально (б) и численно в программе ANSYS CFX (а)

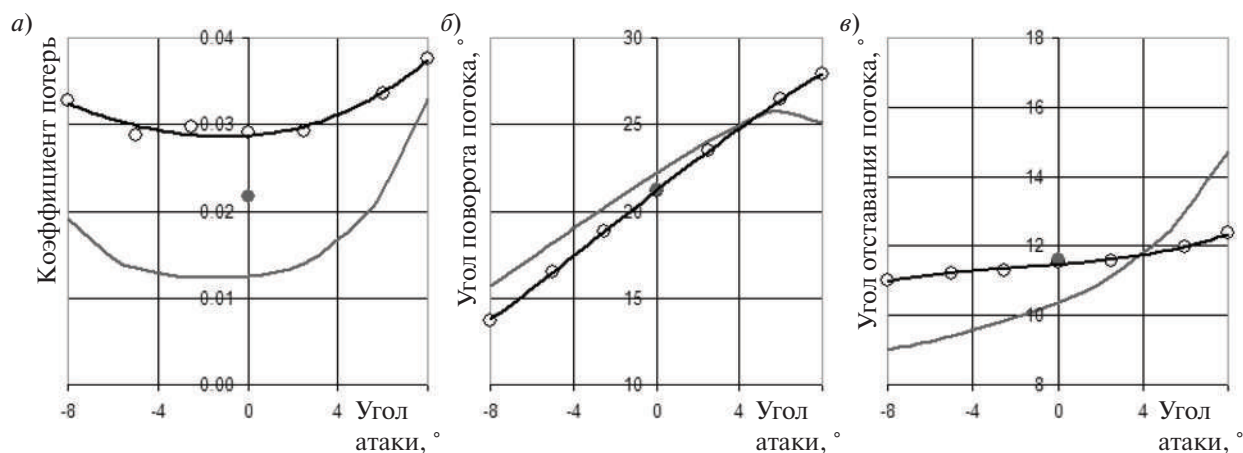


Рис. 6. Аэродинамические характеристики решетки профилей — эксперимент; ○ ANSYS CFX (high-Re); ● ANSYS CFX (low-Re)

высокорейнольдсовым методом (The High-Reynolds-Number Method), который не моделирует всю структуру пограничного слоя, а использует эмпирические зависимости, описывающие течение вблизи стенки. Основное достоинство метода заключается в том, что расчет можно производить на относительно грубой и экономной с точки зрения вычислительных ресурсов и общего времени расчета сетке. С другой стороны, расчет течения высокорейнольдсовым методом, а следовательно, и рассчитанные характеристики являются приближенными.

Использование низкорейнольдсового метода (The Low-Reynolds-Number Method) позволяет детально рассчитать течение в пограничном слое. Для проведения расчета этим методом исходная расчетная сетка была перестроена: общее число элементов увеличилось с 300 000 до 1 000 000 (более чем в 3 раза); общее время расчета увеличилось с 12 ч до 60 (в 5 раз). Значение безразмерного расстояния от стенок до 1-го узла расчетной сетки Y^+ стало менее 2,0.

В связи с длительностью расчета был рассчитан только один режим — при нулевом угле атаки. Расчетная точка (low-Re) приведена на характеристиках решетки профилей (см. рис. 6). Обращает на себя внимание снижение коэффициента потерь с 0,029 (high-Re) до 0,022 (low-Re) и его приближение к значению, полученному экспериментально (0,011).

Проведенные исследования показали, что ANSYS CFX — эффективная программа для моделирования течения в плоской компрессорной решетке. Картины течения, полученные в результате расчета, совпадают с картинами, определенными оптическим методом на экспериментальном стенде. Обращает на себя внимание отклонение рассчитанных характеристик от полученных экспериментально. В дальнейшем планируется устранить эту проблему, рассчитывая течение только низкорейнольдсовым способом на расчетных сетках со значением Y^+ не более 1,0.

Получение коэффициентов потерь, сопоставимых с экспериментальными значениями, позволит провести численное исследование течения в плоских решетках при различных числах Маха и перейти к исследованию транс- и сверхзвукового течения. Заключительным этапом работы станет разработка методических рекомендаций, которыми необходимо пользоваться при постановке численного эксперимента в программе ANSYS CFX применительно к плоским компрессорным решеткам и венцам осевого компрессора.

Авторы выражают благодарность коллективу учебно-научно-инновационного центра наукоемких компьютерных технологий и лично руководителю центра проф. А.И. Боровкову за помощь при проведении численного моделирования плоской компрессорной решетки.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gallus, H.E.** Recent Research Work on Turbomachinery Flow [Text] / H.E. Gallus; Yokohama International Gas Turbine Congress. — Yokohama, 1995.
2. **Гамбургер, Д.М.** Численное моделирование течения вязкого газа в центробежной компрессорной ступени: методика и результаты [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д.М. Гамбургер. — СПб., 2009.
3. **Галаев, С.А.** Численное моделирование течения вязкого газа в решетках осевых турбомашин: методика и результаты применения современных программных средств [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.А. Галаев. — СПб., 2006.
4. **Бунимович, А.И.** Аэродинамические характеристики плоских компрессорных решеток при большой дозвуковой скорости [Текст] / А.И. Бунимович, А.А. Святогоров // Лопаточные машины и струйные аппараты [сб. статей]. — Вып. 2. — М.: Машиностроение, 1967. — С. 5–35.
5. **ANSYS Inc.**, ANSYS CFX 11.0 «Users Manual» [Text]. — 2007.
6. **Menter, F.R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F.R. Menter // AIAA-Journal. 1994. — 32(8). — P. 1598–1605.
7. **Галеркин, Ю.Б.** Анализ течения в центробежных компрессорных ступенях методами вычислительной гидрогазодинамики [Текст] / Ю.Б. Галеркин, Д.М. Гамбургер, А.А. Епифанов; СПбГПУ. — Компрессорная техника и пневматика. — 2009. № 3.
8. **Menter, F.R.** CFX Technical Memorandum: CFX-VAL10/0602 [Text] / F.R. Menter. — 2002.
9. Турбокомпрессоры [Текст]: учеб. пособие / Ю.Б. Галеркин. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.

УДК 53.06:09, 67.08

С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Хранение и утилизация нефтесодержащих отходов (НСО) сегодня переросли в настоящую экологическую проблему и являются очень дорогостоящими. Такие отходы представляют собой многокомпонентные устойчивые физико-химические системы, в которых соотношение нефтепродуктов и воды колеблется в очень широких пределах: углеводороды составляют 5–90 %, вода — 1–52 %. Плотность их изменяется в пределах 870–1700 кг/м³. Большое число жидкофазных нефтесодержащих сред относятся ко второму классу наиболее опасных отходов (масла, эмульсии, нефтешламы), образующих при низкотемпературном воздействии продукты опаснейших классов — галоидированные диоксины и диоксиноподобные вещества. По этой причине существующие методы утилизации и обезвреживания НСО зачастую экономически и экологически неэффективны,

поскольку полное обезвреживание достигается лишь термической обработкой, требующей дополнительных мер по обеспечению безопасности производства и выбросов в окружающую среду.

В предлагаемой статье представлена эффективная, экономичная и позволяющая организовать безотходный процесс обезвреживания углеводородных соединений технология, суть которой заключается в газификации и деструкции в низкотемпературной плазменной струе органосодержащей эмульсии. Применение плазменных технологий их переработки обеспечивает температурные режимы, приводящие к необратимому разрушению галоидированных диоксинов, но требует оптимизации технологий по параметрам энергоэффективности и безопасности. Конечным продуктом такой технологии являются экологически безопасные газовые

выбросы и технологически возвратные продукты в виде тепла и слабых кислотных растворов сернистых и хлористых компонент утилизируемого сырья.

Для обезвреживания жидкофазных НСО предлагается использовать оригинальную методику высокотемпературного пиролиза, когда отходы вводятся прямо в плазменную дугу. Плазмотрон (ПТ) — генератор низкотемпературной (от 2000 до 10000 К) плазмы — это основной элемент технологической схемы, представленной на рис. 1.

Система подготовки и подачи плазмообразующего газа (ПОГ — воздух) состоит из редуктора 1, в котором устанавливается определенное давление воздуха, нагнетаемого компрессором 3. По гибким шлангам воздух, пройдя через влагомаслоотделитель 2, поступает в плазмотрон 6.

Эффективное обезвреживание нефтесодержащих отходов требует предварительной подготовки, заключающейся в доведении их параметров (средняя плотность, теплоемкость, теплота парообразования, вязкость) до требуемых значений. Подготовка осуществляется посредством разбавления нефтепродуктов водой и образования устойчивой эмульсии, отвечающей требуемым характеристикам. Эмульгирование осуществляется методом барботаж. Барботер 11 через герметично закрывающуюся крышку наполняется водой и НСО. Барботер представ-

ляет собой расположенные по дну аппарата трубы с отверстиями, с помощью которых через слой обрабатываемой жидкости осуществляется барботаж газа с помощью компрессора 9, управляемого вентилем 10. Пузырьки газа увлекают за собой вверх по трубе жидкость, находящуюся в сосуде, которая затем опускается вниз в кольцевом пространстве между трубой и стенками аппарата, обеспечивая циркуляционное перемешивание жидкости. По истечении некоторого времени образуется достаточно устойчивая эмульсия, не расслаивающаяся в продолжение как минимум 2 мин (при обезвреживании нефтепродуктов в плазмохимическом реакторе (ПХР) они должны находиться в эмульгированном состоянии менее 1 мин). При помощи регулирующего клапана 12 создается необходимое давление для подачи эмульсии в ПХР 7.

Процессы термической деструкции происходят в объеме ПХР (рис. 2), обеспечивающего одновременно и режим водоземulsionного испарения жидкофазных отходов, поступающих в плазмотрон после необходимой стадии предварительной подготовки. Принцип работы реактора заключается в следующем: пары нефтешламов, подлежащие утилизации, подаются в змеевик, плотно прилегающий к внутренней поверхности реактора, обогреваемой нагревательными элементами. В нижней части змеевика происходят нагрев и испарение,

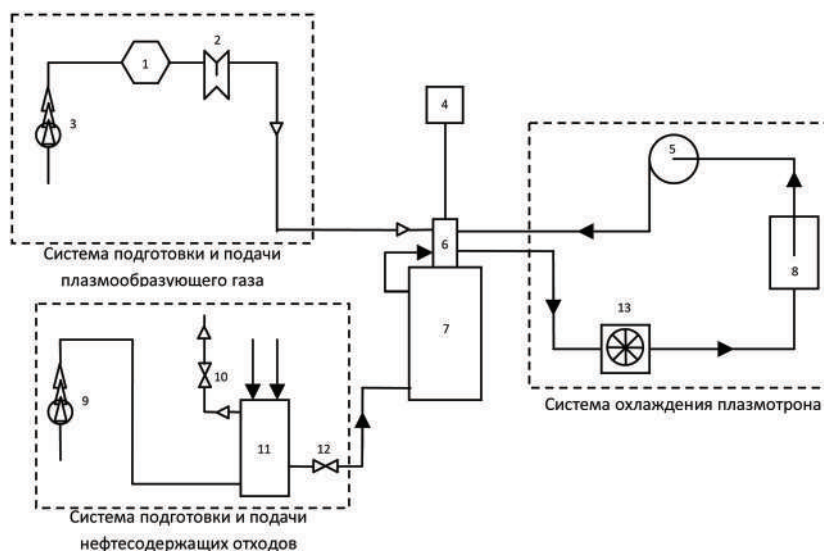


Рис. 1. Технологическая схема плазменного обезвреживания жидкофазных отходов



а в верхней — перегрев паров (чтобы избежать последующей конденсации). Перегретые пары направляются в плазмотрон в качестве плазмообразующего газа, где происходит их разложение в одну стадию при температурах не менее 1500°C , что, в свою очередь, исключает образование вредных, токсичных органических соединений (диоксинов и т. п.).

Особенность данного процесса состоит в том, что утилизация нефтяных отходов происходит в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы факельного типа. При таком сжигании паров эмульсии интенсифицируется горение топлива. Это обеспечивается использованием кислорода и водорода, образующихся при частичной термической диссоциации воды в зоне горения и многократным дроблением органических микрокапель в результате тепловых микровзрывов, увеличивающих поверхность контакта органики с окислителем. В результате происходит более полное сгорание отходов, исключается химический и механический недожог. В целом это приводит к некоторому снижению коррозионных процессов, уменьшению отложений на поверхностях нагрева и повышению КПД реактора. Повышение эффективности деструкции и КПД процесса достигается также за счет применения оригинальной технологии рекуперативного теплообмена в системе «плазмотрон — реактор — система подготовки сырья для пироплазмы», когда образующийся нагретый газ после плазмотрона направляется внутрь плазмохимического реактора, где производит дополнительный нагрев

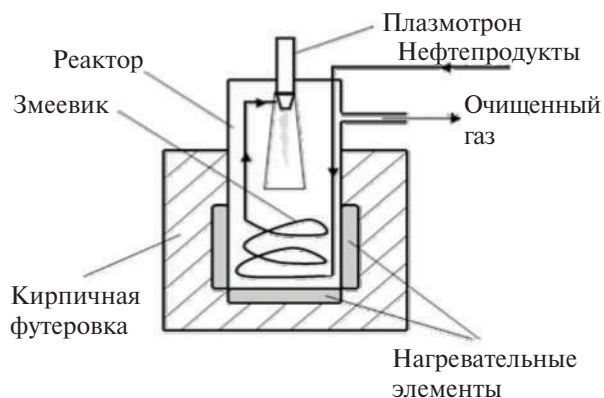


Рис. 2. Плазмохимический реактор обезвреживания нефтесодержащих отходов

змеевика. Обезвреженные газы при температуре 70°C через газоход удаляются в атмосферу.

Ввиду того что в процессе работы плазмотрона происходит образование факела с температурой $2000\text{--}5000^{\circ}\text{C}$, требуется его непрерывное охлаждение не проводящей электричество дистиллированной водой. Насос 5 (рис. 1) подает воду из емкости 8 в охлаждающую рубашку плазмотрона. Затем эта вода поступает через радиатор 13, охлаждаемый вентилятором, обратно в емкость 8. Замкнутая система водяного охлаждения обеспечивает минимальный расход воды и возможность использования данной установки в не обеспеченных водой местах.

Оптимальные режимы работы установки и характеристики эмульсии были рассчитаны и эмпирически определены в ходе экспериментов. В качестве жидких органических отходов использовались трансформаторное масло, отработанное автомобильное масло, различные негорючие нефтешламы.

На первой стадии экспериментов было определено давление воздуха предварительного барботажа. Устанавливалось определенное давление воздуха, после чего барботаж 50 % эмульсии проводился в течение 1 мин. Затем визуально определялся момент расслоения и при помощи секундомера измерялось время расслоения с погрешностью до 30 с, обусловленной неравномерным расслоением эмульсии в объеме. Как видно из графика (рис. 3), при давлении воздуха выше 0,3 ат время расслоения эмульсии повышается незначительно, следовательно, для большей эффективности

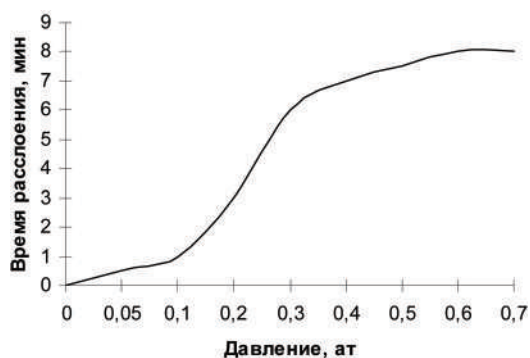


Рис. 3. Определение зависимости времени расслоения эмульсии от давления воздуха, подаваемого в барботер

нужно использовать воздух при давлении около 0,3 ат. При этом нефтешлам находится в эмульгированном состоянии не менее 6 мин. Этого времени достаточно для его обезвреживания.

Для определения оптимальной продолжительности предварительного барботажа использовалась 50%-я эмульсия при давлении воздуха 0,3 ат. Время замерялось с помощью секундомера. Оптимальная продолжительность предварительного барботажа составила 1–1,3 мин (рис. 4). При этом эмульсия не расслаивается 6–7 мин.

Для определения зависимости интенсивности парообразования от кратности разбавления нефтешлама и скорости его подачи в реактор, разогретый до 300 °С, при различных давлениях подавались разные эмульсии. При малых расходах эмульсии испарение происходило постоянно. При больших расходах замерялось время от момента начала парообразования до его прекращения вследствие остывания реактора. При дальнейшем увеличении скорости подачи эмульсии ($V_0 > 800$ мл/мин) процесс испарения не происходит, так как продолжительность нагрева эмульсии недостаточна для ее испарения (табл. 1).

При остановке подачи эмульсии реактор нагревается до исходной температуры за 4 мин. Таким образом, можно рассчитать расход нефтешлама за смену (8 ч):

$$Q_n = Q_0 n (480 - 4k) \cdot 10^{-3},$$

где Q_n — расход нефтешлама за смену, л; Q_0 — расход эмульсии, мл/мин; n — кратность раз-

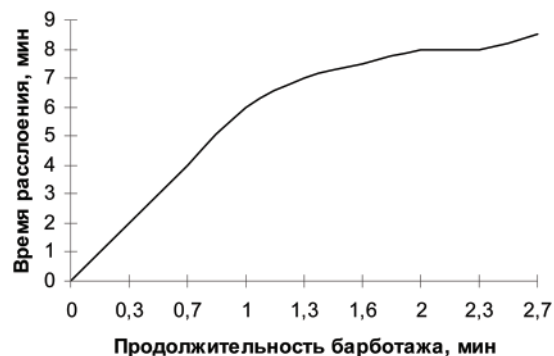


Рис. 4. Определение оптимальной продолжительности предварительного барботажа

бавления; $480 = 8 \cdot 60$, мин в смену; 4 — время остановки, мин; k — количество остановок в смену, $k = 480/(t + 4)$; t — время работы реактора до прекращения парообразования.

Из табл. 2 видно, что при малой скорости пропускания эмульсии (до 300 мл/мин) разбавление нефтешлама негативно влияет на эффективность обезвреживания, однако при больших расходах разбавление необходимо. Наибольшая эффективность достигается при концентрации нефтешлама 50 % и скорости подачи эмульсии 600 мл/мин. При таких параметрах можно обезвредить свыше 70 л нефтешлама за одну смену.

Ввиду того что полной однородности эмульсии добиться невозможно, для определения ее объемной скорости вместо использования расходомеров лучше определять зависимость объемной скорости эмульсии от давления воздуха в барботере, при этом регулировать скорость

Таблица 1

Время парообразования

Скорость подачи нефтешлама, мл/мин	Время парообразования, мин, при кратности разбавления нефтешлама (нефтешлам / эмульсия)							
	1	0,75	0,66	0,5	0,33	0,25	0,1	0
100	Пост.	Пост.	Пост.	Пост.	Пост.	Пост.	Пост.	Пост.
200	3	5	6	7	»	»	»	»
300	2	3	4	8	»	»	»	»
400	1	2	3	6	13	19	»	»
500	0	1	2	4	9	13	18	21
600	0	0	1,5	4	7	9	10	10
700	0	0	0	2	4,5	6	10	10
800	0	0	0	0	0	3	4	4

Таблица 2

Производительность процесса обезвреживания нефтешлама

Скорость подачи нефтешлама, мл/мин	Производительность, л/смен, при кратности разбавления нефтешлама (нефтешлам/эмульсия)							
	1	0,75	0,66	0,5	0,33	0,25	0,1	0
100	48,00	36,00	31,68	24,00	15,84	12,00	4,80	0,00
200	41,14	40,00	38,02	30,55	31,68	24,00	9,60	0,00
300	48,00	46,29	47,52	48,00	47,52	36,00	14,40	0,00
400	38,40	48,00	54,31	57,60	48,45	39,65	19,20	0,00
500	0,00	36,00	52,80	60,00	54,83	45,88	19,64	0,00
600	0,00	0,00	51,84	72,00	60,48	49,85	20,57	0,00
700	0,00	0,00	0,00	56,00	58,70	50,40	24,00	0,00
800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,14	19,20	0,00

подачи эмульсии можно по показаниям манометра.

Опыт необходимо проводить при нагретом реакторе, так как в противном случае полученные данные не будут соответствовать действительности (если пропускать эмульсию через змеевик, минуя стадию испарения, расход будет больше, чем с испарением). Это несоответствие обусловлено тем, что при нагретом реакторе дополнительное давление будут создавать пары в верхней части змеевика, продавливая эмульсию, находящуюся в нижней части, обратно в барботер. Чтобы определить объем эмульсии, прошедшей через змеевик, пары нефтепродуктов направлялись в холодильник Либиха. Там они конденсировались и поступали в мерный цилиндр.

Зная диаметр реактора, количество витков и внутренний диаметр змеевика, можно рассчитать время пребывания эмульсии в змеевике $\tau = L/V_3$, где длина змеевика $L = k\pi D$, k — количество витков; D — диаметр реактора; V_3 — линейная скорость эмульсии, $V_3 = Q_3 \cdot 1000 / (60 \cdot S)$; Q_3 — расход эмульсии, мл/мин; S — площадь поперечного сечения змеевика, мм².

Таблица 3

Определение объемной скорости эмульсии

Показатель	Значение показателя							
Давление, ат	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	
Расход эмульсии, мл/мин	0	120	220	350	450	600	800	
Время, с	0	156	85	54	42	31	23	

На основании полученных данных можно определить оптимальную кратность разбавления нефтешлама и выбрать режим работы установки. Наибольшая эффективность обезвреживания достигается при разбавлении НСО в 2 раза. При этом предварительный барботаж необходимо проводить при давлении 0,3 ат в течение 1–1,3 мин. Эмульсию нужно подавать в змеевик со скоростью 600 мл/мин под давлением 1,2 ат. При таких параметрах процесса эмульсия находится в реакторе в течение примерно 30 с, и можно будет обезвредить свыше 70 л НСО за смену.

Ввиду сложности процессов, происходящих в плазменной среде, точный расчет теплового баланса установки не представляется возможным. Кроме того, конструкция термического реактора, используемого в данной установке, не имеет аналогов, следовательно, для него не разработаны методики расчета. Однако на основании проведенных экспериментов можно оценить КПД термического реактора (по теплоте $N_{эм}$, поглощаемой эмульсией в единицу времени, и суммарной мощности нагревательных элементов и плазмотрона N_n):

$$\text{КПД} = \frac{N_{эм}}{N_n} \cdot 100 \cong 70 \%,$$

свидетельствующий о высокой эффективности его работы.

Оптимизация параметров работы плазмохимического реактора позволяет произвести расчеты и параметров функционирования вспомогательного оборудования. При определении

характеристик барботера рассчитывают необходимое давление и расход газа. Вычисления по известным методикам [1] позволяют произвести оценку необходимых параметров барботажа. Расчеты дают значения средней плотности жидкости $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$, давления $p = 1,2 \times 10^5 \text{ Па}$ и объемного расхода газа $V \approx 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, необходимых для эффективного перемешивания нефтешламов в барботере.

Рассмотрев подробно отдельные элементы технологической цепи, обеспечивающей функционирование данной технологии, для описания взаимосвязи соответствующих процессов прибегнем к структурно-функциональному методу научных исследований [4]. В основе данного метода лежит представление технологической структуры как иерархической последовательности взаимосвязанных информационных устройств, что позволяет рассматривать их как эквивалентные в информационном смысле и оптимизировать, используя принципы кибернетического управления. Разделение материи на объекты воздействия (масса, энергия и информация) и средства воздействия — материально-энергетические комплексы — позволяет выделить процессы, обеспечивающие движение материи между средствами воздействия. Применительно к технологиям плазменной обработки материалов данная схема приобретает вид, представленный на рис. 5.

Обратим внимание на отдельные блоки этой схемы, рассмотрев их с точки зрения влияния

на выбор оптимального режима функционирования технологии в целом. В качестве объектов воздействия в любой низкотемпературной плазменной технологии выступают электро-энергия и вещество, поступающее в реакторы и плазмотрон в различных фазовых состояниях (плазмообразующий газ, охлаждающая вода, парогазовые смеси) и с разной, но ненулевой энергией (под давлением). На стабильность технологического режима может повлиять изменение сорта ПОГ, мощности и типа плазмотрона, размеров ПХР. Получение и передача материалов и энергии происходит по технологическим каналам от соответствующих систем, включенных в общую функциональную схему. Эти процессы требуют внимания к составу и параметрам утилизируемого и плазмообразующего газов, контроля отходящих газов из ПХР, обеспечения мер защиты от шума и излучения, характерных для работы плазмотронов.

В реакторах осуществляются процессы обработки и взаимного превращения материалов и энергии. На данной стадии полезно рассмотреть условия энергетического баланса по известным методикам расчета КПД плазмогенератора и реакторов в целом. С точки зрения экологии и безопасности плазменных процессов полезно оценить не только термические потери, но и долю энергии, переходящей в энергию акустических колебаний и радиационного излучения, которые вызывают негативный эффект воздействия на рабочий персонал. Учет

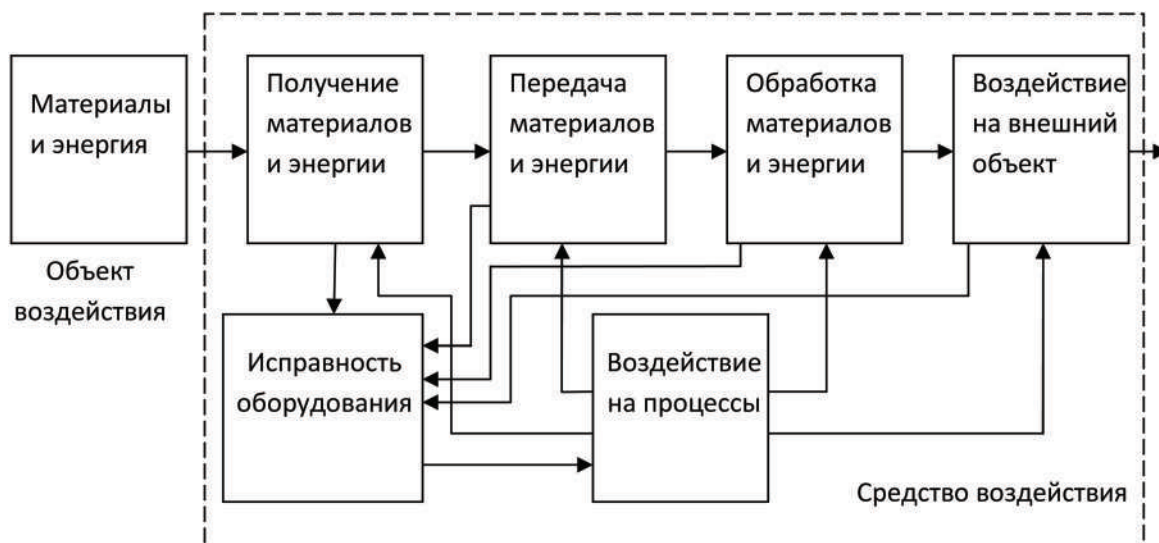


Рис. 5. Функциональная схема установки по плазменной утилизации нефтесодержащих отходов



влияния на внешний объект в данной технологии подразумевает внимание к вопросам безопасности и экологическим аспектам функционирования — эффективности очистки и негативным факторам, сопутствующим плазмохимическим процессам. Устойчивая работа всей технологической схемы невозможна без соответствующего воздействия на ее отдельные элементы, обеспечивающего контроль и оптимизацию технологических и физических параметров процессов, а также исправность используемого оборудования. Такое воздействие должно осуществляться как в процессе работы (путем автоматизации систем управления и контроля, введения в систему элементов решающей обратной связи — регуляторов), так и на стадии предварительного теоретического анализа и проектирования технологии.

С учетом требований, следующих из проведенного анализа, можно заключить, что предлагаемая методика обезвреживания жидких отходов оптимизирована по параметрам технологии, она использует конструктивные авторские наработки в области безопасности применения плазменных технологий (оптимизирование по акустическим [3] и электроэнергетическим параметрам). Помимо использования систем подготовки плазмообразующего газа и охлаждения плазмотрона компоновка данной установки по обезвреживанию требует использования источника питания, обеспечивающего непрерывный (в процессе поступления паров эмульсии в плазмотрон) режим горения плазменной дуги. Оптимизация технологии производилась с применением оригинальных плазмотронов [4] (мощностью до 20 кВт) и источников питания (60 кВт), разработанных НПП «Полигон» (г. Екатеринбург). Установка по обезвреживанию может включать в себя также систему очистки и утилизации отходящих газов (циклон для удаления крупных фракций и мокрый скруббер для связывания токсичных выбросов в кислотном растворе), она снабжена датчиками, обеспечивающими контроль энергетиче-

ских (вольт-амперные характеристики — I , U , температура T) и газодинамических (расход Q , компонентный состав в процентах) параметров процесса. Для поддержания значений температуры реактора от 230 до 300 °С и давления нефтепродуктов в трубопроводе от 1,2 до 1,3 атм при проектировании и эксплуатации данной установки было выбрано и установлено оборудование для автоматического регулирования этих параметров. Предложенная технологическая схема обеспечивает соответствующий экологическим требованиям физико-химический состав продуктов обезвреживания. При необходимости многостадийной плазменной деструкции возможно применение плазмотронов на стадии дожигания отходящих газов. Эффективность данного метода обезвреживания подтверждают и оценки себестоимости обезвреженного продукта, составляющие 5–6 руб./кг отходов при доле энергетических затрат около 30 % в общей доле расходов.

По сравнению с другими известными методами переработки жидкофазных нефтяных отходов метод плазменного обезвреживания обладает рядом существенных преимуществ, к которым можно отнести: малые габариты и компактность установок; высокую удельную производительность; относительно низкие затраты электроэнергии; возможность утилизации выделяющегося тепла; низкое содержание вредных веществ в отходящих газах; отсутствие отходов, требующих складирования или специального захоронения; замкнутость системы водяного охлаждения, обеспечивающая возможность использования данной установки в не обеспеченных водой местах.

Реализация данного метода плазменного обезвреживания жидкофазных нефтесодержащих отходов будет способствовать решению целого комплекса проблем, стоящих перед химическими, нефтеперерабатывающими и нефтедобывающими отраслями промышленности и вовлеченным в эти отрасли населением близлежащих городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. — М.: Химия, 1971. — 784 с.
2. Журавлев, В.Ф. Структурно-функциональный метод изучения технических объектов и исследований [Текст] / В.Ф. Журавлев, В.Я. Шевченко. — Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2007. — 90 с.
3. Анахов, С.В. Сравнительный анализ газодинамических факторов шумоизлучения плазмотронов [Текст] / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Сварочное производство. — 2005. — № 1. — С. 31–36.
4. Пат. 67909 Российская Федерация. Полезная модель «Плазмотрон» [Текст] / Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Шакуров С.А., Тетюков А.Г.; заявл. 22.05.07.

УДК 621,438,082

Л.А. Данилец

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ПРОБЫ

Полнота сгорания — одна из важнейших характеристик камеры сгорания в газотурбинных установках, во-первых, из-за связанных с ней непроизводственных потерь тепла, а во-вторых, из-за вредных выбросов в атмосферу, особенно NO_x . В связи с этим в номинальном режиме работы требуется обеспечить полноту сгорания топлива не ниже 0,999. Для газотурбинных установок, использующих в качестве топлива газ, в номинальном режиме работы величина полноты сгорания топлива близка к единице, что увеличивает требования к точности ее определения.

Существуют различные подходы к определению полноты сгорания топлива: анализ проб, отобранных из тракта за камерой сгорания; оптические методы; газодинамический метод и др. Целесообразность применения той или иной методики обусловлена сферой ее применения. Например, для высокоэнтальпийных установок кратковременного режима оптимальным и, возможно, единственным является газодинамический метод [1].

В статье описана методика определения полноты сгорания газообразного топлива в газотурбинных установках, основанная на анализе

проб; она не требует установки дополнительного оборудования (анализ пробы на предмет установления экологической безопасности в настоящее время обязателен для газотурбинных установок), обеспечивая при этом высокую точность и надежность результатов.

Общие сведения

Полнота сгорания газообразного топлива характеризует тепловую эффективность горения и определяется как отношение тепла, выделившегося при сгорании 1 кг газа Q_{get} , к его низшей теплоте сгорания Q_n :

$$\eta_z = \frac{Q_{\text{get}}}{Q_n}. \quad (1)$$

Неполное использование тепла топлива связано с недожогом и эндотермической реакцией образования оксидов азота NO_x [2].

Разделяют два вида недожога: механический и химический.

Механический недожог — это выбросы негоревших углеводородов. Он связан с областями пониженной температуры, через которые топливный газ проходит не сгорая. В камерах



сгорания такие области обычно образуются в пристенных зонах или появляются в случае погасания части горелок. Данный вид недожога характерен для режимов с обедненной топливно-воздушной смесью на границе срыва пламени.

Химический недожог — это выбросы окиси углерода. Он возникает по двум причинам: из-за незавершенности процессов горения и диссоциации CO_2 за зоной горения.

Незавершенность процессов горения возникает, когда время пребывания топливно-воздушной смеси в зоне горения меньше скорости протекания химических реакций окисления.

Диссоциация CO_2 за зоной горения обусловлена химической нестабильностью продуктов сгорания и протекает при температурах 2200–2400 К. Постепенное охлаждение продуктов сгорания до 1600–1800 К способствует полному окислению оксида углерода до CO_2 , что исключает потери тепла топлива. Резкое охлаждение продуктов сгорания «замораживает» состав газов с сохранением некоторого уровня CO , что приводит к химическому недожогу [3].

Реакция образования оксидов азота происходит с поглощением части теплоты, выделяющейся при сгорании топлива. При температуре в зоне горения выше 1800 К образование NO_x идет по цепному механизму Зельдовича [4]. Следующий по значимости — это механизм образования оксидов азота во фронте пламени, а также механизм образования оксидов азота через N_2O [5].

Описание методики

Основой расчета по предложенной методике служит формула (1). Низшая теплота сгорания топлива Q_n — это справочный параметр для используемого газа, поэтому задача сводится к определению теплоты, выделяющейся в газотурбинной установке при сгорании 1 кг газа Q_{get} .

Теплота Q_{get} определяется как разность между низшей теплотой сгорания топлива Q_n и потерями теплоты, которые возникают в результате недожога и образования NO_x . Потери теплоты определяются методом анализа пробы при помощи газоанализатора. Анализ пробы заключается в определении объемных долей компонентов продуктов сгорания. Полученные газоанализатором объемные доли пере-

водятся в массовые с использованием данных о коэффициенте избытка воздуха, составе газа и воздуха. Кроме того, учитывается осушка пробы в газоанализаторе, поскольку современные оптические газоанализаторы предполагают обязательную осушку пробы. Рассчитанные массовые доли используются для определения потерь теплоты.

Чтобы иметь возможность прогнозировать величину полноты сгорания топлива при известном коэффициенте избытка воздуха, составе газа и воздуха, ожидаемом уровне недожога и эмиссии NO_x , рассмотрена методика расчетного определения массовых долей O_2 и CO_2 без необходимости их измерений.

Оценена величина погрешности расчета по предложенной методике с целью проверки достаточной точности определения полноты сгорания топлива на режимах с $\eta_c > 0,999$.

Достоинства предложенной методики

Предложенная методика, основанная на методе анализа пробы, характеризуется следующим:

она учитывает все описанные виды механического и химического недожога, а также эндотермическую реакцию образования оксидов азота NO_x ;

принимает в расчет широкий спектр влияющих на полноту сгорания параметров, таких как состав газа и воздуха, а также газозоо-душной смеси;

полностью основана на теории газовых смесей;

в газотурбинных установках позволяет рассчитывать полноту сгорания топлива без установки дополнительного оборудования;

позволяет учитывать осушку пробы, которая производится в современных оптических газоанализаторах, таких как МАГ, МГА и др.

Описание алгоритма вычислений по предложенной методике

Рассмотрим алгоритм вычислений по предложенной методике, основанной на методе анализа пробы. Расчет проводится с использованием результатов измерений и справочных параметров.

Результаты измерений: объемные доли продуктов сгорания r_i , где номера компонентов i

соответствуют: 1 — CH_4 ; 2 — CO ; 3 — NO_x ; 4 — CO_2 ; 5 — O_2 ; коэффициент избытка воздуха α_{Σ} .

Справочные параметры:

массовые доли компонентов газа g_{fi} , где номера компонентов i отвечают следующему: 1 — CH_4 ; 2 — C_2H_6 ; 3 — C_3H_8 ; 4 — C_4H_{10} ; 5 — C_5H_{12} ; 6 — C_6H_{14} ; 7 — CO_2 ; 8 — N_2 ; 9 — O_2 ;

низшая теплота сгорания топлива Q_n , принимаемая по сертификату или определяемая в соответствии с ГОСТ [6], кДж/кг;

массовые доли компонентов воздуха: g_{aN_2} — N_2 ; g_{aO_2} — O_2 ; g_{aCO_2} — CO_2 ; $g_{\text{aH}_2\text{O}}$ — H_2O ; g_{aAr} — Ar ; молярные массы μ_i , кг/кмоль, и плотности ρ_i , кг/м³, компонентов продуктов сгорания, где номера компонентов i : 1 — CH_4 ; 2 — CO ; 3 — NO_x ; 4 — CO_2 ; 5 — O_2 ; 6 — H_2O ; 7 — N_2 ; 8 — Ar ;

стехиометрические коэффициенты для компонентов природного газа, представленные в таблице.

Продуктом сгорания газа является вода. Для определения массы воды, которая образуется при полном сгорании 1 кг газа $G_{f\text{H}_2\text{O}}$, используем массы пара m , образующиеся при полном сгорании 1 кг данного компонента газа (см. таблицу). Величины m определяются из уравнений стехиометрии горения соответствующих компонентов газа.

Массы пара, образовавшиеся при полном сгорании 1 кг газа по его компонентам, определяются выражением

$$G_{f\text{H}_2\text{O}_i} = g_{fi} m_i. \quad (2)$$

Масса пара, которая образуется при полном сгорании 1 кг газа, равна

$$G_{f\text{H}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^6 G_{f\text{H}_2\text{O}_i}. \quad (3)$$

Коэффициент стехиометрии L_0 может быть определен по формуле

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^6 N_{(\text{O}_2/\text{CH})_i} g_{fi} - g_{f9}}{g_{\text{aO}_2}}, \quad (4)$$

Величины $G_{f\text{H}_2\text{O}}$ и L_0 зависят только от состава топлива, поэтому их целесообразно определять лишь один раз перед началом измерений.

Расчет по формуле (1) производится с использованием выделившейся при сгорании топлива теплоты, которая определяется из соотношения

$$Q_{\text{get}} = Q_n - G_{\text{CH}_4} Q_{\text{CH}_4} - G_{\text{CO}} Q_{\text{CO}} - G_{\text{NO}_x} Q_{\text{NO}_x}, \quad (5)$$

где G_{CH_4} — масса метана CH_4 в продуктах сгорания на 1 кг топлива, кг/кг; G_{CO} — масса угарного газа CO в продуктах сгорания на 1 кг топлива, кг/кг; G_{NO_x} — масса оксидов азота NO_x в продуктах сгорания, на 1 кг топлива, кг/кг; $Q_{\text{CH}_4} = 50036$ кДж/кг — теплота сгорания 1 кг CH_4 ; $Q_{\text{NO}_x} = 3014$ кДж/кг — теплота, затрачиваемая на образование 1 кг NO_x ; $Q_{\text{CO}} = 10100$ кДж/кг — теплота сгорания 1 кг CO .

Для расчета по этой формуле необходимо знать массовые доли компонентов продуктов сгорания, которые вычисляются из объемных долей, измеренных газоанализатором. Чтобы перевести объемные доли в массовые, требуется знать плотность продуктов сгорания. Для определения этой плотности применим метод последовательных приближений. В качестве начального значения плотности примем $\rho_{\text{см}} = 1,3$ кг/м³.

Определим массовые доли компонентов продуктов сгорания по следующим формулам:

Стехиометрические коэффициенты для природного газа, кг/кг

Компонента газа	m_i	$N_{(\text{O}_2/\text{CH})_i}$	$N_{(\text{CO}_2/\text{CH})_i}$	$N_{(\text{CH}/\text{CO})_i}$	$N_{(\text{O}_2/\text{CO})_i}$
CH_4	2,246	3,989	2,743	1,746	2,285
C_2H_6	1,797	3,725	2,927	1,863	1,999
C_3H_8	1,634	3,628	2,994	1,906	1,904
C_4H_{10}	1,550	3,578	3,029	1,928	1,856
C_5H_{12}	1,498	3,548	3,05	1,941	1,828
C_6H_{14}	1,463	3,527	3,064	1,95	1,809

$$g_{H_2O} = \frac{\frac{G_{air} \cdot g_{aH_2O} + G_{fH_2O}}{G_{sm}} - \frac{r_1 \rho_1}{\rho_{cm}} G_{fH_2O}}{1 - \frac{r_1 \rho_1}{\rho_{cm}} G_{fH_2O}}; \quad (6)$$

$$g_i = \frac{r_i \rho_i (1 - g_{H_2O})}{\rho_{cm}} \quad (i = 1, \dots, 5), \quad (7)$$

где $G_{cm} = \alpha_{\Sigma} L_0 + 1$ — масса продуктов сгорания на 1 кг топлива; $G_{air} = \alpha_{\Sigma} L_0$ — масса воздуха на 1 кг топлива в газозвоздушной смеси.

Газоанализатор производит измерение из осушенной пробы. Для перевода измеренных объемных долей в действительную пробу, содержащую воду, производится умножение компонентов на величину $(1 - g_{H_2O})$.

Определим массовую долю азота, используя соотношение стехиометрии:

$$g_7 = \frac{\left(\frac{G_{air} g_{aN_2}}{1 - g_{aH_2O}} + g_{f8} - 0,466 G_{cm} g_3 \right) (1 - g_{H_2O})}{G_{cm}}, \quad (8)$$

где g_{fN_2} — массовая доля азота в составе топлива; g_{NO} — массовая доля оксида азота в продуктах сгорания.

Определим массовую долю аргона в продуктах сгорания:

$$g_8 = \frac{g_{aAr} G_{air}}{G_{cm}} \frac{1 - g_{H_2O}}{1 - g_{aH_2O}}. \quad (9)$$

Молярную массу продуктов сгорания определим по формуле

$$\mu_{cm} = \frac{1}{\sum_{i=1}^8 \frac{g_i}{\mu_i}}. \quad (10)$$

Массовые доли всех компонентов необходимо знать для определения плотности продуктов сгорания, которая определяется по формуле

$$\rho_{cm_new} = \mu_{cm} \sum_{i=1}^8 \frac{\rho_i g_i}{\mu_i}. \quad (11)$$

Сравниваем значение принятой плотности продуктов сгорания ρ_{cm} с определенной по рас-

чету ρ_{cm_new} . Если различие велико, подставляем новое значение плотности продуктов сгорания и повторяем расчет до достижения равенства по плотности. После завершения изложенных итераций определяем полноту сгорания по формулам (5) и (1).

Расчет массовых долей O_2 и CO_2

В случаях, когда газоанализатор не измеряет доли O_2 и CO_2 или требуется предварительная оценка полноты сгорания топлива без непосредственных измерений, целесообразно по величине α рассчитать недостающие массовые доли. Для этого введем ряд стехиометрических коэффициентов, позволяющих определить эти доли ($N_{(O_2/CH)_i}$, $N_{(CO_2/CH)_i}$, $N_{(CH/CO)_i}$, $N_{(O_2/CO)_i}$). Необходимые коэффициенты представлены в таблице.

Данные коэффициенты были получены из уравнений стехиометрии. Рассмотрим смысл коэффициентов на примере $N_{(O_2/CH)_3}$, равного 3,628 кг/кг. Коэффициент показывает, что для сжигания 1 кг пропана требуется затратить 3,628 кг кислорода. Для произвольного состава природного газа коэффициент $N_{(O_2/CH)}$ определяется следующим образом:

$$N_{(O_2/CH)} = \sum_{i=1}^6 g_{fi} N_{(O_2/CH)_i}. \quad (12)$$

Остальные три коэффициента определяют аналогично.

Определим расход газа, который полностью пошел на образование CO_2 в продуктах сгорания:

$$G_{r_CO_2} = 1 - (g_1 + N_{(CH/CO)} g_2) G_{sm}. \quad (13)$$

Массовые доли кислорода и двуокиси углерода в продуктах сгорания определяются из соотношений

$$g_{O_2} = \frac{A}{G_{sm}}; \quad (14)$$

$$A = g_{aO_2} G_{air} - G_{r_CO_2} N_{(O_2/CH)} - 0,533 g_3 G_{sm} - g_2 N_{(O_2/CO)};$$

$$g_{CO_2} = \frac{G_{r_CO_2} N_{(CO_2/CH)} + g_{aCO_2} G_{air}}{G_{sm}}. \quad (15)$$

Обозначенный подход можно использовать и для решения обратной задачи: рассчитывать α по измеренным концентрациям O_2 и CO_2 .

Оценка погрешностей

Оценим погрешность расчета полноты сгорания топлива по предложенной методике с целью проверки достаточной точности ее определения на режимах с $\eta_z > 0,999$. Для этого зададим погрешности измерения расходов и вредных выбросов, характерные для современного измерительного оборудования:

относительную стандартную неопределенность измерения расходов газа и воздуха — 1,3 %;

абсолютную погрешность измерения концентраций вредных выбросов в диапазоне от 0 до 100 ppm: для NO_x и CH_4 это будет ± 5 ppm, для CO — ± 3 ppm.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений эмиссии вредных выбросов, полученных в ходе стендовых испытаний сегмента кольцевой камеры сгорания газотурбинной установки среднего класса мощности на номинальном режиме нагрузки [7]. Результаты измерений:

компоненты продуктов сгорания: $CH_4 = 0$ ppm, $CO = 2$ ppm, $NO_x = 55$ ppm; $O_2 = 11,9$ %, $CO_2 = 3,7$ %;

суммарный коэффициент избытка воздуха — $\alpha_z = 2,65$.

Объемные доли продуктов сгорания измерялись при помощи газоанализатора МАГ, коэффициент избытка воздуха — при помощи расходомерных участков по воздуху и газу.

Полнота сгорания для данного режима составляет $\eta_z = 0,9998$. Погрешность полноты

сгорания топлива равна $\varepsilon_{\eta} = 0,013$ %. Данная величина погрешности получена по методике определения погрешностей косвенных измерений [8].

Величина погрешности расчета по предложенной методике дает основание утверждать, что полнота сгорания топлива при условии использования современного измерительного оборудования определяется с точностью, достаточной для ее достоверной оценки на режимах с $\eta_z > 0,999$.

Одна из важнейших характеристик работы газотурбинной установки — полнота сгорания топлива, поскольку с ней связаны непроизводительные потери тепла и вредные выбросы в атмосферу, что оказывает влияние на ее КПД и экологическую безопасность работы.

Современные требования к обеспечению полноты сгорания достаточно жесткие: требуется обеспечить полноту сгорания топлива не ниже 0,999. В связи с этим увеличиваются требования к точности ее определения, что ведет к необходимости учета факторов, которыми прежде можно было пренебречь (например, влияние эндотермической реакции образования азота).

Разработана методика расчета полноты сгорания топлива, которая может быть применена в области газотурбинных установок, использующих в качестве топлива природный газ на любых режимах, в том числе и с $\eta_z > 0,999$.

Данная методика может получить дальнейшее развитие путем учета прочих компонентов продуктов сгорания, таких как водород H_2 , этан C_2H_6 и др., а также при разработке методов учета потерь теплоты в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлик, Е.В. Определение газодинамическим способом полноты сгорания в модели с горением [Текст] / Е.В. Орлик, А.В. Старов, В.В. Шумский // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40. — № 4. — С. 23–33.
2. Ивлиев, А.В. О связи между выбросом оксидов азота и полнотой выделения тепла [Текст] / А.В. Ивлиев // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. — 1998. — Вып. 1. — С. 144–145.
3. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр. — М.: Мир, 1989. — 484 с.
4. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении [Текст] / Я.Б. Зельдович, П.А. Солодовников, Д.А. Франк-Каменский. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — С. 27.



5. Постников, А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст] / А.М. Постников; под ред. Е.А. Гриценко; Самарский науч. центр РАН. Самара. — 2002. — 286 с.

6. ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки [Текст].

7. Лебедев, А.С. Результаты стендовых испытаний сегмента натурной кольцевой камеры сгорания ГТЭ-65 [Текст] / А.С. Лебедев, А.Ф. Ведищев, Д.А. Козлов [и др.] // Тяжелое машиностроение. — 2009. — № 3. — С. 1–6.

8. Агапьев, Б.Д. Обработка экспериментальных данных [Текст] / Б.Д. Агапьев, В.Н. Белов, Ф.П. Кесаманлы [и др.]. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. — 84 с.

УДК 004.94

М.А. Кондратьев, Р.И. Ивановский, Л.М. Цыбалова

ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Сохранение и укрепление здоровья населения — важная социально-экономическая проблема, неотъемлемым аспектом которой является снижение инфекционной заболеваемости. В решении этой задачи предупредительные меры имеют ключевое значение. Прогнозирование динамики распространения заболевания позволяет разработать и применить адекватные меры противодействия, обеспечить рациональное использование материальных и людских ресурсов. Информационной основой прогноза в рассматриваемой области служат статистические данные, регулярно получаемые соответствующими структурами.

Качественный прогноз распространения заболевания достижим только на основе адекватных математических моделей. С учетом последних достижений в области математического и имитационного моделирования [1] формирование моделей сложных систем — вполне реализуемая задача.

Проблема моделирования распространения заболеваний решается давно (начало применению математических методов при изучении эпидемий было положено в середине XVII в.). За это время методы моделирования заболеваний многократно совершенствовались, появлялись варианты моделей [2–4], так или иначе отражающие особенности исследуемых процессов, однако сделать вывод, что поставленная задача решена, пока нельзя.

В предлагаемой статье представлен принципиально новый для отечественной практики способ моделирования процессов распространения заболеваний, основанный на агентном подходе при построении моделей сложных процессов и систем [1]. Этот подход, развитый в последнее время, основан на учете множества параллельно протекающих составляющих исследуемого процесса, каждая из которых при моделировании описывается совокупностью детерминированных и случайных параметров, определяющих особенности ее «жизненного цикла». Агентный подход к имитационному моделированию успешно используется и развивается на кафедре распределенных вычислений и компьютерных сетей СПбГПУ.

Проблема моделирования заболеваний имеет явную междисциплинарную специфику, поэтому все работы по созданию агентной модели распространения заболевания ведутся совместно со специалистами ГУ НИИ гриппа РАМН, выступающими в качестве научных консультантов и экспертов в данной предметной области. Работа проводилась при финансовой поддержке в форме гранта Правительства Санкт-Петербурга.

Классические модели эпидемий. Наиболее известный в отечественных кругах метод моделирования эпидемий [2, 5] основан на использовании дифференциальных уравнений. В этих моделях динамика распространения заболевания

описывается системой дифференциальных уравнений, где в качестве переменных состояний выступают числа больных и здоровых людей на моделируемой территории. Решение такой системы уравнений дает уровень инфекционной заболеваемости в каждый момент модельного времени. Данная методология была разработана в 1960-е гг. в СССР академиком О.В. Барояном и профессором Л.А. Рвачевым. Для ее создания использовался метод научной аналогии эпидемического процесса («перенос» возбудителя инфекции от больных к здоровым) процессу «переноса» материи (энергии, импульса и др.), описываемому уравнениями математической физики.

В модели Барояна — Рвачева и в большинстве других моделей такого типа вся популяция на моделируемой территории делится на группы. Обычно выделяют четыре группы людей:

1) Susceptible — здоровые люди, восприимчивые к заболеванию (обозначим их количество S);

2) Exposed — люди, заболевание у которых находится в инкубационном периоде (обозначим их количество E);

3) Infectious — инфекционные больные (обозначим их количество I);

4) Recovered — переболевшие моделируемым заболеванием люди, более к нему не восприимчивые (обозначим их количество R).

Приращение числа людей в каждой из выделенных групп можно описать с помощью следующей системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= -\frac{\lambda}{p(t)} S(t) \int I(t, \tau) d\tau; \\ \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial \tau} &= -\gamma(\tau) E(t, \tau); \\ \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial \tau} &= \gamma(\tau) E(t, \tau) - \delta(\tau) I(t, \tau); \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \int \delta(\tau) I(t, \tau) d\tau,\end{aligned}$$

где t — календарное время развития эпидемии; λ — средняя частота передачи возбудителя от инфицированных больных к чувствительным

индивидам; p — численность популяции; τ — локальное время, прошедшее с момента заражения индивида; $\gamma(\tau)$ — функция развития периода инкубации; $\delta(\tau)$ — функция развития инфекционного периода.

В 1960-е—1970-е гг. модель Барояна—Рвачева была прорывом в области моделирования эпидемий. Модель обладает рядом положительных качеств, позволяющих применять ее и сегодня. Главное достоинство модели — способность достаточно точно отражать некоторые аспекты эпидемии при относительной простоте модели. Благодаря своей простоте, модель может легко быть реализована как в любой системе компьютерной математики, так и на целевом языке программирования. Модель не требует больших вычислительных затрат, и эксперименты с ней могут быть проведены почти на любом персональном компьютере. Несмотря на то что модель Барояна—Рвачева создавалась для моделирования распространения гриппа, методология ее построения может быть использована (и уже была использована) для моделирования распространения большинства инфекционных заболеваний.

Модель Барояна—Рвачева породила целое направление в разработке моделей эпидемий. Назовем это направление классическим, традиционным.

Современные вычислительные комплексы и подходы к моделированию позволяют рассматривать более тонкую структуру исследуемых процессов и, в частности, учитывать в модели влияние тех факторов, включение которых в традиционные модели не представлялось возможным. Рассмотрим подробнее эти дополнительные возможности современного моделирования сложных процессов по сравнению с функциональными возможностями традиционных моделей.

Классические модели, основанные на дифференциальных уравнениях, полностью детерминированные. Но природа эпидемических процессов носит вероятностный (стохастический) характер. На динамику развития этих процессов влияет множество случайных факторов, приводящих к тому, что в общем случае мы наблюдаем случайный процесс распространения заболевания. Пренебрегая этим, можно получить слишком грубые или ошибочные оценки ресурсов, а они необходимы для проведения



противоэпидемических мероприятий [2]. Стохастическая модель в отличие от детерминированной позволяет оценить вероятность того или иного развития эпидемии, оценить риски возникновения неблагоприятных событий при определенных административных действиях. Во время создания модели Барояна—Рвачева реализация стохастических моделей сталкивалась с непреодолимыми вычислительными трудностями [6], которые в настоящее время могут быть успешно преодолены.

Другая особенность классического подхода заключается в следующем допущении: в традиционных моделях предполагается, что все индивиды на моделируемой территории непрерывно и равномерно перемешиваются [6]. Это условие приемлемо в качестве первого приближения, однако ясно, что оно представляет собой серьезное упрощение. В действительности реальные популяции, как правило, имеют крайне сложную структуру, обусловленную социальным расслоением, разнообразием географических условий, сложными временными и пространственными схемами перемещения. В этих условиях классические модели будут давать сколько-нибудь реалистичные результаты только при моделировании больших территорий.

Помимо указанных выше особенностей классического подхода отметим большую сложность изменения моделей с целью учета дополнительных факторов. Основное практическое применение моделей распространения заболеваний заключается в построении с их помощью систем поддержки принятия административных решений по предотвращению развития эпидемии. Для этого в модели должно быть учтено влияние на распространение болезни различных административных политик (например, проведение вакцинации, карантин и т. д.). Изначально такая возможность в традиционных моделях отсутствует, а попытки их модернизации ведут к необходимости решения задачи идентификации (тарирования) модели. Подобная задача требует немалых усилий для своего решения.

Моделирование рассматриваемых процессов развивается и за рубежом. Большая часть современных зарубежных исследований в области моделирования эпидемий ведется в направлении поиска адекватных способов учета в модели социальной структуры популяции.

Были предприняты попытки использовать для этого системы дифференциальных уравнений более сложной структуры, но пока они не увенчались успехом [6]. Наиболее перспективны сегодня так называемые «популяционные» модели (population-based models). Это дискретно-событийные модели, в которых отражена простейшая структура общества: в популяции явно выделены индивиды различного возраста, распространение заболевания между которыми может произойти только в рамках одной «контактной» группы (contact group) [3, 4]. «Контактные» группы определяются характерной структурой общества, которая зависит от моделируемой территории. Например, в одну «контактную» группу попадут одноклассники, сослуживцы, члены семьи, дети, посещающие один детский сад, и пр.

Все дискретно-событийные модели — компьютерные. Дискретно-событийная модель на этапе исполнения в каждый момент модельного времени представляет собой некоторое множество переменных состояния, характеризующих модель, а также списка запланированных событий, которые должны произойти в модели в определенной последовательности в будущем. Каждое событие — это некоторый набор атомарных действий, например проверка логических условий, изменение переменных состояния модели и пр. Обычно события порождаются различными параллельно работающими и взаимодействующими между собой элементами модели. Дискретно-событийная модель может описываться различными способами: например, она может быть реализована в некоторой системе моделирования или просто представлять собой программу на некотором языке программирования. Большинство современных сред визуального моделирования используют для описания моделей собственный синтаксис и элементы управления, решая основную задачу — реализацию корректной работы с происходящими в модели событиями (а также ее упрощение).

Агентный подход. Успехи в развитии подходов и сред разработки имитационных моделей делают их практически безальтернативным путем поддержки принятия решений, касающихся сложных систем. Агентное (многоагентное, мультиагентное) моделирование [1] — последнее достижение в области компьютерного

имитационного моделирования. Существует множество определений понятия агента и агентного подхода к моделированию. Общим во всех этих определениях является то, что агент — это некоторая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, могущая принимать решения в соответствии с некоторым набором правил и взаимодействовать с окружением и другими агентами. Агентные модели используются для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых не определяется глобальными правилами и законами, а наоборот, эти глобальные правила и законы являются интегральным результатом индивидуальной активности множества агентов. Как правило, агентные модели — дискретно-событийные или, реже, гибридные (дискретно-непрерывные, т. е. дискретно-событийные с непрерывными элементами).

Агентный подход к имитационному моделированию уже с успехом опробован во многих областях знаний, в частности в социологии, экономике, экологии. Отражением результативности этого подхода служит выделение в последние годы в составе различных общественных научных дисциплин самостоятельных направлений типа «вычислительная экономика» (computational economics), «вычислительная социология» (computational sociology) и т. п. [7].

Рассмотрим сущность этого подхода на примере моделирования развития эпидемии гриппа А. Грипп выбран в качестве исследуемого заболевания по двум причинам. Во-первых, грипп — главная составляющая инфекционной заболеваемости и смертности по всему миру. В условиях постоянной опасности возникновения новой пандемии гриппа изучение эпидемий гриппа и способов борьбы с ними чрезвычайно актуально. Во-вторых, грипп А — хорошо изученное заболевание, известны возможные формы его протекания, способы передачи вируса. Помимо этого существует подробная статистика заболеваемости гриппом в случае различных его эпидемий, которая может быть использована для тарирования и проверки корректности модели.

Построим агентную дискретно-событийную модель распространения гриппа А на территории одного города (или района), которая будет отражать только ординарные («сезон-

ные») эпидемии гриппа. Модель должна отображать число больных гриппом А в каждый момент модельного времени — в любой выбранный день определенного года. Для этого исходные данные модели должны учитывать эпидемическую обстановку в городе в начальный момент модельного времени.

Цель построения модели — получение оперативного (на несколько недель вперед) прогноза развития эпидемии в городе на основе текущих статистических данных заболеваемости. Кроме того, такая модель должна позволять анализировать распространение заболевания в условиях различных административных воздействий на развитие эпидемии.

В рамках агентного подхода введем в модель активные объекты — так называемые «агенты», которые будут характеризовать поведение одного человека, принадлежащего к одной из групп. Основным параметр человека, определяющий его поведение, — возраст. Выделим 7 возрастных групп: 0-2 года, 3-6 лет, 7-14 лет, 15-24 лет, 25-39 лет, 40-64 года, 65 лет и старше. Число агентов каждой возрастной группы в модели определяется демографическими данными по моделируемой территории (город, район и т. д.). Возрастная группа человека характеризует такие важные факторы, определяющие вероятность заболевания, как количество контактов с другими людьми в день, а также возможные места пребывания человека (школа, работа и т. д.).

В модели определим два основных типа объектов — агенты и локации. Локация это объект, моделирующий возможное местонахождение агента. Каждый агент ежедневно согласно своему внутреннему расписанию событий проводит определенное время в различных локациях. Например, агент от 7 до 14 лет может посещать такие локации, как «дом», «школа» и «транспорт». Выделим восемь типов локаций: дом, детские ясли, детский сад, школа, внешкольные занятия, вуз (а также средние профессиональные учебные заведения и пр.), работа, общественный транспорт. При необходимости этот список может быть пополнен. Количество различных мест пребывания каждого типа в модели определяется на основе общего количества агентов в модели и средней численности группы агентов, обычно посещающей данную локацию. Например, средний

размер класса в школе — около 25 человек. Тогда, если в модели 100 агентов от 7 до 14 лет, они будут посещать 4 класса. Следует отметить, что распределение агентов по всем локациям (кроме общественного транспорта) фиксировано (то есть школьник каждый день ходит в один и тот же класс, студент — в один и тот же вуз и т. д.). Все множество локаций образует окружающую среду для агентов (рис. 1). С точки зрения внимания окружающей среды агентная модель распространения гриппа может быть отнесена к «популяционным» моделям распространения заболеваний.

Поведение агентов. Опишем основные этапы протекания заболевания у агента. Для представления этого процесса в модели использован стейтchart (рис. 2). Стейтчарты (UML Statecharts, ведущие свое происхождение от карт состояния Харелла) — распространенный формализм, используемый в средах дискретно-событийного моделирования для задания последовательности событий. Смысл основных состояний агентов аналогичен принятому в классических моделях. Состояния «stateX» и «stateY» введены, чтобы промоделировать стадии инкубационного периода — пока больной не заразен («stateX») и когда он уже может заражать других агентов («stateY»). Состояния «stateA», «stateB» и «stateC» моделируют постепенное снижение способности к распространению заболевания по мере выздоровления агента.

Переходы между всеми состояниями, кроме перехода из «Susceptible» в «Exposed», осуществляются по тайм-ауту. Все тайм-ауты параметрически настраиваемы под моделируемый вид заболевания. Поскольку рассматриваемая модель ориентирована на грипп А, агент проводит в состоянии «Exposed» в среднем от 1 до

3 дней, в состоянии «Infectious» — от 6 до 8 дней, в состоянии «Recovered» — около 4 недель.

Переход из состояния «Susceptible» в «Exposed» происходит в случае передачи заболевания от одного агента к другому, которая может произойти в результате события «контакт». Это событие вызывается с определенной интенсивностью больными агентами, находящимися в состояниях «stateY» или «Infectious». При «контакте» заболевание может быть передано с определенной вероятностью только здоровому агенту (в состоянии «Susceptible»), находящемуся в той же самой локации, что и больной агент. Вероятность передачи заболевания зависит от многих факторов, в том числе от стадии заболевания больного агента, времени года в модели (погодных условий) и пр.

Общая структура описанной модели изображена на рис. 3. Множество объектов типа «агент» и «локации» взаимодействуют друг с другом с помощью корневого объекта, несущего преимущественно вспомогательные функции. В модели можно выделить четыре основных вида событий (динамики). Большая их часть порождается агентами, это:

- 1) события перемещения агента между локациями;
- 2) события, связанные с протеканием заболевания у агента;
- 3) событие «контакт», порождаемое больным агентом.

Четвертый вид событий связан со сменой времени года и соответствующими сезонными изменениями параметров модели, он порождается корневым объектом. В нотации UML корневой объект модели и агенты являются активными объектами.

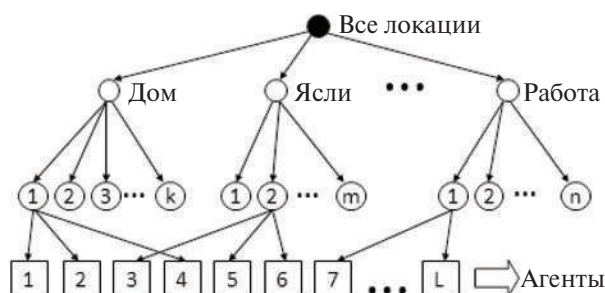


Рис. 1. Структура окружающей среды модели

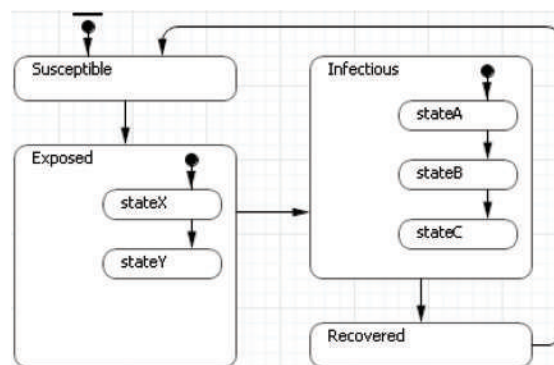


Рис. 2. Протекание заболевания у агента

К сожалению, многоплановость и объемность проделанной работы не позволяют рассмотреть всю модель достаточно подробно в рамках одной статьи.

Дискретно-событийная агентная модель распространения гриппа реализована в среде моделирования AnyLogic 6. Были проведены ее успешное тарирование и проверка корректности. Для этого использовалась статистика заболеваемости гриппом и ОРВИ в Санкт-Петербурге за последние несколько лет, полученная от НИИ гриппа из лаборатории эпидемиологии гриппа (руководитель И.Г. Маринич).

Разработанная модель позволяет выполнить достаточно точный краткосрочный прогноз развития сезонной эпидемии гриппа А. На рис. 4 представлен внешний вид получаемого прогноза (широкая серая линия — результат численного эксперимента, тонкая черная линия — реально полученная статистика заболеваемости за соответствующий период времени). Модель свободна от дифференциальных уравнений, и в ней легко могут быть учтены лю-

бые административные меры борьбы с заболеваемостью. Модель стохастическая и, хотя она требует для получения прогноза многократных прогонов, может быть использована для анализа рисков наступления определенного события.

В разработанной модели обеспечен учет наиболее эффективных мер снижения инфекционной заболеваемости, таких как вакцинация и карантин. Кроме того, сейчас ведутся работы по оценке вероятности получения определенного экономического ущерба в результате принятых административных мер. В результате этих работ на основе агентной модели распространения заболеваний будет создана система поддержки принятия решений, позволяющая не только получить оперативный прогноз развития эпидемии, но и количественно оценивать сравнительные достоинства различных методов борьбы с ней. Разработанный подход может быть успешно распространен и на другие виды инфекционных заболеваний.

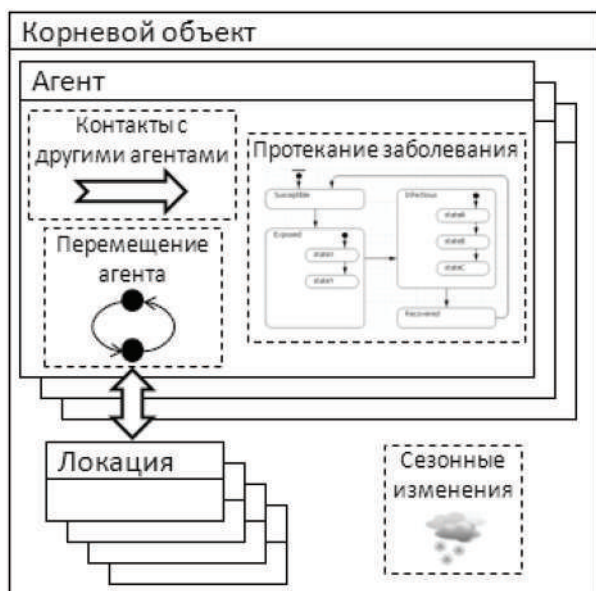


Рис. 3. Структура агентной модели распространения гриппа

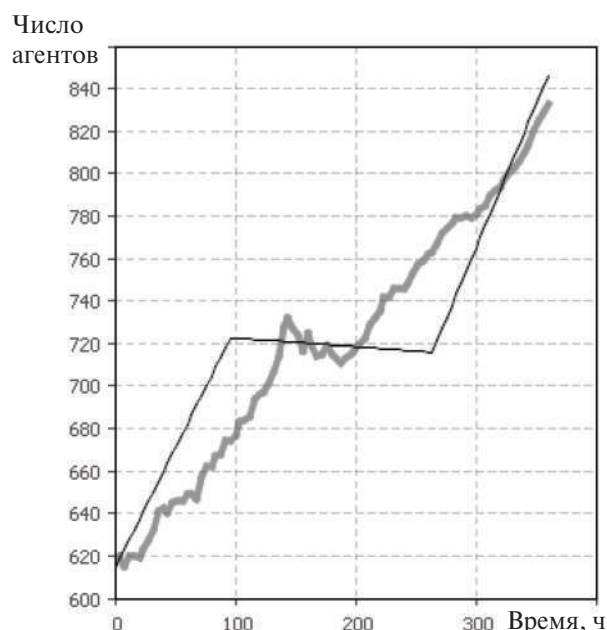


Рис. 4. Пример прогноза, полученного с помощью агентной модели распространения гриппа (— число инфицированных агентов; — исторические данные)



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карпов, Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю.Г. Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.
2. **Бородулин, А.И.** Статистическая модель эпидемического процесса [Текст] / А.И. Бородулин, Б.М. Десятков, А.Н. Шабанов и др. // Сиб. журн. индустриальной математики. — 2007. — Т. 10, № 2. — С. 23–30.
3. **Patel, R.** Finding optimal vaccination strategies for pandemic influenza using genetic algorithms [Text] / R. Patel, I.M. Longini, M.E. Halloran // J. of Theoretical Biology. — 2005. — Vol. 234, № 3. — P. 201–212.
4. **Chao, D.L.** FluTE, a publicly available stochastic influenza epidemic simulation model [Text] / D.L. Chao, M.E. Halloran, V.J. Obenchain et al. // PLoS Computational Biology. — 2010. — Vol. 6, № 1. — P. 1–8.
5. **Боев, Б.В.** Геоинформационные системы и эпидемии гриппа [Текст] / Б.В. Боев, В.В. Макаров // Ветеринарная патология. — 2004. — № 3. — С. 51–59.
6. **Бейли, Н.** Математика в биологии и медицине [Текст] / Н. Бейли. — М.: Мир, 1970. — 327 с.
7. **Паринов, С.И.** Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем [Текст] / С.И. Паринов // Искусственные сообщества. — 2007. — Т. 2, № 3–4. — С. 26–61.

УДК 574.91(075)

М.П. Федоров, В.Н. Уманец

АНАЛИЗ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРОДОВ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)

В России широкое использование термина «геоэкология» началось с 1970-х гг. после упоминания его известным советским географом В.Б. Сочавой (1905–1978). Как отдельная наука геоэкология окончательно сложилась в начале 1990-х гг. [1, 2]. Но, как это ни парадоксально, четкого и общепринятого определения названный термин до сих пор не получил, хотя и используется в экологии, географии, геологии, горном деле, а также для обозначения междисциплинарной науки. По определению Н.Ф. Реймерса (1990) «Геоэкология — раздел экологии (по другим воззрениям — географии, геологии), исследующий экосистемы (геосистемы) высоких иерархических уровней — до биосферы включительно». В.И. Осипов определяет геоэкологию «как междисциплинарную науку об экологических проблемах геосфер Земли. Объектами ее исследования являются все геосферы (оболочки) Земли: атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера. По уровню структурной организации она рассматривается как наука, образующая вместе с экологией, геологией и географией взаимосвязанный триумvirат наук о Земле» (1993). Имеется множество определений термина «геоэкология» и содержания соответствующей науки, вот одно из последних: геоэкология — комплексное междисциплинарное научное направление, которое изучает закономерности функционирования антропогенно измененных геосфер Земли в процессе их интеграции с обществом и возникающие геоэкологические проблемы (Комарова Н.Г., 2007).

Высшая аттестационная комиссия России дает следующее определение: «Геоэкология — междисциплинарное научное направление,

объединяющее исследования состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов. Основной задачей геоэкологии является изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды».

Таким образом, одна из главных задач геоэкологии — оценка взаимовлияния природных и антропогенных факторов на геосферы Земли как среду обитания человека, и в первую очередь на литосферу.

Под экологическими функциями литосферы или ее верхней части (геологической среды) — по мнению В.Т. Трофимова (1997, 2000), они состоят из ресурсной, геодинамической, геохимической и геофизической (медико-санитарной) функций [3] — понимают роль и значение литосферы, включая протекающие в ней геологические процессы и подземные воды, необходимые для жизнеобеспечения биоты и человеческого сообщества.

Более кратко геоэкология может быть определена как наука об изменениях геосфер под влиянием экологических факторов, включая антропогенные.

Исходя из специфики городской среды и строительной деятельности человека, выделим среди ресурсной функции роль минеральных ресурсов как сырья для строительной индустрии, а также запасов поверхностных и подземных вод, используемых для жилищно-коммунального комплекса. Геодинамиче-



ская составляющая экологической функции литосферы определяет влияние ее изменений (вследствие природных и антропогенных геологических процессов и явлений) на условия жизнеобитания и дискомфортность проживания человечества. Влияние геофизических и геохимических полей литосферы природного и техногенного происхождения, а также их аномалий на состояние здоровья человека определяет геофизико-геохимическую, или медико-санитарную, составляющую экологической функции.

Каково же воздействие строительного комплекса на изменения «продуктивной природной среды»? Как природные и антропогенные факторы влияют на экологические функции геосфер, и прежде всего литосферы, а те, в свою очередь, — на антропогенную деятельность, в частности на строительство?

Попытаемся ответить на эти вопросы путем анализа геоэкологических проблем города Санкт-Петербурга, огромного мегаполиса с развитым строительным комплексом и жилищно-коммунальным хозяйством (ЖКХ).

Проведенный анализ позволил построить обобщенную схему (см. рис. на с. 196) взаимовлияния природных и антропогенных факторов, которое обуславливает возникновение геоэкологических проблем в строительстве и ЖКХ; эта схема является интерпретацией природно-технической системы (ПТС), принципы формирования и управления которой исследованы в [4].

Геоэкологическая ситуация Петербурга очень непроста. Город возводился на 101 острове, а сегодня их осталось всего 41. Некоторые реки и болота, ручьи и озера были засыпаны, но при этом они не исчезли. На месте погребенной гидросети и сегодня находятся обводненные песчано-гравийные отложения. По-прежнему опасны древние русла Невы — палеодолины, представляющие собой толщи песчано-гравийных отложений мощностью до 100 м, содержащие большой объем подземных вод [5]. Такие образования, как правило, обладают избыточным внутренним давлением. При вскрытии кровли отложений уровни подземных вод устанавливаются около поверхности земли, а иногда и выше.

Эти участки очень опасны при строительстве метрополитена (например, авария у площади Мужества) и жилых домов (обрушение на улице Двинской).

Погребенные под городскими улицами болота тоже живы и продолжают оказывать свое негативное влияние [5]. Почти весь исторический центр Санкт-Петербурга возведен на таком основании. Это Исаакиевская и Дворцовая площади, Гостиный Двор и Александро-Невская лавра, Суворовский и Лиговский проспекты, Стрелка Васильевского острова и чуть ли не треть самого острова.

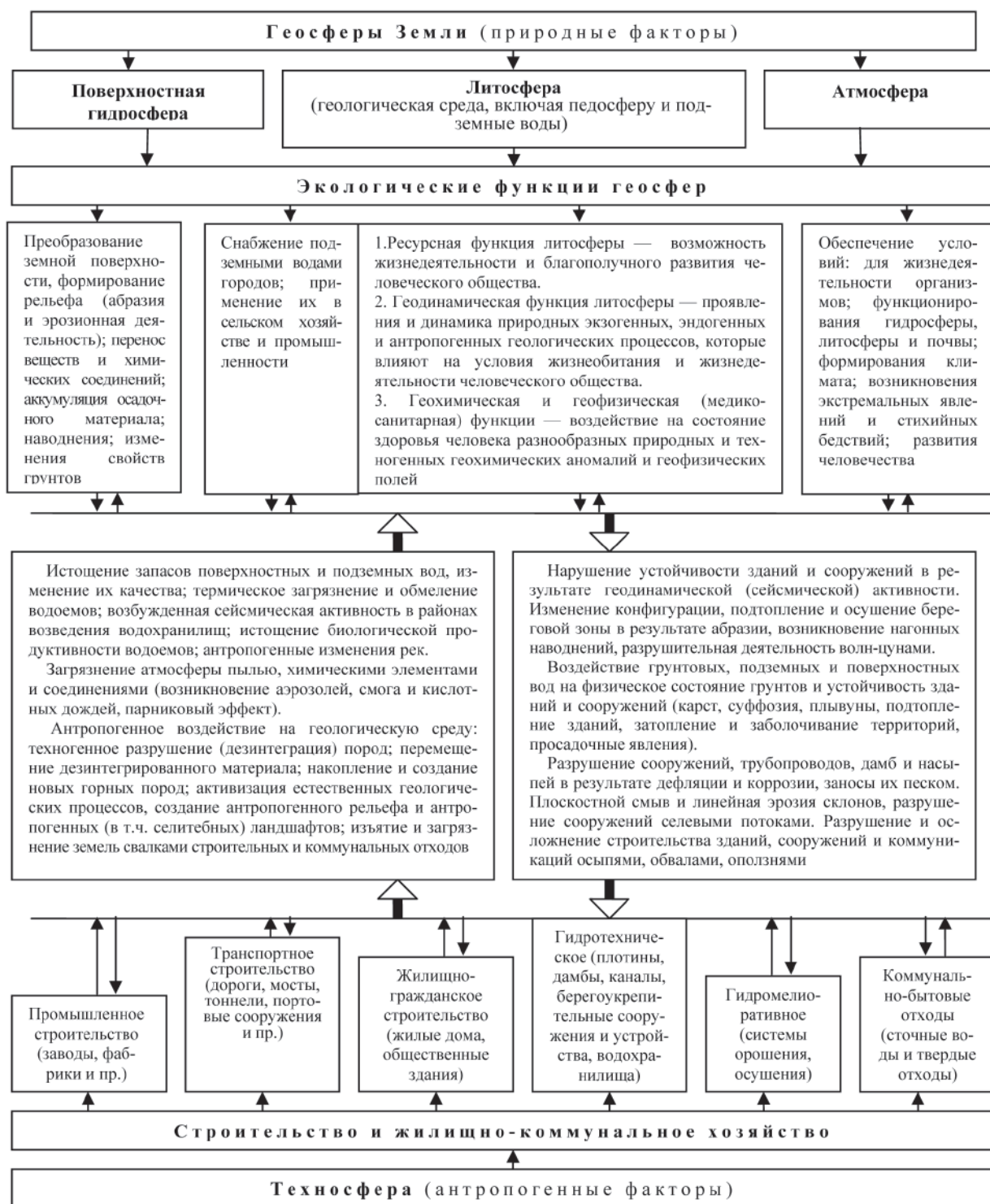
По причине зыбкости грунтов стоящий на дубовых сваях Исаакиевский собор получил легкий крен, а его купол отклонился от вертикали на несколько десятков сантиметров. Это было зафиксировано еще в 30-е гг. прошлого века. В 1970-е гг. навстречу друг другу и в сторону Невы начали «падать» Ростральные колонны. Под их фундаменты сначала закачали бетон. Но это только ускорило процесс «падения», поэтому тяжелые подушки пришлось извлечь и засыпать более легкие — песок и гравий.

Трещины от деформаций, вызванных неустойчивостью грунтов, можно обнаружить на многих питерских зданиях — Биржи, Адмиралтейства, Эрмитажа, Кунсткамеры, Петропавловской крепости.

Болота коварны еще и тем, что в них вырабатывается метан [5]. Газы, поднимаясь вверх, не находя естественного выхода, разрушая асфальт и бетон, вырываются в виде газо-грязевых фонтанов. Такие выбросы наблюдались в Невском, Фрунзенском, Красносельском районах. Случалось, что метан накапливался в помещениях — подвалах зданий, гаражах, и в них гремели взрывы. Сейчас с выбросами метана город справляется с помощью газоотводящих скважин, являющихся весьма эффективным методом.

В целом, по данным Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности администрации Санкт-Петербурга, погребенная гидросеть нашего города занимает 3,7 % городских площадей, что составляет 5300 га. Эти территории представляют собой зону риска и нуждаются в постоянном контроле.

Однако корень всех геоэкологических проблем в том, что город был построен на стыке гигантских геологических структур — Скандинавского (Балтийского) кристаллического щита и равнинной Русской плиты. Карельский перешеек, включая Выборгский и Приозерский



Экологические функции геосфер Земли и виды строительства.
Их взаимовлияние как предмет геоэкологии в строительстве и ЖКХ



районы Ленинградской области с их бесчисленными озерами, выходами гранитных пород, находятся как раз на окончании Скандинавского щита. Курортный же район Петербурга, а также и весь город — на северной окраине Русской плиты, покрытой чехлом осадочных пород мощностью от 15 до 300 м. Зоны стыка геологических структур традиционно считаются самыми нестабильными, особенно в силу того, что они еще и перемещаются друг относительно друга. Если щит имеет тенденцию к поднятию, то плита — к опусканию. Это микросмические перемещения, измеряющиеся несколькими миллиметрами в год, но они происходят.

Поэтому в Петербурге могут случаться и землетрясения. Территория города, по мнению ряда ученых [6, 7], сейсмоактивна. Санкт-Петербургский регион на общей карте сейсмораионирования отнесен к 5–7-балльным зонам по шкале Рихтера.

Следует вспомнить и о процессе карстообразования — возникновении подземных пустот, которым особенно подвержены Красносельский и Пушкинский районы; о радоноопасности, актуальной для более чем 6 % городской территории; об эрозии берегов рек и Финского залива, в результате которой ежегодно теряется около 70 га городской территории. Если гипотеза глобального потепления климата, пишет Е.Н. Беллендир и др. [8], реализуется, Санкт-Петербург окажется не только катастрофически подтопленным, но и затопленным, поскольку существующий комплекс защитных сооружений от наводнений может оказаться недостаточным.

Согласно оценкам Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности администрации Санкт-Петербурга, почти 12 % территории города находится в зоне высокого геологического риска, т. е. более 170 км² территории Петербурга таят в себе ту или иную опасность. А 2400 строений находятся в районах, где неблагоприятна геологическая среда.

Новейшие данные свидетельствуют о том, что состояние здоровья человека в значительной степени определяется патогенным, отрицательным влиянием таких геологических факторов, как геоактивные зоны (ГАЗ), контролируемые геодинамически активными

разломами (ГДАР), что стало основанием для выделения их в качестве геопатогенных зон (ГПЗ) [9]. ГДАР представляют собой расколы в литосфере мощностью до нескольких метров и протяженностью от сотен метров до десятков километров в дочетвертичных породах. Группы субпараллельных, сближенных ГДАР образуют геоактивные зоны, простирание которых можно проследить на сотни и тысячи километров при общей ширине от метров до 10 км. Особенно важно при строительстве то, что молодые активные разломы достаточно четко проявляются в форме ослабленных зон и в разрезе четвертичных отложений, представляющих основу для различных инженерных сооружений.

Исследование в районе прорыва воды в тоннеле метрополитена на участке «Лесная» — «Площадь Мужества» приблизило к пониманию природы патогенного воздействия ГАЗ. Геологическими методами были установлены зоны повышенной трещиноватости и неоднородности в разрезе четвертичных отложений.

Спектро-сейсморазведочное и гравиметрическое профилирование выявило наличие микровибраций, возникающих при прохождении наземного транспорта, а электромагнитные исследования в диапазоне частот 10–20, 250–300 и 900–1100 кГц показали существование импульсного электромагнитного излучения. Эманиационная съемка установила диссипацию по АР, что, собственно, и определило формирование рассматриваемой ГАЗ (радон и гелий, метан, углекислый и другие газы).

Качество окружающей среды в Санкт-Петербурге определяется структурой и культурой производства, особенностями размещения производительных сил, а также географическим положением и климатическими условиями.

К сожалению, как производственные, так и социально-бытовые объекты, расположенные на территории города, отличаются высокой ресурсо- и энергоемкостью, что отрицательно сказывается на экологической обстановке. Кроме того, располагаясь в устье Невы, город вынужден пропускать через свою главную водную артерию часть сточных вод, поступающих из других субъектов РФ. На экологическую обстановку влияет также трансграничный воздушный перенос загрязняющих веществ с сопредельных территорий.

Качество окружающей среды в городе определяется загрязнением воздушного и водного бассейнов, использованием городских земель, утилизацией отходов производства и потребления, состоянием зеленых насаждений и многими другими факторами.

Выделяющиеся в геоактивных зонах подземные газы приводят к созданию газо-атомо-химических ореолов и изменению характера почвенно-приземной атмосферы. В составе подобных ореолов, помимо Rd , Ar , He , H , участвуют многокомпонентные смеси из углекислого газа и метана, алканов и алкенов, ртути и летучих соединений тяжелых металлов, сернистых и разных углеводородных соединений, в том числе предельно-ароматических углеводородов и даже бензапиренов и цианидов. Возможно, подобное выделение газов определяет плохой климат Петербурга. Жители его дышат атмосферой, на состав которой влияют газы, выделяющиеся по густой системе AP и создающие газовой-эндогенный «купол», «накрывающий» город. Опасность этих ореолов не только и не столько в прямом воздействии через приземную атмосферу на человека, сколько в попадании газов и разных соединений в подземные воды, почвы и растительность.

Загрязнение воздушной среды формируется, как сказано выше, под влиянием переноса загрязняющих веществ с сопредельных территорий, а также под влиянием выбросов передвижных и стационарных источников. В Санкт-Петербурге основную часть загрязнений воздушной среды дает автотранспорт, поэтому особенно сильно загрязнен воздух вблизи магистралей с интенсивным движением автомашин. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха города вносят диоксид азота, формальдегид и фенол. Уровень загрязнения воздуха в Санкт-Петербурге в целом определяется как «высокий» (значение $ИЗА$ составило 11,1).

Состояние водных объектов города характеризуется как «загрязненные» и «умеренно загрязненные». Основной источник загрязнения поверхностных вод — сброс сточных и ливневых вод без очистки. На территории Санкт-Петербурга и его окрестностей подземные воды распространены повсеместно. Недр города содержат не только пресные питьевые воды, но и минерализованные, которые используются

для розлива в качестве минеральных столовых и лечебных, а также для бальнеологических целей в санаториях Курортного и Петродворцового районов. Подземные воды, расположенные в недрах города, относительно чистые.

Состояние почв, грунтов имеет важнейшее значение для оценки геоэкологического состояния той или иной территории, так как это, во-первых, интегральный показатель экологического состояния окружающей среды, а во-вторых, источник вторичного загрязнения приземного слоя атмосферы, поверхностных и грунтовых вод. По заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности администрации Санкт-Петербурга выполняются работы по оценке уровней загрязнения почв и грунтов города тяжелыми металлами. Уже получена оценка всех основных районов города, а с 2005 г. начата оценка пригородных районов, представляющих наибольший интерес с точки зрения размещения новых инвестиционных объектов, новых зон промышленного и жилого строительства.

Для Санкт-Петербурга наиболее остро стоит проблема загрязнения почв свинцом, цинком и кадмием, по которым из года в год выявляется соответственно 70, 60 и 50 % проб с превышением нормативов [10].

Наиболее крупные ореолы комплексного чрезвычайно опасного загрязнения приурочены к трем группам объектов:

к старым промышленным зонам; наиболее крупные из них — протянувшаяся субширотной полосой южнее Обводного канала; в южной части Васильевского острова; в районе р. Карповки; в районе р. Большая Охта; промзона в Усть-Славянке; промзона г. Кронштадта;

к жилым зонам старой застройки (вдоль Невского проспекта и Среднего проспекта Васильевского острова, в районе Большой Охты);

к закрытым и действующим полигонам твердых бытовых отходов и несанкционированным свалкам (бывшие Купчинская, Яблоневская и Приморская свалки; полигон ТБО «Новоселки»; несанкционированные свалки в районе Усть-Славянки, Конной Лахты, на берегу залива в районе Сосновой Поляны).

Таким образом, приведенные данные дают картину достаточно напряженного геоэкологического состояния Санкт-Петербурга. При

этом обращает на себя внимание то, что все публикации на эту тему рассматривают проблему односторонне. Отмечается влияние природных факторов или геосфер Земли на техносферу, т. е. на строительный комплекс, коммунальное хозяйство, здоровье людей и комфортность их проживания, но совершенно не рассматривается обратное влияние инженерной деятельности людей на состояние геосфер. В то же время инженерная и строительная деятельность довольно часто приводят к нарушению природных экологических функций литосферы и других геосфер Земли.

В заключение обобщим научно-практические задачи и выделим наиболее важные, на наш взгляд, проблемы, которые целесообразно решать в области строительной геоэкологии:

изучение изменений литосферы (геологической среды) при активизации природных эндо- и экзогенных процессов в результате строительной деятельности;

оценка устойчивости урбанизированных территорий к природным и техногенным воздействиям;

обоснование инженерной защиты городских агломераций от антропогенных и активизированных в результате строительных работ природных геологических процессов;

оценка защищенности почвы и вод от техногенного загрязнения коммунально-бытовыми отходами;

обоснование захоронений (изоляции в литосфере) токсичных строительных и коммунальных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козловский, Е.А.** Геоэкология — новое научное направление [Текст]: доклад / Е.А. Козловский // Междунар. геолог. конгресс. Докл. сов. геологов. — Геоэколог. исслед. в СССР. — М., 1989.
2. **Клубов, С.В.** Геоэкология: история, понятия, современное состояние [Текст] / С.В. Клубов, Л.Л. Прозоров. — М., 1993.
3. **Экологические функции литосферы** [Текст] / Под ред. В.Т. Трофимова. — М., 2000.
4. **Экологические основы управления природно-техническими системами** [Текст] / под ред. М.П. Федорова. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 506 с.
5. **Захарова, Е.Г.** Анализ и оценка негативных последствий захоронения болот в пределах мегаполисов (на примере Санкт-Петербурга) [Текст] / Е.Г. Захарова; ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева // Город и геологические опасности. Ч. II. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. — С. 174–181.
6. **Рудник, В.А.** О геологической опасности городских агломераций [Текст] / В.А. Рудник, Е.К. Мельников // Город и геологические опасности. Ч. II. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. — С. 280–294.
7. **Миндель, И.Г.** Сейсмическая опасность для высотных зданий, строящихся в Санкт-Петербурге и Москве [Текст] / И.Г. Миндель // Город и геологические опасности. Ч. II. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. — С. 252–257.
8. **Беллендир, Е.Н.** Геологические опасности на территории Санкт-Петербурга [Текст] / Е.Н. Беллендир, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова // Город и геологические опасности. Ч. II. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. — С. 159–163.
9. **Мельников, Е.К.** Влияние геодинамически активных зон разломов на здоровье населения города Санкт-Петербурга и Ленинградской области [Текст] / Е.К. Мельников, А.Н. Шабаров, Е.И. Петров [и др.] // Город и геологические опасности. Ч. II. — СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2006. — С. 236–247.
10. **Горький, А.В.** Загрязнение почв Санкт-Петербурга тяжелыми металлами / А.В. Горький, Е.А. Петрова; Рос. геоэколог. центр — филиал ФГУП «Урангео» МПР РФ. — 2007. — 18 с.

УДК 699.8

И.И. Боголепов, Н.П. Столярова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОКОН СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ

Мероприятия по защите людей, находящихся в здании, от шума сводятся главным образом к обеспечению необходимой звукоизоляции. Важность вопроса обеспечения необходимой звукоизоляции окон жилых и общественных зданий обусловлена тем, что она практически полностью определяет звукоизоляцию от внешнего шума со стороны наружных стен этих зданий. Однако требуемую звукоизоляцию окон разные авторы предлагают определять по-разному, а именно: 1) методом нормируемых параметров; 2) методом расчета ожидаемой шумности; 3) приближенным методом, представляющим собой причудливую смесь двух предыдущих. Статья посвящена анализу инженерной сути, рациональной области применения, плюсам и минусам каждого из этих методов.

Метод нормируемых параметров

Метод нормируемых параметров разработан в России группой ведущих строительных акустиков под руководством доктор технических наук профессора Г.Л. Осипова [1–3]. По этому методу величина нормируемой звукоизоляции окон, витрин и других видов остекления (далее — окон) определяется следующим образом. Нормируемым параметром звукоизоляции наружных ограждающих конструкций окон здесь является изоляция от внешнего шума, производимого потоком городского транспорта, $R_{\text{Атран}}$, дБА. Нормативные значения $R_{\text{Атран}}^H$ для различных помещений приведены в табл. 1 в зависимости от уровня транспортного шума у фасада здания. Для

Таблица 1

Нормативные требования к звукоизоляции окон

Назначение помещений	Требуемые значения $R_{\text{Атран}}^H$, дБА, при эквивалентных уровнях звука у фасада здания от наиболее интенсивного движения транспорта в дневное время (час «пик»), $L_{\text{АЭКВ}}$, дБА				
	60	65	70	75	80
Палаты больниц, санаториев, кабинеты медицинских учреждений	15	20	25	30	35
Жилые комнаты квартир в домах:					
категории А	15	20	25	30	35
категорий Б и В	—	15	20	25	30
Жилые комнаты общежитий	—	—	15	20	25
Номера гостиниц:					
категории А	15	20	25	30	35
категории Б	—	15	20	25	30
категории В	—	—	15	20	25
Жилые помещения домов отдыха, домов-интернатов для инвалидов	15	20	25	30	35
Рабочие комнаты, кабинеты в административных зданиях и офисах:					
категории А	—	—	15	20	25
категорий Б и В	—	—	—	15	20

промежуточных значений расчетных уровней требуемую величину $R_{А\text{тран}}^H$ следует определять интерполяцией.

Исходная фактическая звукоизоляция окна $R_{А\text{тран}}$, дБА, определяется на основании рассчитанной [1, 2] или измеренной [8, 9] частотной характеристики звукоизоляции данного типа окон R_i , дБ, в третьоктавных полосах частот «i». Расчет звукоизоляции окна R_i производит проектант здания, измеренные значения R_i предоставляет проектанту здания фирма — изготовитель окна по результатам лабораторных испытаний. Предпочтение следует отдавать измеренным значениям.

Звукоизоляция $R_{А\text{тран}}$ определяется с помощью эталонного спектра шума потока городского транспорта L_i , дБ, для диапазона средних частот третьоктавных полос: от $i = 100$ Гц до $i = 3150$ Гц. Уровни эталонного спектра, скорректированные по кривой частотной коррекции «А» для шума с уровнем 75 дБА (оценочная кривая скорректированного уровня звукового давления эталонного спектра), характеризуются следующими данными:

Средние частоты третьоктавных полос, Гц	Скорректированный уровень звукового давления эталонного спектра L_i , дБ
100	55
125	55
160	57
200	59
250	60
315	61
400	62
500	63
630	64
800	66
1000	67
1250	66
1600	65
2000	64
2500	62
3150	60

Для определения величины звукоизоляции окна $R_{А\text{тран}}$ по известной частотной характеристике звукоизоляции данного окна R_i следует в каждой третьоктавной полосе частот из уровня приведенного выше эталонного спектра L_i вычесть величину изоляции воздушного шума R_i данной конструкции окна. Полученные вели-

чины уровней следует сложить энергетически, а результат сложения вычесть из уровня эталонного шума, равного 75 дБА. Величину звукоизоляции окна $R_{А\text{тран}}$, дБА, определяют по формуле

$$R_{А\text{тран}} = 75 - 10 \lg \sum_{i=1}^{16} 10^{0,1(L_i - R_i)}, \quad (1)$$

где L_i — скорректированные по кривой частотной коррекции «А» уровни звукового давления эталонного спектра в i -й третьоктавной полосе частот, дБ; R_i — изоляция воздушного шума данной конструкции окна в i -й третьоктавной полосе частот, дБ.

Нормативные значения $R_{А\text{тран}}^H$, дБА, определяются по табл. 1 при эквивалентных уровнях звука у фасада здания в период наиболее интенсивного движения транспорта (дневное время, час «пик») $L_{А\text{ЭКВ}}$, дБА.

Величина $L_{А\text{ЭКВ}}$ может быть измерена [10] или рассчитана [7].

Суть рассмотренного метода заключается в том, что нормируются не шум в помещении, а значения звукоизоляции окна. Фактические значения указанного параметра $R_{А\text{тран}}$ для конкретных окон должны быть равны или больше его нормативного значения $R_{А\text{тран}}^H$. В результате по величине $R_{А\text{тран}}$ согласно формуле (1) и данным табл. 2 определяют, для каких помещений по назначению и для каких эквивалентных уровней шума у фасада здания выбранная конструкция окна обеспечивает необходимую звукоизоляцию. В случае, если для данного помещения и при данных эквивалентных уровнях звука у фасада здания звукоизоляции окна недостаточно, то ее увеличивают, выбрав другую конструкцию, и повторяют процедуру до получения желаемого результата.

Этот метод применим к типовому строительству, где возможны решения с ориентацией на хороший прототип. Он прост и дает, как правило, приемлемый результат. Это — плюс. Но он не гарантирует выполнения допустимой нормы шума в помещении. Это — минус. Трудности заключаются в необходимости иметь квалифицированного специалиста-акустика и в получении исходных данных о звукоизоляции окна R_i и эквивалентных уровнях звука у фасада здания $L_{А\text{ЭКВ}}$.

Таблица 2

Звукоизоляция типовых шумозащитных окон и витражей

Конструкция герметичных окон	Формула остекления $s_1 + l + s_2$ (толщина силикатных стекол и воздушного промежутка между ними, мм)	$R_{\text{Атран'}}$ дБА
Окно — двустенный стеклопакет	3 + 12 + 3	25
	4 + 16 + 4	27
	4 + 56 + 4	28
	4 + 91 + 4	31
	3 + 90 + 6	32
Металлический двустенный витраж	4 + 100 + 4	33
	4 + 200 + 4	35
	8 + 100 + 8	37
	8 + 200 + 8	39
	8 + 400 + 8	41

Примечание. Подобная таблица содержится, например, в [7], а более подробные данные — в Интернете у фирм-изготовителей.

Метод расчета ожидаемой шумности

Метод расчета ожидаемой шумности первоначально разработан группой ведущих судовых акустиков России под руководством доктора технических наук профессора И.И. Клюкина [3–5]. Рассмотрим его инженерную суть на основе ключевой формулы строительной акустики для типовой шумовой ситуации в городе [6].

Итак, на улице в открытом пространстве «1» поток машин или другой источник шума (например, промышленное предприятие) создает шум звуковой мощностью W_1 , Вт, с уровнем звуковой мощности L_{W1} , дБ. Источник шума находится, например, на улице близко к земле ($\alpha_1 = 1$, $Q_1 = \infty$) на расстоянии r_1 от стены дома площадью $S_{\text{ст}}$, за которой находится помещение «2» с постоянной Q_2 и допустимой нормой шума $L_{\text{н2}}$. Этот шум, например с полусферической формой излучения, достигает стену дома с интенсивностью

$$J_1 = \frac{W_1}{2\pi r_1^2}, \text{ Вт/м}^2.$$

Если интенсивность звука, излучаемого этой стеной в помещение «2», есть $J_{\text{ст}}$, а коэффициент звукоизоляции стены этого здания — $r_{\text{ст}} = J_1/J_{\text{ст}}$ (не путать с расстоянием r_1), то мощность звука, проникающая в помещение «2» указанного здания, равна $W_2 = J_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = \frac{J_1 S_{\text{ст}}}{r_{\text{ст}}}$. Примем, что в помещении «2» имеется диффузное звуковое

поле со средним коэффициентом звукопоглощения ограждающих поверхностей α_2 и с их общей площадью S_2 . Тогда постоянная звукопоглощения помещения — $Q_2 = \frac{\alpha_2 S_2}{(1-\alpha_2)}$, а интенсивность звука в центре помещения «2» составит

$$J_2 = \frac{4W_2}{Q_2} = \frac{J_1 S_{\text{ст}}}{r_{\text{ст}}} \frac{4}{Q_2} = \frac{W_1}{r_{\text{ст}}} \frac{S_{\text{ст}}}{2\pi r_1^2} \frac{4}{Q_2}.$$

Отсюда уровень звука L_{p2} , дБ, в расчетной точке помещения «2», который должен быть равен или меньше допустимого уровня звука $L_{\text{н2}}$, дБ, определяется ключевой формулой строительной акустики:

$$L_{\text{p2}} = L_{W1} + 10 \lg \left[\left(\frac{1}{2\pi r_1^2} + \frac{1}{Q_1} \right) S_{\text{ст}} \left(\frac{4}{Q_2} \right) \right] - R_{\text{нс}} \leq L_{\text{н2}},$$

где L_{W1} — уровень звуковой мощности источника шума в пространстве «1», дБ; $R_{\text{нс}}$ — звукоизоляция стены (окна), дБ; $L_{\text{н2}}$ — допустимый уровень звукового давления на рабочем месте в помещении «2», дБ.

В открытом пространстве

$$\alpha_1 = 1, \quad Q_1 = \frac{\alpha_1 S_1}{(1-\alpha_1)} = \infty, \quad \frac{1}{Q_1} = 0,$$

поэтому в результате имеем

$$L_{p2} = L_{w1} + 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r_1^2} \right) + 10 \lg \left[S_{\text{ст}} \left(\frac{4}{Q_2} \right) \right] - R_{\text{нс}} =$$

$$= L_{p1} + 10 \lg \left[S_{\text{ст}} \left(\frac{4}{Q_2} \right) \right] - R_{\text{нс}} \leq L_{\text{н2}},$$

где L_{p1} — уровень звукового давления снаружи у стены дома, дБ.

Требуемая звукоизоляция стены, которая определяется звукоизоляцией окна, рассчитывается по формуле

$$R_{\text{тр(нс)}} \geq L_{w1} + 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r_1^2} \right) +$$

$$+ 10 \lg \left[S_{\text{ст}} \left(\frac{4}{Q_2} \right) \right] - L_{\text{н2}}, \text{ дБ.}$$

Окончательно имеем

$$R_{\text{тр(нс)}} \geq L_{p1} + 10 \lg \left[S_{\text{ст}} \left(\frac{4}{\kappa Q_2} \right) \right] - L_{\text{н2}}, \text{ дБ, (2)}$$

где κ — коэффициент, учитывающий нарушение диффузного звукового поля в помещении [1]; его значения зависят от коэффициента звукопоглощения ограждающих поверхностей:

α_2	0,2	0,4	0,5	0,6
κ	1,25	1,60	2,00	2,50

Если источник шума и расчетная точка расположены территориально на расстоянии большем, чем удвоенный максимальный размер источника шума ($r_1 > 2l_{\text{max}}$), и между ними нет препятствий, экранирующих шум или отражающих его в направлении расчетной точки (снаружи на расстоянии 2 м от ограждающей конструкции), то октавные уровни звукового давления L_{p1} , дБ, в этой расчетной точке надо определять следующим образом:

при точечном источнике шума (отдельная установка на территории, трансформатор и т. д.) — по формуле

$$L_{p1} = L_{w1} - 20 \lg r_1 + 10 \lg \Phi - \frac{\beta_a r_1}{1000} - 10 \lg \Omega;$$

при протяженном источнике ограниченного размера (стена производственного здания, цепочка шахт вентиляционных систем на крыше производственного здания, трансформаторная

подстанция с большим количеством открыто расположенных трансформаторов) — по формуле

$$L_{p1} = L_{w1} - 15 \lg r_1 + 10 \lg \Phi - \frac{\beta_a r_1}{1000} - 10 \lg \Omega.$$

В этих формулах значение величины Φ , Ω , — то же, что и в ключевой формуле строительной акустики [1], а значения величины затухания звука в атмосфере β_a , дБ/км, принимаются согласно следующей зависимости:

Октавная полоса частот f , Гц	Величина затухания β_a , дБ/км
63	0
125	0,7
250	1,5
500	3
1000	6
2000	12
4000	24
8000	48

Примечание. При расстоянии $r_1 \leq 50$ м затухание звука в атмосфере не учитывают.

Эквивалентные уровни звука у фасада здания при наиболее интенсивном движении транспорта (дневное время, час «пик») $L_{p1} = L_{A_{\text{ЭКВ}}}$, дБА, могут быть измерены [10] или рассчитаны [7].

Этот второй метод незаменим для уникальных строительных сооружений, где нет хорошего прототипа. Он более трудоемок, чем первый, требует экспериментального контроля и доводки при строительстве и эксплуатации, а главное — высококвалифицированных специалистов-акустиков. На бытовом уровне — это минус. Но второй метод надежно гарантирует выполнение допустимой нормы шума в помещениях, что составляет его безусловный плюс. Трудности здесь еще большие, чем для первого метода, состоят в получении с определенной точностью и надежностью исходных данных, а именно: звукоизоляции окна R_f ; постоянной звукопоглощения помещения Q_2 ; эквивалентных уровней звука у фасада здания при наиболее интенсивном движении транспорта (дневное время, час «пик») $L_{A_{\text{ЭКВ}}}$.

Приближенный метод

Приближенный метод разработан под руководством доктора технических наук профессора Г.Л. Осипова и кандидата технических наук

И.Л. Шубина [7]. По этому методу требования к необходимой звукоизоляции наружных окон зданий $R_{\text{Атран}}$ устанавливаются на основании ожидаемого уровня транспортного шума у фасада, обращенного в сторону источника шума, $L_{\text{А(ЭКВТЕР2)}}$ и допустимого уровня шума в помещении $L_{\text{АЭКВДОП}}$ в соответствии с санитарными нормами, указанными в СНиП 23-03-2003 [1]. Расчет ожидаемых уровней транспортного шума может производиться приближенно по формулам Г.Л. Осипова и И.Л. Шубина [7].

Снижение внешнего шума конструкцией окна в защищаемом помещении предлагается определять по приближенной в данном случае формуле звукоизоляции

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A},$$

где L_1 — уровень звукового давления в пространстве источника звука в 2 м от наружного ограждения, дБ; L_2 — уровень звукового давления в защищаемом помещении, где необходимо выполнить санитарные нормы шума, дБ; S — площадь ограждающей конструкции, м², со звукоизоляцией R ; A — эквивалентная площадь звукопоглощения в защищаемом помещении, м².

В нашем случае, если требуемое снижение внешнего шума конструкцией окна должно обеспечить допустимую норму шума в помещении L_n :

$$\begin{aligned} \Delta L_A^{\text{тр}} &= L_1 - L_n = \\ &= R - 10 \lg \frac{S}{A_n} = L_{\text{АЭКВТЕР2}} - L_{\text{АЭКВДОП}}, \end{aligned}$$

а для помещений жилых, административных и других обитаемых зданий приближенно можно принять $\frac{S_0}{A_n} \approx 0,3$ и $10 \lg \frac{S_0}{A_n} = -5,2$ дБ (S_0 — площадь окна, м²; A_n — эквивалентная площадь поглощения в помещении, средняя в диапазоне 125–1000 Гц, м²), то требуемая звукоизоляция окна рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} R_{\text{Атран}}^{\text{тр}} &= L_{\text{АЭКВТЕР2}} - L_{\text{АЭКВДОП}} - 5 = \\ &= L_1 - L_n - 5, \text{ дБА.} \end{aligned} \quad (3)$$

Величина L_1 принимается по данным шумовой карты города или задается заказчиком, величина допустимой нормы шума в помещении L_n — по данным СНиП 23-03-2003 [1].

Выбор конструкции окна по приближенному методу состоит в выполнении условия,

чтобы фактическая звукоизоляция окна $R_{\text{Атран}}$ была не меньше требуемой по формуле (3), т. е. в выполнении соотношения $R_{\text{Атран}} \geq R_{\text{Атран}}^{\text{тр}}$. Характеристики конструкции типовых шумозащитных окон со звукоизоляцией $R_{\text{Атран}}$ приведены в табл. 2.

Третий метод используется, когда нет под рукой надежных исходных данных для первого и второго метода. Им может воспользоваться инженер-строитель, окончивший краткосрочные курсы акустика. Метод прост и гарантирует в первом приближении приемлемый результат. В этом его практическое значение, это — плюс. Минус — в малой надежности обеспечения желаемой тишины с помощью выбранной конструкции шумозащитного окна.

Конструкция типовых звукоизолирующих окон

Современное типовое звукоизолирующее (шумозащитное) окно состоит из стеклопакета с двумя стеклами и газовой средой между ними и из дистанционной виброизолирующей рамки с осушителем. Условием надежности является качественная герметизация стеклопакета. При производстве стеклопакетов используют практически все виды стекол. В качестве материала для дистанционных рамок используются алюминий и оцинкованная сталь, реже — пластмасса. Рамка выполняется полой внутри, со специальными диффузионными отверстиями в сторону межстекольного пространства. Внутри рамки находится осушитель, который впитывает даже самые незначительные количества воды в межстекольном пространстве, благодаря чему предотвращается выпадение росы внутри стеклопакетов в холодное время года.

Как работает осушитель? Частицы осушителя имеют множество пор, их диаметр больше, чем диаметр атомов или молекул газа, а поэтому газы диффундируют в эти поры и абсорбируются. Осушитель выполняет роль и звукопоглотителя.

Для заделки швов в стеклопакете используют герметики, которые играют и роль виброизолятора. Для герметика важно обеспечить прочность стеклопакетов и препятствия проникновению водяного пара в межстекольное пространство. Основными свойствами герметиков являются: сила сцепления со стеклом и материалом рамки, эластичность, прочность

и время старения, ширина и толщина уплотняющей массы, скорость диффузии молекул через герметик. Качественные стеклопакеты изготавливаются по принципу двойной герметизации. В качестве первичного герметика чаще всего применяется бутил, он обладает наилучшей относительной способностью сопротивляться проникновению водяного пара. Бутиловая масса наносится при температуре чуть больше 100 °С в виде тонкой ленты на обе стороны дистанционной рамки. Когда стекла сдавливают, между стеклами и рамкой остается разделяющий их бутиловый шов. С наружной стороны стеклопакета делают вторичную герметизацию, так как первичный герметик не может обеспечить требуемую прочность кромочного соединения. В качестве вторичного герметика чаще всего используют полисульфид. Межстекольное пространство в стеклопакетах заполняют воздухом; иногда вместо воздуха для улучшения теплоизоляции — инертными газами (аргоном Ar или криптоном Kr) и для улучшения звукоизоляции — гексафторидом серы C₆F₈ (см., например, www.peter-ecodom.ru/steklopaketu/). Схема конструкции типового узла звукоизолирующего окна представлена на рисунке.

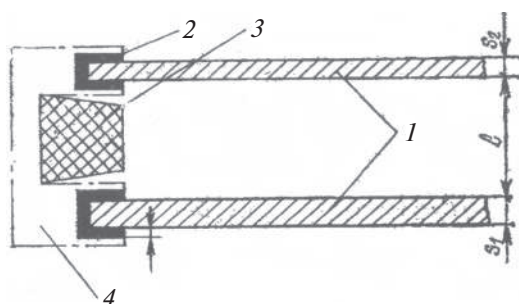


Схема типового звукоизолирующего окна:
1 — стекла; 2 — герметик-виброизолятор; 3 — осушитель-звукопоглотитель; 4 — рамка окна

Звукоизоляция типовых шумозащитных окон и витражей представлена в табл. 2.

Пример определения необходимой звукоизоляции окна

В качестве примера определим методом нормируемых параметров необходимую звукоизоляцию окна жилых комнат квартир в домах категории В.

Первый вариант. Исходные данные: 1) по шумовой карте города эквивалентные уровни

звука у фасада данного здания при наиболее интенсивном движении транспорта (дневное время, час «пик») находим $L_{A_{ЭКВ}} = 80$ дБА; 2) по технической документации для данного окна здания указанной категории имеем следующую частотную характеристику звукоизоляции R_i , дБ:

Третьоктавные полосы частот, Гц	R_i , дБ
100	28
125	29
160	24
200	25
250	26
315	27
400	28
500	30
630	33
800	36
1000	42
1250	45
1600	47
2000	44
2500	43
3150	41

Решение. Рассчитаем величину звукоизоляции окна $R_{A_{тран}}$, дБА, по формуле (1). Значения L_i и значения R_i указаны в приведенных ранее табличных зависимостях. Итак:

$$\begin{aligned}
 R_{A_{тран}} &= 75 - 10 \lg \sum_{i=1}^{16} 10^{0,1(L_i - R_i)} = \\
 &= 75 - 10 \lg (10^{2,7} + 10^{2,6} + 10^{3,3} + 4 \cdot 10^{3,4} + \\
 &+ 10^{3,3} + 10^{3,1} + 10^3 + 10^{2,5} + 10^{1,8} + 10^2 + 2 \cdot 10^{1,9}) = \\
 &= 75 - 10 \lg 17995 = 32,4 \text{ дБА.}
 \end{aligned}$$

$$R_{A_{тран}} \approx 32 \text{ дБА.}$$

Из полученного согласно табл. 1 значения величины звукоизоляции окна $R_{A_{тран}} \approx 32$ дБА следует, что данная конструкция окна удовлетворяет нормативным требованиям $R_{A_{тран}}^н = 30$ дБА к звукоизоляции окон для помещений жилых комнат и квартир в домах категории В и для эквивалентных уровней звука у фасада здания $L_{A_{ЭКВ}} = 80$ дБА.

Ответ. Необходимая звукоизоляция окна обеспечена принятой конструкцией для данного окна данного здания.

Второй вариант. Исходные данные: по шумовой карте города эквивалентные уровни звука у фасада данного здания при наиболее интенсивном движении транспорта (дневное время, час «пик») имеем $L_{A_{\text{экв}}} = 80$ дБА; нормативное требование к звукоизоляции окна жилых комнат квартир в домах категории В согласно табл. 1 при $L_{A_{\text{экв}}} = 80$ дБА равно $R_{A_{\text{тран}}}^H = 30$ дБА.

Решение. Надо выбрать такую конструкцию окна, чтобы выполнить соотношение $R_{A_{\text{тран}}} \geq R_{A_{\text{тран}}}^H$. Для этого из табл. 2 определяем необходимую конструкцию звукоизолирующего окна в жилых комнатах квартир в домах категории В, а именно в виде двустенного стеклопакета с формулой остекления 3 + 90 + 6 мм, для которой $R_{A_{\text{тран}}} = 32$ дБА. Эта конструкция обеспечивает необходимую звукоизоляцию.

Представленный выше анализ трех методов определения необходимой звукоизоляции окон жилых и общественных зданий свидетельствует о том, что пока не существует единой общепризнанной методики такого определения.

Первый метод отражает сложившуюся отечественную и мировую практику в строительной индустрии. Он в основном предназначен для жилых и общественных зданий категории В (обеспечение предельно допустимых условий). В частности, к гостиницам категории В относятся те, которые имеют по международной квалификации менее трех звезд. Этот метод, образно говоря, смотрит в лучшее прошлое [3, 6].

Второй метод предназначен в основном для жилых и общественных зданий категории А (обеспечение высококомфортных условий) и категории Б (обеспечение комфортных условий). В частности, к гостиницам категории А

относятся имеющие по международной классификации четыре и пять звезд, к категории Б — три звезды. Он использует лучший опыт в более продвинутых по акустике областях науки и техники, а именно в судостроении [4, 5]. В строительной индустрии второй метод, образно говоря, устремлен в будущее. [3].

Третий метод пытается соединить в упрощенной форме первый и второй методы для широкого использования в существующих условиях. [7], т. е. как бы соединить лучшее прошлое с лучшим будущим. Он предназначен для всех категорий зданий и удобен на раннем этапе проектирования.

Создание единого метода определения необходимой звукоизоляции окон жилых и общественных зданий — задача будущего. Сейчас все три метода имеют право на существование, каждый со своими плюсами и минусами в области рационального применения.

В заключение надо также сказать, как не следует определять звукоизоляцию окон. Не допустимо делать это так, как рекомендовано ГОСТ 24866—99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения». В стандарте основные физические характеристики стеклопакетов указаны в таблице 4. В этой таблице представлены требуемые величины звукоизоляции без указания ее частотной характеристики, что абсурдно физически и бесполезно практически, в том числе, конечно, и для определения необходимой звукоизоляции окна любым методом. Этот «прокол» в части определения необходимой звукоизоляции окон свел на нет стандарт, разработанный в спешке специалистами-стекольщиками в сложнейший период перехода нашей страны от плановой экономики к рыночной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строительные нормы и правила** СНиП 23-03—2003 «Защита от шума» [Текст] / Разработаны НИИ строительной физики РААСН; приняты и введены в действие постановлением Госстроя России от 30 июня 2003г. № 136.

2. **Свод правил по проектированию и строительству** СП 23-103—2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» [Текст] / Разработан НИИ строительной физики, Москов-

ским НИПИ технологии, экспериментального проектирования при участии ЦНИПИ типового и экспериментального проектирования жилища и Московского государственного строительного университета. Одобрен постановлением Госстроя РФ от 25 декабря 2003 г. № 217.

3. **Боголепов, И.И.** Акустика зданий [Текст]: учебное пособие / И.И. Боголепов; предисл. академика РАН Ю.С. Васильева.



4. Справочник по судовой акустике [Текст] / под общ. ред. И.И. Клюкина и И.И. Боголепова. — Л.: Судостроение, 1978. — 504 с.

5. **Боголепов, И.И.** Промышленная звукоизоляция. Теория, исследования, проектирование, изготовление, контроль [Текст]: монография / И.И. Боголепов; предисл. И.А. Глебова. Л.: Судостроение, 1986. — 368 с.

6. **Боголепов, И.И.** Строительная акустика. Общие профессиональные дисциплины в политехническом университете [Текст] / И.И. Боголепов; под науч. ред. В.Н. Козлова. — Вып. 2. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — 323 с.

7. Звукоизоляция и звукопоглощение [Текст]: учеб. пособие / под ред. Г.Л. Осипова и В.Н. Бобылева. — М.: АСТ-Астрель, 2004. — 451 с.

8. **Государственный стандарт** Союза СССР. ГОСТ 27296–87. «Защита от шума в строительстве. Звукоизоляция ограждающих конструкций. Методы измерений» [Текст].

9. Международный стандарт Международной организации по стандартизации [Текст]. ISO 140 Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Акустика. Измерение звукоизоляции в зданиях и элементов зданий.

10. **Государственный стандарт РФ.** ГОСТ Р 53187–2008. «Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий» [Текст].

УДК 628.4

Н.С. Аль-Ахваль, Е.Г. Семин

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ ЙЕМЕНА)

Прирост населения в Йемене, а также индустриализация страны являются причинами ухудшения в ней экологической обстановки. Защита окружающей среды от загрязнения бытовыми отходами — одна из главных санитарно-гигиенических проблем любого государства и мегаполиса [1].

В общей структуре отходов жизнедеятельности большого города твердые коммунальные отходы (ТКО) занимают особое место [2–4].

Отходами называют остатки материалов, изделий, утративших потребительские характеристики, все ненужное, негодное к употреблению, оставшееся в результате жизнедеятельности человека.

Процесс формирования отходов непрерывен и находится в постоянном развитии в зависимости от технического прогресса государства, потребительских возможностей населения и экологической грамотности общества. Существуют различные классификации отходов и определения для различных видов отходов. Например, отходы разделяют по классам опас-

ности (токсичности, пожаро- и взрывоопасности, реакционной способности, содержанию возбудителей инфекционных болезней), источникам образования (промышленные или бытовые), физическим свойствам (твердые, жидкие, газообразные) и другим признакам. Отходы каждого типа обладают особыми свойствами и требуют индивидуального подхода по всем вопросам обращения с ними. Под обращением с отходами подразумевается комплекс действий по сбору, транспортировке, использованию (применению для производства продукции, получению энергии) и обезвреживанию (обработке или изоляции с целью предотвращения вредного воздействия на окружающую среду) [5].

Отходы отрицательно влияют на экологическую обстановку в регионе.

Наличие отходов негативно сказывается на санитарной обстановке, так как они являются источником распространения опасных заболеваний. Скопления ТКО приводят к резкому увеличению количества насекомых, привлекают

бездомных животных, благоприятствуют появлению возбудителей инфекционных болезней и т. д. Установлено, что заболевания тифом, а также поражения печени обусловлены неудовлетворительной эпидемиологической обстановкой в тех районах, где наблюдается низкий социальный уровень. Это подтверждает связь между распространением болезней и уровнем социального надзора, а также между социальным уровнем и экономикой. По статистическим данным, в Йемене в районе аз-Забалин на первом году жизни умирает каждый четвертый ребенок.

Отходы влияют и на пожарную обстановку. В теле полигона в процессе его эволюции при определенных условиях под воздействием микроорганизмов генерируется газ, содержащий до 70 % метана. Образование газа, сопровождающееся неприятным запахом, определяет высокую пожаро- и взрывоопасность.

Определенное влияние наличие отходов оказывает на экономическое состояние. Известно, что только от 4 до 15 % отходов после добычи и технологического передела доходит до потребителя в виде конечной продукции, а использованные и вышедшие из строя товары население отправляет в контейнеры, где ресурсы с их экономической и энергетической ценностью смешиваются и не только теряют потребительскую ценность, но, подвергаясь гниению и окислению, выделяют вредоносные газы и создают микрофлору.

Так, по предварительным данным, с 2008 по 2015 г. население Йемена выбросит в отходы и поместит на свалке ценного сырья на 3 млрд риал (\$ 1 долл. = 200 риал), в том числе 4,1 млн т пищевых органических отходов, 722 400 т пластмасс, 193 200 т металла, 100 800 т кости, 302 400 т текстиля, 344 400 т стекла, 1,4 млн т бумаги. Экономическая целесообразность переработки их очевидна.

Наличие отходов определяет также психологическую и эстетическую обстановку в регионе.

Экотоксичность зависит не только от токсичности компонентов отхода, но и от степени их подвижности в окружающей среде. На рис. 1. представлена сравнительная характеристика состояния экосистемы при использовании различных технологических решений в системе обращения с отходами в Йемене [6].

На основе изучения динамики накопления ТКО за предшествующий период были рассчитаны нормы их накопления на перспективу (табл. 1).

Таблица 1

Нормы накопления ТКО на одного человека в городе Сана (столица Йемена)

Количество ТКО			
в день		в год	
кг	м ³	кг	м ³
0,65	0,00325	234	1,17

Исходя из рассчитанных норм накопления ТКО и прогнозируемой численности населения города Сана, можно определить общее количество ТКО, которое будет накоплено до 2026 г. (табл. 2).

Таблица 2

Прогнозируемое общее количество ТКО в городе Сана

Годы	Численность населения, чел.	Количество ТКО в год	
		т	м ³
2010	2 220 831	519 674	2 598 372
2014	2 531 747	592 429	2 962 144
2018	2 886 192	675 369	3 376 845
2022	3 290 259	769 921	3 849 603
2026	3 750 896	877 710	4 388 548



Рис. 1. Характеристика состояния экосистемы при разных технологических решениях в системе обращения с отходами в Йемене

При несвоевременном вывозе отходов из дворовых сборников они могут загнивать и разлагаться. Уже на третий день в атмосферный воздух выделяются продукты аэробного разложения отходов — толуол, этилбензол, ксилол. Кроме того, при переполнении контейнеров для сбора отходов загрязняется близлежащая территория. При сжигании отходов в контейнерах в атмосферный воздух попадают токсичные соединения в концентрациях, в сотни раз превышающих ПДК: CO — 550 мг/м^3 (ПДК 3 мг/м^3); SO_2 — 150 мг/м^3 (ПДК $0,05 \text{ мг/м}^3$); диоксины — 4 нг/м^3 (ПДК $0,1 \text{ нг/м}^3$). Источники

образования токсичных соединений приведены в табл. 3.

Полигоны для захоронения ТКО, существующие на территории Йемена, в большинстве своем не удовлетворяют природоохранным требованиям и могут быть охарактеризованы как свалки отходов. Подобные места размещения отходов устраиваются на территориях без предварительных гидрогеологических исследований, что не обеспечивает принятие правильных проектных решений по защите грунтовых и поверхностных вод. На них, в частности, отсутствуют системы отвода, сбора и обезвреживания

Таблица 3

Основные источники образования полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД) и дибензофуранов (ПХДФ) в США [7]

Источник эмиссии	I-TEQ _{DF}	Размерность	Количество продуктов в год	
			1995	1987
Сжигание:				
— бытового мусора	38,2	нг/кг	1100	7915
— опасных отходов	3,83	нг/кг	5,7	5,0
— медицинских отходов	589	нг/кг	461	2440
— сточных вод	6,94	нг/кг сухого осадка	14,6	6,0
— покрышек	0,282	нг/кг резины	0,11	0,11
Крематории	17	мкг/тело	9,1	5,5
Автотранспорт:				
— этилированный бензин	45	пг/км пробега	1,7	31,9
— неэтилированный бензин	1,5	пг/км пробега	5,6	3,3
— дизельное топливо	172	пг/км пробега	33,5	26,3
Топка древесиной:				
— бытовая	2	нг/кг	62,8	89,6
— промышленная (с отходами производства бумаги)	0,56–13,2	нг/кг	26,2	25,1
Топка углем в коммунальном хозяйстве	0,079	нг/кг	60,9	51,4
Промышленное сжигание масел	0,20	нг/л масла	9,3	15,5
Производство цемента:				
— при сжигании опасных отходов	1,04–28,58	нг/кг цемента	145,3	109,6
— без сжигания опасных отходов	0,27	нг/кг цемента	16,6	12,7
Регенерация катализаторов нефтепереработки	1,52	нг/баррель продукта (159 л)	2,11	2,14
Реактивирование угля	1,2	нг/кг угля	0,08	0,06
Курение	0,43–2,9	пг/сигарета	0,8	1,0
Печи для уничтожения картона	0,029	нг/кг отходов	2,3	2,0
Природные пожары	2	нг/кг биомассы	208	170

Окончание табл. 3

Источник эмиссии	I-TEQ _{DF}	Размерность	Количество продуктов в год	
			1995	1987
Черная металлургия (агломерат)	0,55–4,14	нг/кг агломерата	25,1	29,3
Производство меди и природного сырья	<0,31	нг/кг продукта	<0,5	<0,5
Переплавка:				
– медного лома	3,6–16600	нг/кг лома	266	966
– алюминиевого лома	21,1	нг/кг лома	27,4	15,3
– свинцового лома	0,05–8,31	нг/кг продукта	1,63	1,22
Производство дихлорметана и винилхлорида	0,95	нг/кг	12,76	
Отбеливание древесной и бумажной пульпы			20,9	370,1
Производство 2,4-дихлорфенокси-уксусной кислоты			28,9	33,4
Осадки бытовых стоков			76,6	76,6
Осадки промышленных стоков			2,6	2,6
<i>Малоизученные источники, предварительная оценка</i>				
Сжигание мусора возле домов	140	нг/кг	1125	
Пожары мусорных свалок	4,0	мкг/человека	1050	
Случайные пожары	66,5	мкг/пожар	48,6	
Дуговые сталеплавильные печи	1,15	нг/кг лома	44,3	
Топка углем:				
– промышленная	0,6	нг/кг	39,6	
– бытовая	6,0	нг/кг	32,0	
Сталелитейные заводы	1,26	нг/кг сырья	17,5	
Бытовые сточные воды	0,29	пг/л	13	
Производство:				
– асфальта	14	нг/т	7,0	
– кокса	0,23	нг/кг угля	6,9	
Топка газом, полученным из органических отходов	1,4	нг/м ³	6,6	
Бытовое сжигание масел	0,15	нг/л	6,0	
Топка биогазом	0,46	нг/м ³	0,22	
<i>Продукция, содержащая диоксины</i>				
Пентахлорфенол			8400	36000
Отбеленная древесная пульпа			24,1	505
Диоксазиновые красители			0,36	64,0
Дихлорметан, винилхлорид			0,02	н.д.

фильтрата; устройство систем отвода и использования биогаза также не практикуется, в результате происходит загрязнение водных объектов, атмосферного воздуха.

Газ на свалках отходов (мусорный газ) возникает при разложении органических отходов и состоит из метана (CH₄), углекислого газа

(CO₂) и азота (N₂). Этот газ выделяется непредсказуемо и бесконтрольно. Опыт показывает, что каждая тонна бытового отхода содержит приблизительно от 150 до 250 кг органических веществ, которые биологически разлагаемы. В условиях ограничения кислорода бактериальное разложение органических веществ

имеет четыре фазы, в результате образуется газ мусорных свалок.

Процесс образования газа мусорных свалок зависит от ряда существенных переменных: состава отходов, слеживания, влажности, покрытия свалки и т. д. Все это оказывает влияние на качество окружения, в котором живут производящие метан микробы [8].

Состав мусорного газа в процессе развития отдельных фаз в европейских странах показан на рис. 2 [5], в Йемене — на рис. 3.

В процессе фазы I собранные на мусорной свалке отходы содержат достаточно кислорода, что способствует аэробному биологическому разложению. Кислород постепенно удаляется в виде CO_2 , а когда он практически исчезает, начинается фаза II.

Фаза II, называемая стадией кислотного брожения в процессе разложения отходов, на-

ступает примерно через 2 недели после начала разложения. В это время целлюлоза, белки и жиры разлагаются, давая выход субстратам, которые далее биологически разлагаются на короткоцепочные жирные кислоты, CO_2 и H_2 . Образование CO_2 и H_2 в процессе этой фазы достигает максимума. На стадии кислотного брожения микробы, ответственные за образование метана при разложении, начинают образовываться в мусорных отходах, где кислород практически полностью отсутствует.

Фаза III разложения отходов начинается, когда возрастает образование биогаза, — через 3–4 месяца. Скорость образования газа стабилизируется в пределах 2–3 лет, и начинается фаза IV.

В процессе фазы IV «газовый реактор» будет поставлять газ постоянного состава длительное время.

Состав газа на свалках отходов показан в табл. 4.

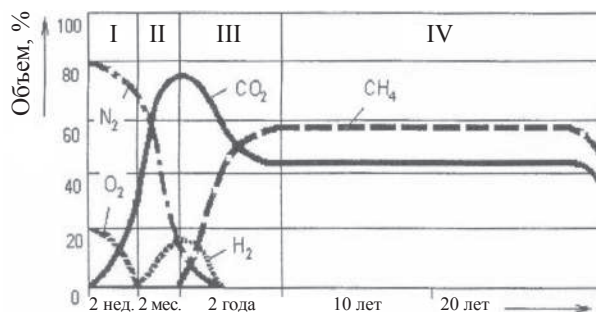


Рис. 2. Состав газа на разных фазах бактериального разложения отходов на мусорных свалках в европейских странах

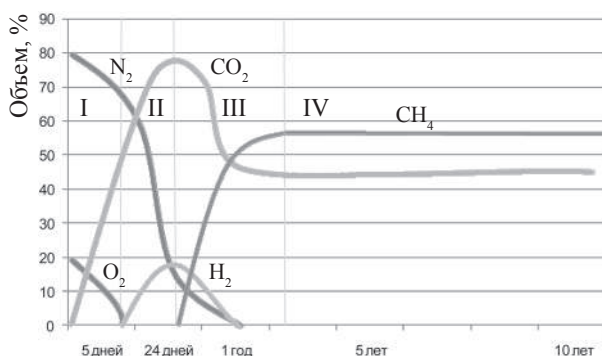


Рис. 3. Состав газа в процессе развития отдельных фаз разложения отходов на мусорных свалках в Йемене

Таблица 4

Характеристика основных компонентов газа на свалках отходов

Компоненты газа	Концентрация, %	Свойства
Метан	40–60	Воспламеним, легче воздуха
CO	Незначительная	Ядовит
CO ₂	20–30	Удушающий, тяжелее воздуха
NO	15–25	—
H ₂ O ₂	Незначительная	—
Аммоний	»	Неприятный запах
SO ₃	»	Имеет запах, ядовит
Кислород	2	—
Пар	Зависит от температуры	—
Другие	Незначительная	Имеют запах

При планировании системы обращения с ТКО в мегаполисе необходимо учитывать не только экономический, санитарный и хозяйственный эффекты, но и соответствие требованиям

экологической безопасности окружающей среды на всех этапах утилизации отходов. Для минимизации нагрузки мегаполиса на окружающую природную среду следует выбирать комплексные методы переработки ТКО, которые в условиях конкретных внешних ограничений обеспечивают минимум энтропии.

При принятии решений в системе обращения с ТКО необходимо учитывать не только величину энтропии. Для выбора рациональной схемы обращения с ТКО в городе Сана следует руководствоваться комплексом критериев для принятия решений: системо-динамическими (Е.Г. Семин, В.В. Гусаров, В.А. Яковлев), эколого-экономическими, ресурсосберегающими, а также критерием оценки риска для здоровья человека (рис. 4) [9].



Рис. 4. Комплексные критерии выбора оптимальных технологических решений в сфере управления отходами [9]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Семин, Е.Г.** Выбор оптимальных технологий переработки твердых бытовых отходов [Текст] / Е.Г. Семин, В.А. Яковлев, Ю.М. Лихачев и др. // Комплексная переработка твердых бытовых отходов — наиболее передовая технология. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — С. 45–61.
2. **Пегова, И.С.** Реконструкция завода МПБО как основа энерго- и ресурсосбережения [Текст] / И.С. Пегова, Е.Г. Семин, Ю.М. Лихачев, М.Л. Федашко // Тр. Междунар. форума ТЭК России. — СПб., 2000. — С. 116.
3. **Гусаров, В.В.** Концептуальные основы выбора приема переработки ТБО [Текст] / В.В. Гусаров, В.А. Яковлев, Е.Г. Семин // Тр. Междунар. форума ТЭК России. — СПб., 2000. — С. 114.
4. **Архипченко, А.И.** Получение высококачественных биокомпостов [Текст] / А.И. Архипченко, О.В. Орлова, Ю.М. Лихачев и др. // Экология и пром-сть. России. — 2000. — Июль.
5. **Федоров, П.М.** Исследование и моделирование биохимических процессов, происходящих на полигонах твердых бытовых отходов [Текст] / П.М. Федоров, Е.Ю. Негуляева, Е.Р. Покровская // Комплексная переработка твердых бытовых отходов — наиболее передовая технология. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — С. 62–70.
6. **Семин, Е.Г.** Статистический анализ кинетики формирования гексаалюмината кальция [Текст] / Е.Г. Семин, Т.И. Бербеницкая, В.В. Гусаров и др. — Л.: Изд-во ЛТИ им. Ленсовета. — ЖПХ. — Деп. В ВИНТИ АН СССР. — 1986. — № 8750-В86.- Юс.
7. **Шелепчиков, А.А.** Загрязнения окружающей среды полихлорированными дибензо-п-диоксинами и диоксиноподобными веществами [Электронный ресурс] / А.А. Шелепчиков. — Режим доступа: <http://www.dioxin.ru>.
8. **Шарыкин, В.Г.** Метан из мусорной свалки: что это? [Электронный ресурс] / В.Г. Шарыкин. — Режим доступа: <http://www.newchemistry.ru>.
9. **Яковлев, В.А.** Концептуальные основы выбора технологии переработки бытовых отходов [Текст] / В.А. Яковлев, В.В. Гусаров, Е.Г. Семин // Городское хозяйство и экология. — 1999. — № 1. — С. 50–56.

10. **Негуляева, Е.Ю.** Оптимизация системы обращения с отходами для защиты геоэкологической среды. Фундаментальные исследования в технических университетах [Текст] / Е.Ю. Негуляева // Мат. Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. 26–27 мая 2004 г. / Междунар. академия наук высшей школы. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. — С. 286–287.

11. **Al-Ahwal, N.S.** Recovery of ceramic compositions with high merits on the basis of slags and fly ashes by burning activated sludge [Текст] / N.S. Al-Ahwal, V.A. Yarcev, E.G. Semin // XXXVI неделя науки СПбГПУ. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. — С. 119–120.

УДК 001

В.И. Антонов

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

*В гранит наук вгрызаться надо смело,
Иначе до вершины не дойти*

Российская система образования формировалась в течение последних двух веков. Ее создавали выдающиеся отечественные педагоги, ученые, общественные деятели. В своей работе они использовали не только положительный опыт западных и восточных цивилизаций, но и особенности нашей многонациональной и самобытной культуры.

Несмотря на некоторую противоречивость, во многом связанную с историческим укладом жизни, в целом образование в большой степени отвечало потребностям общества и государства. Достижения нашей страны во многих областях науки и техники общепризнанны. Мы с полным основанием гордились нашей системой образования.

В течение длительного исторического периода образование относилось к категории «благо» и было важной частью государственной политики. В последнее время его все чаще стали относить к категории «оказание услуг», т. е. оно становится частью рыночных отношений.

Поведение сложных систем, к которым можно отнести и человеческое общество, определяется как детерминированными, так и случайными воздействиями. Рынок позволяет достаточно быстро отслеживать изменения в сфере производства и потребления, однако в большой степени изменяет целевую функцию управления.

Поставив во главу угла извлечение наибольшей прибыли, рынок обращает все меньшее внимание на другие аспекты человеческих взаимоотношений.

Трудно противиться власти денег. Людям, которые их добились, часто начинает казаться, что за деньги можно купить все: любовь, дружбу, общественное признание и т. д. Однако вместо любви, важной частью которой является духовная близость, покупается всего лишь плотское удовольствие, вместо дружбы, предполагающей равенство прав обеих сторон, покупается подхалимаж или слепое подчинение. Если с помощью денег не удастся добиться результата, то возникает желание устранить ненужный объект. Неудивительно, что многие бизнесмены вынуждены обращаться к психиатру.

Привнесение подобной морали в сферу нравственно-духовных отношений чревато серьезными последствиями. Поэтому необходимо принимать меры по устранению перекосов в сфере воспитания. И здесь не обойтись без разумной государственной политики. Необходимо осознавать, что будущее страны определяется не только тем, сколько мы произведем и сумеем потратить, но и тем, насколько устойчивым будет наше государство, общество, из каких индивидуумов оно будет состоять.

Огромную роль в развитии и становлении общества играют образование и наука. Важный аспект системы образования — фундаментальные науки. По-настоящему образованный человек должен уметь донести до слушателя ясно изложенную мысль, не выходя при этом за границы нормативной лексики.

Важную роль в становлении логического мышления играет математическое образова-



ние. Его целью является не только выработка определенных навыков, но и развитие умения отделять главное от второстепенного, абстрагироваться от мелочей. Все эти качества должны сопровождаться тренировкой памяти, постоянными волевыми усилиями по преодолению трудностей.

К сожалению, предпринятая в последние годы реформа школьного образования существенным образом снизила уровень подготовки выпускников. Сосредоточив основное внимание на сугубо второстепенных вопросах, в основном на формах и методах объективного контроля знаний, мы перестали развивать в учениках любовь к самостоятельной творческой деятельности, основанной на знании, а не знакомстве с предметом. Однако, хотим мы того или нет, сама жизнь требует от граждан необходимости постоянного самосовершенствования в сочетании с активной жизненной позицией. В противном случае нам не избежать массовых катаклизмов (техногенных катастроф, дорожных аварий), связанных с непрофессиональным отношением к делу.

Изучение математики не является панацеей от всех бед. Однако математическая грамотность способствует лучшему пониманию сути различных проблем и путей их разрешения. Математическое образование в университете всегда находилось на высоком уровне, и мы рассматриваем это как важное наследство наших предшественников.

В своей работе сотрудники кафедры руководствуются принципами, сформировавшимися в педагогическом коллективе за время его творческого роста. Среди этих принципов хочется упомянуть следующие.

Нет четких границ между отдельными разделами математики. Математика едина по своей сути, и это единство является ее существенной чертой как науки и предмета изучения. Обучение математике как части инженерной культуры нельзя заменить рассмотрением методов решения отдельных задач без учета внутренней логики этой науки. В противном случае специалисты, имеющие необходимость применять математические методы исследования, могут оказаться бессильными при решении задач, требующих развитого абстрактного мышления.

Важным аргументом в пользу чрезвычайной полезности знания математики служит тот

факт, что язык математики, состоящий из знаков и символов, является универсальным языком всей науки. При этом запись, сделанная на языке математики, легко трансформируется в живую речь на родном языке практически без потери смысловой нагрузки.

Сохраняя принцип фундаментальности образования, кафедра активно внедряет в учебный процесс современные технологии обучения и контроля в преподавании высшей математики — письменные экзамены, двухступенчатые экзамены, тестирование. Эти технологии обеспечивают объективную оценку качества усвоения учебного материала, возможность более четкого представления о необходимом уровне усвоения (знания, умения, навыки) той или иной темы, оказывают свое влияние на содержание курсов, на понимание преподавателем необходимости их переработки. На кафедре разрабатываются принципы конструирования тестов, основы их использования, оценки валидности и трудности. По темам 1-го и 2-го семестров уже созданы пакеты тестов, которые активно используются в учебном процессе. Одновременно создается банк заданий по высшей и элементарной математике, на базе которого разрабатываются генераторы тестов. Банк заданий создается в стандартном формате WORD'a, что делает его легко доступным для любого пользователя. К работе по созданию банка в дальнейшем будут подключаться и другие высшие учебные заведения. В перспективе — создание единого для России банка заданий по элементарной и высшей математике.

Принципиальный элемент контроля усвоения материала — экзамен. Проведение экзамена в любой форме требует объективности и непредвзятости при выставлении оценки. Студент должен понять, почему он получил именно эту оценку и что требуется, чтобы ее улучшить. При этом педагогу следует помнить, что перед ним сидит человек с еще не сформировавшимся умом, с определенной, но неустойчивой жизненной позицией. Поэтому время личного общения можно эффективно использовать для того, чтобы привить учащемуся любовь к своему предмету, а не усилить ненависть к нему.

Не будет большой бедой, если экзаменатор заметит, но простит студенту мелкие погрешности в ответе, а не станет его за это ругать.

С другой стороны, вполне разумно увеличение требовательности к качеству ответа студента по мере его продвижения в изучении предмета от семестра к семестру.

Большое подспорье для студентов при изучении курса математики — учебно-методическая литература, издаваемая сотрудниками кафедры. В период с 1993 г. по настоящее время издано более семидесяти учебников и учебных пособий.

Следует констатировать, что уровень математической и речевой культуры выпускников школ неуклонно снижается. Поэтому большинству из них требуется дополнительная подготовка для успешного обучения в университете.

Часть абитуриентов становится студентами на контрактной основе. Среди них есть хорошие ребята, искренне желающие получить образование. Однако немало и тех, кто еще со школы во взаимоотношениях с педагогами унаследовал принцип «а куда вы денетесь?».

К сожалению, часто они бывают правы. Не вдаваясь в анализ того, почему это так, замечу, что подобное отношение к делу никоим образом не способствует созданию в учебных группах рабочей атмосферы. По отношению к таким людям, не имеющим достаточной мотивации к изучению предмета, часто приходится применять принудительное обучение. Это отвлекает силы преподавателей и заставляет выполнять не свойственные им функции. Поэтому одна из основных задач педагога — вовлечение все большего числа студентов в процесс активного усвоения материала.

Важную часть этого процесса составляет формирование единого информационного пространства. В связи с тем, что необходимый объем материала по математике на разных факультетах различен, выделяют несколько блочных структур: технические, физические, экономические, гуманитарные факультеты. Это позволяет согласовать программы по математике, примерный уровень требований, создать единый банк заданий, легче осуществлять замену преподавателей, проводить консультации, прием экзаменов и переекзаменовки.

Математика объективно относится к сложным наукам. Она рассматривает не объекты природы и реальные явления, а абстрактные математические структуры. Конечно, в определенной степени они являются отражением

действительности: производную можно интерпретировать как скорость изменения, интеграл — как работу силы. Однако смысл и содержание математического понятия существенным образом отличается от его конкретного наполнения.

Изучение абстрактных математических объектов требует постоянной и интенсивной работы ума, развитой памяти, пространственного, а не плоского мышления, умения анализировать и делать выводы. В природе мало людей, от рождения наделенных такими качествами. Но абсолютное большинство индивидуумов способно в той или иной степени их развить. Развитие абстрактного мышления одна из задач математического образования.

К важной задаче постановки математических курсов относится тщательный отбор материала. Математика в вузе не является конечной целью образования, поэтому содержание, а также объем лекций и практических занятий необходимо согласовывать с заказчиком — выпускающими кафедрами.

Нельзя не отметить важную особенность таких взаимоотношений. Каждый образованный технический специалист изучал математику и в той или иной степени применял ее в своей работе. Далеко не все, что изучалось, было востребовано, а часть и вовсе забылась. Поэтому, определяя общую направленность курса математики, такие люди искренне верят в то, что именно их собственный жизненный опыт должен служить базой для взаимоотношений с коллегами.

Прислушиваясь к их мнению, которое часто высказывается в довольно категоричной форме, следует напомнить, что обучение математике невозможно без сохранения внутренней логики науки, поэтому, до того как что-то выкидывать или добавлять, желательно подумать о последствиях сделанного выбора. Прежде чем выбирать пути и средства, необходимо четко сформулировать цели и задачи.

В качестве целей любого образования можно рассматривать приобретение знаний и навыков, а также развитие определенных качеств личности, в частности повышение общей культуры. В связи с тем, что момент достижения второй цели практически невозможно определить, в то время как продвижение к первой цели довольно легко можно проконтролировать, часто возникает желание переставить



акценты в пользу развития личности. В случае математического образования крайние варианты такого подхода — чтение так называемых ознакомительных курсов или перегруженность занятий рассмотрением слишком специфических задач и примеров. И то и другое вредно, так как тормозит продвижение к первой цели, более важной для большинства студентов.

Практика работы многих специалистов, получивших высшее техническое образование, показывает, что в результате обучения выпускник должен уметь следующее:

- понять и описать проблему;
- сформулировать задачу;
- определить путь ее решения;
- построить модель;
- найти приемлемое решение;
- проанализировать результат.

Ясно, что ни одна из дисциплин, изучаемых в вузе, в том числе и математика, не гарантирует выработку требуемых компетенций. Многие важные качества личности, такие как развитая интуиция, решительность, умение работать в коллективе, приобретаются не на лекциях и семинарах. Однако несомненно, что сбалансированное образование играет здесь не последнюю роль. А математика служит фундаментом, на котором покоится большинство специальных дисциплин.

Нередко случается так, что человек начинает по-настоящему осознавать пользу образования уже после того, как многие предметы «сданы и забыты». А во время обучения многих мучает каверзный вопрос: «Кому и зачем это надо?».

В рамках сегодняшней программы по математике трудно найти время для рассмотрения многих важных приложений, которые давали бы ответ на вопрос «Зачем?».

Студенты начинают понимать необходимость применения математических методов при изучении специальных дисциплин, в которых рассматривается решение прикладных задач: дифференциальных уравнений — в механике, экологии, лингвистике; частных производных — при тепло-массообмене, упругости; комплексных переменных — в задачах электротехники и радиофизики; статистики — при обработке данных.

При согласовании программ по математике для различных факультетов надо иметь в виду,

что качество математического образования школьников неуклонно снижается. Для того чтобы вывести студентов, особенно на 1-м курсе, на принятый в вузе достаточно высокий уровень, объективно необходимы дополнительные затраты времени. Особенно остро эта проблема встает на практических занятиях. Если мы хотим, чтобы наши студенты знали и умели, а не «проходили», следует им помочь.

В последние годы важным аспектом математического образования становится владение компьютерными технологиями. Влияние компьютера приводит к необходимости частичного пересмотра структуры и содержания курса математики, иной расстановке акцентов в задачах, требующих объемных вычислений.

В 2007 г. кафедра стала выпускающей. Впервые в ее истории были приняты пять абитуриентов по направлению «Прикладная математика и информатика». Руководство кафедрой надеется, что после обучения часть из выпускников будет оставаться работать педагогами и научными работниками.

Математика — одна из самых древних наук. Ее история насчитывает около тридцати веков. Однако, несмотря на свой солидный возраст, в настоящее время она — одна из наиболее бурно развивающихся областей знания. Появляются новые теории и разделы, а некоторые «старые» практически заново отстраиваются на прочном аксиоматическом фундаменте, обогащаются свежими подходами и методами. Нет сомнения в том, что математика, располагая неограниченными возможностями компьютера, успешно продолжит свою верную службу человечеству на тернистом пути технического прогресса.

В этой связи понятно, что роль математики в университетском образовании будет возрастать. В первую очередь в математике будут нуждаться ее старые, проверенные временем «партнеры» — физика, техника и экономика. Кроме того, математические методы начнут активно проникать (и этот процесс уже начался!) в такие области, как социология, психология, филология, археология, медицина, биология и даже история.

Безусловно, влияние компьютера заметно скажется на структуре и содержании курса математики в вузе. Большой вес приобретут те

ее разделы, которые непосредственно связаны с вычислительной техникой — дискретная математика и информатика, методы вычислений. Произойдет более четкое разделение математических курсов по уровню фундаментальной и прикладной направленности.

Однако следует иметь в виду, что численные методы плохо работают в случае быстропротекающих и неустойчивых процессов. Поэтому без развития фундаментальной науки и обучения ее основам все равно не обойтись.

С этой точки зрения теоретическая часть курса будет меняться медленно. Однако практическая ориентация курса математики изменится быстрее и будет непрерывно меняться в большой степени. Практические занятия будут буквально «пропитаны» конкретными содержательными примерами и задачами из соответствующих прикладных областей знаний. Вполне возможно, что в них нарушится привычное для профессионального математика последовательное, логически обоснован-

ное изложение материала и уменьшится число строго доказываемых утверждений.

Все это потребует от преподавателей математики дальнейшего пересмотра своих воззрений на стиль и характер подачи материала, освоения непривычных прикладных областей знаний и современного высокоэффективного компьютерного инструментария. Эта работа уже началась и будет приоритетной на кафедре в ближайшие годы.

Несмотря на солидный возраст большинства сотрудников кафедры, многие из них продолжают работу по совершенствованию математического образования в нашем университете. Математику нельзя отнести к рыночным наукам, поэтому в основном мы можем рассчитывать на поддержку правительства и руководства университета. В настоящее время на кафедре проводится оценка наших потенциальных возможностей с целью объединения усилий для постановки и решения актуальных проблем, требующих применения математики.

УДК 001

В.Д. Комаров

СТАТУС И СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАУК

В современном науковедении интенсифицируется процесс выявления специфики, сущности предмета и эпистемологического статуса технологических наук. Однако в справочных научных изданиях нет характеристики этих наук, хотя определяется содержание понятия «технология» и даже рассматриваются отдельные стороны указанных наук под рубрикой «технические науки», уже завоевавшей свой автономный статус в науковедении. В рамках философии науки порой рассматриваются некоторые общие проблемы технических и технологических наук под синтезирующим названием «технознание» [1].

Знакомство с современной системой классификации наук показывает, что в ней пока не нашлось места «технологическим наукам». Само это имя фигурирует в научном дискурсе, как правило, не в категориальном значении.

Нет явного анализа сущностно-предметного соотношения технологических наук с техническими, гуманитарными, естественными и социальными. Между тем известны факты, говорящие о более раннем формировании технологических наук в сравнении с техническими. Нелепо рассуждать о природе наукоемких «высоких технологий» вне их генетической связи с определенным уровнем развития технологических наук. Более того, современную глобальную научную революцию невозможно постичь без понимания происходящей на наших глазах смены научно-технической революции более высокой по эпистемологическому и историческому статусу научно-технологической революцией (НТЛР). Об этом пойдет речь в заключительной части статьи.

Указанные и иные обстоятельства побуждают науковедов и философов основательно заняться



исследованием истории, статуса, предмета и современного спектра технологических наук.

Следует, однако, отметить, что первое в нашей литературе комплексное исследование развития технологии и технологических наук принял сибирский ученый Виталий Павлович Каширин [2], позже ставший доктором философских наук и профессором [3].

Технологическая реальность и новый эпистемологический фон технологических наук

Всякая наука рождается и развивается как главный источник интеллектуальной рационализации определенного слоя общественной жизни. Научно-рациональная организация практической жизни общества расслаивает преобразуемую действительность на объективную, субъективную и виртуальную реальности. В этом смысле технологическая реальность многослойна и включает на практике всю совокупность процессов опредмечивания производительных сил соответствующего общества. Конкретно-историческая системность такого опредмечивания созидательной деятельности общества в природе выражается в бытии определенного технологического способа производства (ТСП) человеческой жизни. Следовательно, технологические знания как явление субъективной реальности суть источник социальной модификации объективной реальности, которая (модификация) может обретать характер виртуальной реальности. Технологические науки в таком измерении выступают как основной источник качественного изменения общественного бытия.

Вообще технологическая реальность развивается в истории цивилизации под воздействием двух основных факторов, из них определяющий, исходный — это материально-производственные (экономические) потребности общества, а вторичный — эпистемологический, т. е. состояние и возможности науки. Взаимосвязанные качественные изменения обоих факторов в XVII–XX вв. создали такой социокультурный фон, на котором технологические науки начинают даже опережать рост возможностей технических наук. Начинается научно-технологическая революция как системный поворот в развитии технологической и технической реальности.

Наука и основанные на ней высокие технологии стали основным фактором в трансформации экономических и политических отношений. Ведущие страны мира превращаются в информационные общества, т. е. общества, основанные на знаниях. Это связано с ускорением темпов развития науки, о котором свидетельствуют даже цифры статистики. Так, в конце XX столетия профессиональных ученых насчитывалось более 5 млн человек во всем мире. Около 90 % всех научных открытий и изобретений, когда-либо совершенных человечеством, пришлось на XX в. Количество мировой научной информации удваивалось в последнем столетии каждые 10–15 лет. Около 80 % ученых, когда-либо живших на Земле, — наши современники. Стало понятно, что в современном мире благосостояние населения и могущество государства зависят от науки, образования и высоких технологий.

Чтобы улучшить положение в экономике и социальной сфере в России, необходимо изменить государственное и общественное отношение к науке и образованию. Этого не происходит. Проблема отчасти заключается в том, что драматические изменения в развитии науки произошли в 80–90-е гг. XX в. Кроме того, большая часть тех, кто сегодня определяет государственную и общественную политику, уже закончили свое обучение. За это время прошли целые эпохи в развитии молекулярной биологии, биомедицины, нанохимии, идет перманентная революция в области физики и математики информационных технологий и телекоммуникаций. Отсутствие в нашей стране системы непрерывного образования приводит к увеличению разрыва между достижениями науки и осознанием обществом этих достижений.

Наука в начале XXI в. отличается и будет еще больше отличаться от науки середины XX, а тем более XIX в. В настоящее время выделяют несколько (обычно три) аспекта понятия «наука».

Во-первых, наука — это особая форма деятельности, целью которой является производство новых знаний. Следует отметить, что знания приобретаются человеком при любой деятельности, но только в науке новые знания являются целью. Наука стремится исключить из результата своей деятельности все субъективное,

т. е. связанное с индивидуальными качествами исследователя.

Во-вторых, наука — это совокупность особого рода знаний, которые должны отвечать определенным критериям. Эти критерии относятся скорее к процессу получения знания, к научной работе, которая связана со систематичностью, со стремлением обосновать знания посредством многократных проверок через наблюдения и эксперименты, через анализ статистических данных и т. д.

В-третьих, под «наукой» подразумевают совокупность исследовательских институтов, академий, университетов, иными словами определенный социальный институт, который выполняет соответствующие общественные функции.

В-четвертых, некоторые философы науки считают, что по своей рациональной природе наука может рассматриваться как прикладная логика [4].

К концу XIX в. завершается формирование того типа научного знания, который называют классическим и который оказал максимальное воздействие на развитие общественного бытия и сознания в XX в. Это в основном те сведения, что «проходят» в современной средней школе по физике, химии, биологии, математике. Среди ученых до середины XX в. складывалось мнение, что существует некая Истина, которую можно постичь, что вот-вот будет построено единое здание науки и, как следствие, человечество встанет на ясный путь совершенствования бытия. Это ощущение возможности близкой победы в борьбе за всеобщее счастье человечества (с научно-техническим прогрессом как главным оружием победителей) плавно перекочевало в общественное сознание. Наука же перешла в новую фазу развития — постклассическую.

Переход науки из классической фазы в постклассическую связан с изменением основных характеристик научного познания.

Для постклассической науки характерны следующие черты:

признание субъективности, личностной стороны знания, т. е. воздействия познающего субъекта на изучаемый объект;

учет внерационального остатка;

признание господства вероятностно-статистических закономерностей;

новизна объекта изучения (помимо микро- и макро, еще и нано- и мегамиры);

важное общенаучное средство познания — моделирование;

стирание грани между естественными и гуманитарными науками (например, при решении экологических проблем, проблем наркомании);

развитие общенаучных дисциплин (теория систем, синергетика), интеграция гуманитарного и естественнонаучного знания [5].

Последнее десятилетие можно говорить об «информационной» стадии развития постклассической науки в технологической реальности.

Специфика технологических наук проявляется в двух аспектах.

1. Основная масса инженеров (инженеры-конструкторы, инженеры-проектировщики, инженеры-исследователи) использует для решения технических задач теоретические знания в области технических и естественно-математических наук. Их деятельность направлена на совершенствование, создание новой и модернизацию техники как среднего звена технологической триады. Инженеры-технологи, инженеры-организаторы производства, инженеры-экономисты заняты созданием, модернизацией, совершенствованием всей инфраструктуры технологических процессов. Они в своей деятельности используют в прикладных значениях теоретические достижения естественных (инженеры-геологи, инженеры-строители, инженеры-экологи, инженеры сельского хозяйства), гуманитарных (инженеры-психологи, инженеры медицинского профиля, специалисты в области технической эстетики и промышленного дизайна) и социальных (инженеры-социологи, инженеры-экономисты, архитекторы) наук. Иначе говоря, инженер-технолог любого профиля профессионально использует теоретические достижения всех наук, которые причастны к познанию динамики технологической триады.

2. Технологические науки существенно отличаются от технических по предмету и методам. Технологические науки стремятся к постижению существенных связей между всеми звеньями технологического процесса (ЧТ → ТОП → ПТ, т. е. человек трудящийся → техника общественного производства → предмет труда). Посредством знаний о человеке они теснее всех связаны с философскими проблемами взаимодействия человечества и природы. Пред-



мет технологических наук материалистичен по определению. Развитие технологических наук напрямую связано с главной движущей силой цивилизации — производительными силами общества. Именно поэтому технологические науки на сто лет раньше технических наук выходят из исторической фазы преднауки и вступают в фазу классической науки. В методологическом отношении технологические науки раньше технических и других наук вступают в фазу постклассической рациональности (высокие технологии).

В развитии технологических наук особенно важную методологическую роль играет принцип единства теории и практики. Дело в том, что сама «клеточка» технологического процесса (человек — техника — предмет труда) требует комплексного подхода к анализу изменений, которые необходимо внести в обновленный предмет технологической науки, поскольку изменение человека, его способностей и навыков к труду — гуманитарно-антропологическая проблема, изменения в различных видах техники — проблемы технических наук, а изменения в предмете труда — проблемы естественных, экономических и экологических наук.

В целом получается, что качественное или даже рационализирующее преобразование технологического процесса требует специализированного комплексного решения проблемы, на которое способна только технологическая наука в рамках соответствующей отрасли производственной практики. При этом обратим внимание на два обстоятельства: научная рациональность частно-научного решения проверяется экспериментом в рамках соответствующей науки; научная рациональность технологического решения может быть проверена только комплексной производственной практикой.

В свете сказанного можно полагать, что каждая технологическая наука есть динамичная система научных знаний о закономерностях взаимодействия человека, техники и предмета труда в развитии определенного материально-производственного процесса. При таком понимании неразумно говорить о «технологии игры», «технологии воспитания» или «технологии искусства». Во всех подобных случаях дело касается методов преобразования субъективной реальности.

Понимание предмета технологических наук в указанном ракурсе позволяет глубже разо-

браться с проблемой различия предметов технических и технологических наук. Дело в том, что недавно в учебнике по философии науки для аспирантов и соискателей академик В.С. Степин высказал по этому поводу суждения, с которыми трудно согласиться. В одном месте он пишет, что предметом именно технических наук «...выступает техника и технология как особая сфера искусственного, создаваемого человеком и существующего только благодаря его деятельности» [5, с. 140]. Однако известно, что в любом технологическом процессе присутствует предмет труда, имеющий естественное происхождение. Более того, в техническом орудии, используемом какой-либо технологией, всегда имеются элементы структуры, происходящие из природы. Далее В.С. Степин справедливо указывает: «Технические науки вместе с техническим проектированием начиная с середины XIX столетия стали выступать связующим звеном между естественнонаучными дисциплинами, с одной стороны, и производственными технологиями — с другой» [5, с. 142]. Но история преднауки вообще и технологических научных знаний в частности свидетельствуют, что формирование технологических наук началось в конце XVIII в., т. е. раньше технических наук, и что со времен возникновения цивилизованного хозяйства многие технологические процессы существовали без технического посредничества, даже без техники научно-рационального происхождения. Следовательно, бытие техники и бытие технологии связаны с качественно различными видами человеческой деятельности.

В понимании предмета технологических наук значительную эвристическую роль играет период постклассической науки, в который познавательная деятельность человечества вступила во второй половине XX в. Обнаружилась новая магистральная линия единения гуманитарных и технологических наук, что впервые начало осознаваться в системной методологии. Ведь известно, что впервые в философии науки преимущества системного принципа познания выявил и успешно использовал в исследовательской работе великий философ и социолог XIX в. К. Маркс [6].

В XX в. по-новому интерпретировал эвристическую роль системного подхода австрийский биолог-теоретик Людвиг фон Берталанфи

(1901–1972), разрабатывавший общую теорию систем в математическом варианте («Общая теория систем», 1968). Для нашего анализа особенно ценно следующее наблюдение Берта-ланфи над постклассической парадигмой научного познания объективной реальности: если реальность оказалась не только такой, как она представлялась классической науке, «то и образ человека должен отличаться от его образа в мире физических частиц, в котором случайные события выступают в качестве последней и единственной истины. Мир символов, ценностей, социальных и культурных сущностей в этом случае представляются гораздо более реальным, а его встроенность в космический порядок является подходящим мостом между... наукой и гуманитарным мироощущением, технологией и историей, естественными и социальными науками или сторонами любой другой сформулированной по аналогичному принципу антитезы» [7, с. 36]. Системное понимание технологической реальности является развитием общенаучного понятия технологии как совокупности технологических процессов. Именно отсюда начинается путь социально-философской трактовки бытия высоких технологий.

Современное научное понимание технологии носит комплексный характер. В онтологическом значении это практический феномен материального производства, определяемый как «совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции» [8, с. 1200]. В гносеологическом смысле общая технология — это «научная дисциплина, изучающая физические, химические, механические и другие закономерности, действующие в технологических процессах» (Там же).

Научное понимание сущности технологических процессов зародилось в конце XVIII в. (И. Бекманн, 1798), однако научно-философское познание системы технологических процессов общественного производства впервые осуществил К. Маркс. Уже в первом томе «Капитала» он пишет: «Технология вскрывает активное отношение человека к природе, непосредственный процесс производства его жизни, а вместе с тем и его общественных условий жизни и проистекающих из них духовных

представлений» [9]. В марксизме было доказано, что экономические отношения между группами людей опосредуют их практически-преобразовательное (технологическое) отношение к природе, а система самих материально-производственных отношений образует реальный базис социума, на котором сознательно-организованная деятельность людей возводит управляющую подсистему — надстройку.

В марксистско-ленинской теории общественного развития человечества было показано с диалектико-материалистической позиции, что всеобщим основанием (субстанцией) общественного бытия является способ производства материальной жизни людей. В свою очередь, объективным источником развития бытия и сознания (культуры) общества выступает фундаментальное противоречие между производственными силами и производственными отношениями в самой сущности конкретно-исторического способа производства и воспроизводства материальной жизни. Конкретные же для данной общественно-экономической формации характер и уровень развития производительных сил непосредственно оформляются в определенный технологический способ производства материальных благ.

Таким образом, непосредственной формой бытия производительных сил как показателя качественного отношения общества к природе (этому первоисточнику всякого материального богатства) выступает ТСП, а опосредованной формой наличных экономических отношений предстает экономический способ производства материальных благ. Следовательно, основным источником развития производительных сил во всяком социуме становится противоречие между технологическим и экономическим способами производства [7].

Развивая Марксово понимание технологии, советские философы выяснили, что всякий конкретно-исторический «технологический способ производства» есть непосредственная форма бытия производительных сил определенного характера [10, с. 219–229]. Опираясь на марксистскую трактовку сущности производительных сил как созданных обществом факторов преобразования природных сил в материальные блага для человеческой жизни, советские философы и социологи констатировали, что в состав производительных сил любого



общества входят, во-первых, человек (ЧТ) с его способностью и навыками к труду (главная производительная сила) и, во-вторых, орудия труда (ОТ), производственная техника (опосредствующая сила). Пассивным, преобразуемым в процессе труда элементом материального производства выступает предмет труда (ПТ) — природный ресурс и сырье в виде вещества, энергии, информации. Не относясь к составу самих производительных сил, предмет труда входит в состав средств производства путем включения последних в экономические отношения [10, с. 28–34]. Последние становятся системообразующим фактором общественного производства материальных благ и предметных услуг.

Таким образом, макроструктуру всякого технологического способа материального производства образуют в своем единстве две линии трудовых координат: вертикаль ЧТ — ОТ — ПТ и горизонталь ЧТ₁ — ЧТ₂ — ЧТ₃... (ЧТ — человек трудящийся). Все технологические процессы протекают в пространстве между этими символическими линиями, а фактором, формирующим фигуру материально-трудового процесса в социуме, является существующая в данном обществе система экономических отношений, т. е. экономический способ производства.

Из всего сказанного следует, что организационно-управленческие взаимосвязи первой линии («технологические связи») и подобные взаимосвязи второй линии («технологические отношения») субстанционально не входят в состав системообразующих экономических отношений. Это «незаметное» для многих социологов, экономистов, историков и философов обстоятельство и обуславливает несостоятельность давнишней концепции «технологического детерминизма» в объяснении закономерности общественного развития. Неявное отождествление структур экономического и технологического способов производства в некоторых постмарксовых трудах Ф. Энгельса способствовало возникновению среди толкователей марксизма (от начала XX в. и до сих пор) тенденции подменять глубокую научность марксистского социального детерминизма плоской и вульгарно-материалистической концепцией «экономического / технологического детерминизма». Такая подмена социально-философских понятий порождает немало несостоятельных обвинений и недоразумений

в адрес марксистов со стороны идеологов антикоммунистического толка.

Итак, научно-философская методология устанавливает, что предмет технологических наук — при учете всех взаимосвязей — не тождествен предметам экономических, технических, гуманитарных, естественных наук.

Высокие технологии как продукт постклассической научной рациональности

Формирование классической науки в ходе первой глобальной научной революции (XVII–XVIII вв.) было источником появления такого прогрессивного качества технологических процессов общественного производства жизни, как наукоемкость. По существу, этим понятием стала обозначаться способность технологической реальности обогащаться научно-рациональными технологическими связями в результате использования достижений сначала естественно-математических, а затем социальных и гуманитарных наук.

В начале XX в. научной общественностью России технология понималась как «наука о способах и средствах переработки сырых материалов в предметы потребления». В Малом энциклопедическом словаре издания Брокгауза и Ефрона (СПб., 1909) говорилось, что технология «разделяется на техническую, занимающуюся изменением формы сырых веществ, и химическую, занимающуюся изменением состава веществ». Соответственно к первой отнесены были «различные механические производства, машиностроение, судостроение и проч.», а ко второй — «обработка животных и продуктов, производство питательных продуктов ..., текстильная, химическая, металлургическая промышленность» [11, с. 17–19]. По содержанию этого определения видно, что речь шла тогда о технологических науках классического типа в той мере, насколько они были развиты в России. Исходя из состояния сельского хозяйства, промышленности, транспорта и науки России начала XX в. можно понять, что технологические науки не имели еще самостоятельного статуса и входили в состав технических наук или пребывали в статусе прикладного естествознания.

В современном научном понимании технология есть, во-первых, «совокупность методов

обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции» и, во-вторых, это — «научная дисциплина, изучающая физические, химические, механические и другие закономерности, действующие в технологических процессах» [8, с. 1200]. В первом смысле имеются в виду деятельные виды бытия технологических процессов, а во втором — разнообразные научные формы рациональности познания, проектирования и осмысления этих процессов. Методологический ключ к пониманию человека-деятельного единства онтологического и гносеологического смыслов технологии как культурного феномена цивилизации дал К. Маркс еще в середине XIX в.

Исходя из указанных источников *научно-го* понимания технологии как в онтологическом, так и в гносеологическом аспектах можно ввести обобщающее понятие технологической реальности с учетом современного состояния технологического бытия производительных сил человечества.

Технологическая реальность — это вся совокупность практических процессов предметного освоения природы с помощью производительных сил цивилизованного общества, которые (процессы) обычно систематизированы в конкретно-историческом технологическом способе производства (ТСП). Следовательно, технологическая реальность предстает как материально-предметный фундамент общественного бытия.

В макромасштабе историческое развитие технологической реальности представлено сменой типичных технологических способов производства (об этом явлении и понятии см. в [10]), пребывающих в основаниях первичной, вторичной и третичной общественно-экономических формаций. Для первичной формации цивилизованного воспроизводства материальной жизни общества характерен ремесленно-земледельческий ТСП, во вторичной формации господствует индустриальный ТСП, а в период возникновения (становления) третичной общественно-экономической формации на основе глобализации хозяйственной жизни человечества формируется информационный / постиндустриальный ТСП [9].

Решающей силой эволюции указанных способов активного отношения человека к приро-

де был *социальный интеллект* как выражение управляющей функции общественного разума [13]. Донаучный тип рациональности связан с первым ТСП цивилизованного общественного развития, а исторические типы научной рациональности связаны соответственно со вторым ТСП, где использовались достижения классической науки, и с третьим ТСП, где новый тип рациональности обеспечивает постклассическая наука [14]. Мой анализ показывает, что исторически первой интерпретацией законов классической науки применительно к производственной практике было возникновение технологической науки (в конце XVIII в.), а второй подобной интерпретацией можно считать формирование статуса технических наук из аргументов в пользу различия статусов технологических и технических наук.

Следует отметить, что внимание к философским и социологическим аспектам технологических наук усилилось в пору обострения экологических проблем современности. Относительно спокойное, эволюционное накопление технологических научных знаний шло в XVI–XVIII вв. (в Европе), когда элементы классической науки стали проникать в сельское хозяйство, строительство, полиграфию, медицину, особенно в ходе развития мануфактурного производства. Видимо, это был завершающий период в накоплении бессистемных научно-технологических знаний («преднаука»). Массовое промышленное использование паровых машин различного типа по мере формирования индустриального общества обусловило не только техническую революцию, но и вторую в истории цивилизации технологическую революцию (первая обусловила переход от присваивающего к производственному хозяйству). Именно технологическая революция в западноевропейском хозяйстве обусловила систематизацию и качественный скачок в росте научно-технологического знания. Видимо, можно считать, что труды немецкого инженера-технолога и ученого рубежа XVIII–XIX вв. И. Бекманна по общей технологии и были началом классического периода в развитии технологических наук (1798), как писал об этом В.П. Каширин.

С социологической точки зрения важно видеть противоречивую структуру факторов, образующих любой ТСП. Вертикаль ТСП образуют многообразные взаимосвязи человека тру-



дящегося, технических орудий материального производства (ТП) и природных или полуфабрикатных предметов труда. Такова модель технологических связей любого вида материального производства (ЧТ → ТП → ПТ). Горизонтальную структуру ТСП образуют отношения между людьми, занятыми в исходном (добывающем) технологическом процессе (ЧТ₁), трудящимися, занятыми в технологических процессах обрабатывающей промышленности (ЧТ₂), и трудящимися, доводящими готовый продукт до потребителя через торговую и транспортную системы производства (ЧТ₃ и ЧТ₄). Так образуется модель технологических отношений. Как видим, исходным узлом «системы координат» является «человек трудящийся», или главная производительная сила любого общества (ЧТ₁ → ЧТ₂ → ЧТ₃ → ЧТ₄). В подобном моделировании ТСП эпистемологически решающим становится вопрос о характере научной рациональности, определяющий качество и практическую эффективность такой организации производственного труда в соответствующем обществе [10].

Как известно, в общественном развитии действует, историческая закономерность возрастающей роли культуры. В особой степени этот фактор свойствен науке как специфической области социального разума. «Если в индустриальную эпоху роль науки была важной, то в информационной цивилизации она становится ведущей» [15, с. 20]. В ходе научно-технической революции XX в. такая роль особенно заметно стала принадлежать технологическим наукам, коим присущ комплексный характер. Последний выражается в том, что в концептах технологической науки органически соединяются научные знания о «человеке деятельном», материальной технике и качественно определенном предмете труда. Всех их интегрирует в ходе практически-преобразовательного процесса праксиологическое знание как научное знание о «хорошей работе» (Т. Катарбинский).

Здесь нам важно опереться на базовое методологическое положение научной философии, которое касается целесообразной природы рациональности. Ведь дело в том, что источником целеполагания в человеческой деятельности может быть и объективность («законы внешней природы»), и социальная субъективность

(потребности человека). С точки зрения науки рациональность человеческого действия обусловлена объективным движением природно-общественных процессов (действительное, по Гегелю, должно быть разумным). С рассудочно-практической точки зрения разумно то, что удовлетворяет наличную человеческую потребность (разумное, по Гегелю же, должно стать действительным). В этом свете практическая технология (с ее методом проб и ошибок) целесообразна субъективно и удовлетворяет требованиям частной (региональной) разумности, а научно-теоретическая технология (с прогностической гарантией) целесообразна по определению и удовлетворяет требованиям всеобщей социальной (родовой) разумности.

В эйфорических оценках процесса становления постиндустриального общества порой нивелируется роль вещественно-энергетических ресурсов. На этом фоне выделяется своей реалистичностью позиция питерского социолога Светланы Ивановны Дука, которая пишет: «Информационные ресурсы ценны не только сами по себе, хотя они и обладают в настоящее время огромной самостоятельной ценностью. Информация представляет собой наиболее значимый ресурс для *материального* производства. Без материального производства ни одно общество существовать не может» [15, с. 18].

Дело в том, что в нарастающей степени информационный ресурс присутствовал во всех исторических технологических способах производства наряду с вещественными и энергетическими процессами. Однако роль и качество его были различными в эпохи аграрного и индустриального типов материального производства. Картина изменилась с середины XX в., когда, как справедливо отмечает Светлана Иванова, «...в индустриальные технологические процессы стали встраиваться новые ресурсы: знания и информация. Информация является более широким понятием, чем знание, и в принципе их можно объединить в одно понятие «информационные ресурсы»... Знания и информация — основные ресурсы информационного общества, но это вовсе не означает, что остальные ресурсы теряют свое значение, как считают многие исследователи» (Там же).

Более того, стоит заметить, что исторически знания и информация всегда были составляющими массовых технологических процессов.

Донаучные практические и теоретические знания, ритуально-рецептурная информация присущи производству всех доиндустриальных обществ. Классическое научно-теоретическое знание и систематизированная технологическая информация присущи индустриальному обществу. В постиндустриальном обществе наука и информация разных видов (естественная, социальная, техническая, коммуникационная) становятся решающими факторами развития общественного развития общественного производства. «Таким образом, — пишет С.И. Дука, — ключевое значение в современном обществе имеют информационные ресурсы, информа-

ционная инфраструктура, во взаимодействии с которыми материальные ресурсы становятся эффективнее» [15, с. 20].

В этом аспекте важно определить, чем специфичны *технологические науки* и как научная социология технологических отношений влияет на выявление *социологических проблем* технологических наук.

Вкратце можно определить, что технологические науки суть системы научных знаний о закономерностях функционирования и развития технологического способа производства благ в определенной отрасли материальной жизни общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов, Б.И.** Философские проблемы технoзнания [Текст] / Б.И. Иванов. — СПб., 1998.
2. **Каширин, В.П.** Философские проблемы технологии [Текст] / В.П. Каширин. — Томск, 1988.
3. **Каширин, В.П.** Общая теория технологии и технологических наук [Текст] / В.П. Каширин // Наука и технология. Красноярск, 1992.
4. **Никифоров, А.Л.** Философия науки: история и теория [Текст] / А.Л. Никифоров. — М., 2006.
5. **Степин, В.С.** Философия науки. Общие проблемы [Текст] / В.С. Степин. — М., 2006.
6. **Кузьмин, В.П.** Принцип системности в теории и методологии К. Маркса [Текст] / В.П. Кузьмин. — М., 1976.
7. **Von Bertalanffy, L.** General System Theory [Текст] / L. von Bertalanffy // General System. 1962. — Vol. 7.
8. Большой энциклопедический словарь [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова, М., СПб., 2004.
9. **Маркс, К., Энгельс Ф.** Соч. [Текст] / К. Маркс, Ф. Энгельс. — 2-е изд. — Т. 23.
10. Материалистическая диалектика [Текст]: В 5 т. — Т. 4. Диалектика общественного развития. — М.: Мысль, 1984.
11. Малый энциклопедический словарь [Текст]: В 4 т. / репринт. изд. Брокгауза и Ефрона. — М.: Терра, 1997. — Т. 4.
12. **Гринин, Л.Е.** Производительные силы и исторический процесс [Текст] / Л.Е. Гринин. — Волгоград, 2003.
13. **Комаров, В.Д.** Социальный интеллект и его управленческий потенциал [Текст] / В.Д. Комаров // Общественное призвание философии. — М., 2006.
14. **Гудожкин, Г.С.** Общественно-производственная технология как научная категория [Текст] / Г.С. Гудожкин // Вестник МГУ. — Сер. Философия. — 1986. — № 6.
15. **Кастельс, М.** Информационная эпоха: Экономика, общество, культура [Текст] / М. Кастельс. — М., 2000.



УДК 351.86

И.И. Корбутов, Г.И. Снопков

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВУЗОМ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ МИРНОГО И ВОЕННОГО ВРЕМЕНИ

Для обеспечения управления в условиях повседневной деятельности, при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций и ведении военных действий создается система управления гражданской обороной (ГО), включающая органы и пункты управления, системы оповещения и связи, и также автоматизированную информационно-управляющую систему [1, 6].

Управление будет успешным лишь в том случае, если оно отвечает требованиям устойчивости, непрерывности, твердости, гибкости и оперативности, и система управления находится в высокой степени готовности.

Подготовка системы управления ГО образовательных учреждений включает: подготовку органов управления ГО; создание системы пунктов управления; создание и поддержание в готовности технических систем связи и оповещения.

Пункты управления (ПУ) — один из основных элементов системы управления ГО образовательных учреждений.

Система ПУ включает размещенные на территории основные, запасные и дублирующие ПУ начальников ГО, органов, осуществляющих управление ГО, штатными формированиями ГО в целях наиболее эффективного выполнения задач ГО [2].

Пункты управления могут быть городскими и загородными, защищенными и не защищенными, они создаются на всех уровнях и во всех звеньях ГО образовательных учреждений.

Пунктами управления ГО называются специально оборудованные или приспособленные и оснащенные техническими средствами сооружения, помещения либо их комплексы, а также транспортные средства, предназначенные для размещения и обеспечения устойчивой работы органов управления в особый период или при проведении мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [3].

Для качественного управления вопросами защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также в особый период согласно «Рекомендациям по проектированию запасных пунктов управления» (штаб ГО СССР 1987 г.), ПУ должны иметь средства связи, которые обеспечивают [5]:

прием сигналов оповещения по сети проводного вещания города (района);

управление средствами оповещения ГО объекта;

телефонную связь (городскую) с вышестоящими органами управления, организациями города, районами эвакуации, формированиями ГО, подчиненными структурными подразделениями;

внутреннюю телефонную связь на ПУ (ОЭ);

телеграфную связь;

факсимильную связь;

прием информации из радиотрансляционной сети, звуковых каналов телевидения;

передачу информации по сети громкоговорящей связи;

радиосвязь с соответствующими органами управления ГОЧС, загородными зонами;

закрытие передаваемой информации, представляющей государственную и ведомственную тайну.

В настоящее время в условиях повседневной деятельности управление структурными подразделениями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (далее — университет), штатными формированиями ГО осуществляется через центр по делам ГО и ЧС (штаб ГО).

Штаб ГО:

разрабатывает и своевременно корректирует план действий по предупреждению и ликвидации ЧС природного и техногенного характера, план ГО, а также план основных мероприятий университета в области ГО, предупреждения и ликвидации ЧС, обеспечения пожарной

безопасности и безопасности людей на водных объектах;

обеспечивает готовность сил и средств объектового звена Санкт-Петербургской территориальной подсистемы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС, нештатных формирований ГО к действиям по назначению;

организует работу Комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности на территории Санкт-Петербурга (далее — КЧС и ПБ) и эвакуационной комиссии университета по выполнению мероприятий в установленные сроки [4].

Данные вопросы центра по делам ГО и ЧС решаются через уполномоченных на факультетах, в институтах и других структурных подразделениях университета.

Уже выполнен большой объем работ по созданию командного пункта управления, разработан комплект документов, согласованных с Северо-Западным Региональным центром МЧС России, Главным управлением МЧС России по Санкт-Петербургу и Министерством образования и науки РФ, регламентирующих его деятельность, а также документация по гражданской обороне в военное время и защите от чрезвычайных ситуаций.

Структурно созданный пункт управления университета состоит из четырех основных элементов, это:

ЦУКС — центр управления в кризисных ситуациях (рабочее место начальника ГО и председателя КЧС и ПБ, рабочее место начальника штаба ГО, зал заседаний КЧС и ПБ, переговорные);

узел связи;

оперативное отделение;

отделение жизнеобеспечения.

На наш взгляд, проект по созданию запасного пункта управления (далее — ЗПУ) должен отвечать соответствующим структурным и техническим требованиям, а именно:

1) *к топологии ЗПУ* — (необходимо максимально использовать исходную топологическую схему канализационных коллекторов);

2) *информационной устойчивости функционирования ЗПУ* следует предусмотреть единое рабочее место органов управления, возможность получения любым пользователем пол-

ного набора имеющихся на ЗПУ услуг (причем система управления должна обеспечивать возможность создания приоритетов пользования услугами ЗПУ), использование специальных аппаратно-программных средств, для исключения несанкционированного доступа (т. е. защиту информации как на программном, так и на аппаратном уровне). Узел связи должен обеспечивать постепенное увеличение количества связей и наращивание мощности всего ЗПУ. При этом ЗПУ должен обеспечивать возможность архивирования баз данных, их восстановление и защиту;

3) *используемым на ЗПУ технологическим решениям* — они должны обеспечивать высокоскоростную передачу данных, передачу данных посредством электронной почты, обмен графической информацией, обмен речевой информацией (телефонная связь, мультимедиа, аудио-конференции, диспетчерская связь, различные режимы оповещения), прием информации сети радиовещания, передачу сигналов телеметрии, охранной и пожарной сигнализации, контроль состояния окружающей среды на территории университета, мониторинг возможных чрезвычайных ситуаций на территории университета, пожарно-охранную сигнализацию;

4) *оборудованию ЗПУ* — наличие необходимых сертификатов соответствия Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации; обеспечение необходимого уровня технической поддержки и сервиса фирмы-изготовителя; сокращение количества фирм — поставщиков оборудования с целью обеспечения совместимости аппаратных и программных средств ЗПУ;

5) *электроснабжению и заземлению* — активное оборудование, установленное на ЗПУ, должно быть подключено к сети электроснабжения 220 В, 50 Гц, ЗПУ должен иметь два независимых ввода электроснабжения для автоматического переключения режимов работы или, в случае невозможности этого, необходимо укомплектовать его источником бесперебойного питания и источниками резервного питания;

6) *по расширению и модернизации ЗПУ* — все стратегически важные технические решения, связанные с применяемыми технологиями, используемым оборудованием, методами организации информационного обмена, расчетами кабельных сетей, необходимо принимать с уче-



том возможного развития ЗПУ, закладывая в их основу принципы модульности, масштабируемости, гибкости.

Предусмотренное оборудование должно отвечать современным требованиям, иметь возможность расширения и модернизации. Рабочие места руководящего состава следует оснастить персональными компьютерами, а зал КЧС и ПБ — ноутбуками и плазменной демонстрационной панелью с возможностью вывода на экран необходимой информации со всех рабочих мест, а также о состоянии окружающей среды и данных мониторинга возможных чрезвычайных ситуаций на территории университета;

7) *обеспечению развития ЗПУ* на основе перспективных принципов, применении новейших телекоммуникационных технологий, получивших признание на международном рынке и позволяющих обеспечить постоянное развитие ЗПУ.

На узле связи ПУ следует использовать оборудование, позволяющее наращивать сеть связи, увеличивать ее пропускную способность.

При расчете распределения абонентской (пользовательской) емкости узла связи ЗПУ необходимо заложить резерв для ее развития, определенный в системном проекте;

8) *к узлу связи ЗПУ*, который должен быть основным центральным узлом коммутации каналов и линии связи (далее — ЦУК) всего ЗПУ. В ЦУКе должна быть сосредоточена, кроме узлового коммутационного оборудования, система управления всем ЗПУ.

Каждый абонент (пользователь) узла связи ЗПУ должен иметь возможность получения услуг, в число которых входят телефонная связь (прием и передача речевой информации); прием и передача данных, в том числе и графической информации, как с отдельных персональных компьютеров, так и с рабочей станции в составе локальных сетей; электронная почта; прием видеоинформации и вещательного телевидения; режим громкоговорящего оповещения; режим речевой диспетчерской службы; режим конференц-связи; прием информации сети радиовещания; доступ к средствам радиосвязи, в том числе сотовой (транковой); передача сигналов охранной и пожарной сигнализации.

Абоненты (пользователи) узла связи ЗПУ должны иметь возможность доступа к глобальным (в том числе международным) информаци-

онным ресурсам, к сетям любых операторов связи, действующих в Санкт-Петербурге и Москве (городским, междугородным, международным).

9) *по подключению к сетям связи общего пользования, ведомственным сетям* — необходимо обеспечить подключение ЗПУ к каналам (трактам) в нужном объеме для представления городской и междугородней связи с выходом в международный телефон, а также к международной сети Интернет, к локальной сети университета, к выделенным (коммутируемым) каналам связи с учреждениями органов власти, силовых ведомств и др.

Актуальную проблему сегодня представляет оснащение пунктов управления современными техническими средствами, создание инфраструктуры управления и жизнеобеспечения.

ЗПУ оборудован техническими средствами оповещения, аппаратурой связи (городская телефонная связь), радиостанцией «Гранит», которая работает в радиосети ГО района и города, установлены факсимильный и телефонные аппараты, имеются радио- и телевизионные приемники, видеомagneтофон. Также ЗПУ оснащен персональными компьютерами с подключением к локально-вычислительной сети университета, плазменной демонстрационной панелью. В перспективе планируется оснащение современной мобильной связью.

Для ЗПУ университета требуется:

1. Оборудование автоматизированной системой оповещения «город — район — руководящий состав университета — руководящий состав факультетов (институтов) — аудитории университета», с управлением от дежурного администратора (приемная ректора университета) и с защищенного ПУ, с подключением к Санкт-Петербургской территориальной подсистеме оповещения Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

2. Создание системы связи «Министерство образования и науки — Федеральное агентство по образованию — пункт управления Северо-Западного региона — учебные заведения региона и города».

3. Создание системы автоматизированного контроля за состоянием окружающей среды на территории университета (экологическая и радиационная обстановка, наличие боевых отравляющих веществ и АХОВ).

4. Разработка программ по защите сотрудников и студентов в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени.

5. Обеспечение независимого резервного питания.

В соответствии с поручениями Президента и Правительства Российской Федерации МЧС России совместно с МВД и ФСБ организовали выполнение мероприятий по мониторингу и созданию Общероссийской комплексной системы информирования и оповещения населения в местах массового пребывания людей (далее — ОКСИОН) [7]. Такая система в 2007 г. была создана в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

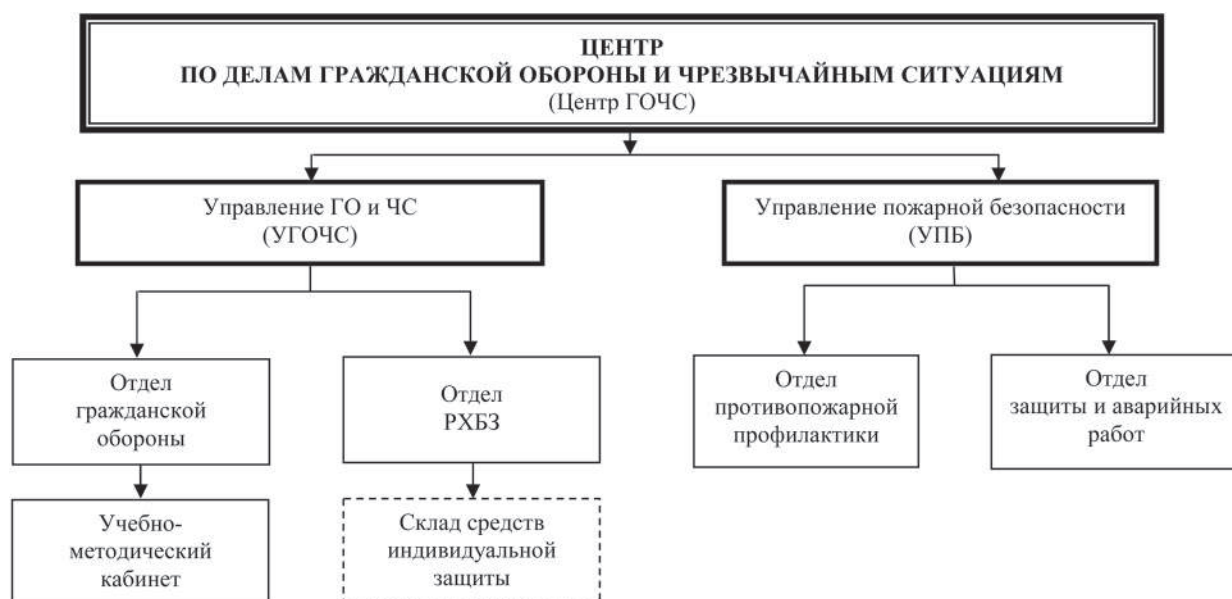
Цель создания системы мониторинга и ОКСИОН — подготовка сотрудников и студентов университета в области гражданской обороны, защиты от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и охраны общественного порядка, а также своевременное оповещение и информирование сотрудников и студентов о чрезвычайных ситуациях и угрозе террористических акций, оценка обстановки и состояния правопорядка в местах массового скопления людей. И все это — на основе использования современных технических средств и технологий.

В области гражданской обороны в особый период (при переводе ГО с мирного на военное положение) будет обеспечена непрерывность управления, поступления информации, сигналов оповещения и т. д.

Создание в нашем университете системы мониторинга в местах массового пребывания сотрудников и студентов будет значительно способствовать формированию культуры безопасности жизнедеятельности, повысит эффективность проводимых мероприятий и информирования всего университетского контингента, станет одним из факторов обеспечения стабильного учебного процесса в университете в целом.

С целью повышения эффективности управления в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени и ее мобильности при решении вопросов пожарной безопасности, а также в соответствии с рекомендациями ГУ МЧС России по Санкт-Петербургу было принято решение о реорганизации Управления по делам ГО и ЧС в Центр по делам ГО и ЧС.

Созданный Центр по делам ГО и ЧС включает два управления: по делам ГО и ЧС и пожарной безопасности (см. рисунок). В результате внесенных структурных изменений значительно повышается мобильность управления решением задач в области ГО, защиты от чрезвычайных ситуаций, пожарной безопасности и радиационного контроля.



Структура центра по делам ГО и ЧС



Таким образом, формирование системы управления ГО, которая должна действовать в условиях повседневной деятельности, при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций и при ведении военных действий, повы-

сит эффективность управления вузом во всех чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени, а также мобильности при решении вопросов пожарной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** организации оповещения и информирования органов управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям и населения о чрезвычайных ситуациях природного, техногенного и военного характера» [Текст]: Метод. пособие / МЧС России. — М., 1998.

2. **Постановление Правительства Санкт-Петербурга** от 20.11.1999 года № 1309 «О порядке создания убежищ и иных объектов гражданской обороны» [Текст].

3. **Распоряжение администрации Санкт-Петербурга** от 24.09.2001 года № 849-ра «Об утверждении порядка создания в Санкт-Петербурге убежищ и иных объектов гражданской обороны» [Текст].

4. **Распоряжение губернатора Санкт-Петербурга** от 22.02.2000 года № 182-р «О создании

Санкт-Петербургской территориальной подсистемы оповещения Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» [Текст].

5. **Рекомендации** по проектированию запасных пунктов управления [Текст] / Штаб ГО СССР. — М., 1987.

6. **Приказ МЧС России** от 14.11.2008 г. № 687 «Об утверждении положения об организации и ведении гражданской обороны в муниципальных образованиях и организациях» [Текст].

7. **Постановление правительства Санкт-Петербурга** от 07.02.2008 г. № 120 «О порядке сбора и обмена в Санкт-Петербурге информацией в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [Текст].

УДК 58:001.89:061.6:608

Ф.П. Кесаманлы

П.С. ЭРЕНФЕСТ, Д.С. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ И А.Ф. ИОФФЕ — ОСНОВАТЕЛИ ПЕРВЫХ ТРЕХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ В ПЕТЕРБУРГЕ — ПЕТРОГРАДЕ — ЛЕНИНГРАДЕ

К началу XX в. за границей уже давно существовали научные институты и научные школы, в которых велась широкая, хорошо налаженная работа по физике. Они имели свою специализацию, сложившиеся традиции, свое лицо. Они пользовались признанием, в них съезжались молодые ученые из разных стран, из разных городов. В качестве примера можно привести основанную в 1871 г. Дж. Максвеллом Кавендишскую лабораторию при Кембриджском университете и действующую в ней научную школу по физике Дж. Дж. Томсона.

В Петербурге в это время физические исследования велись на кафедрах университета и других высших учебных заведений. Однако научной школы физиков не было, если под таковой понимать более или менее значительную группу молодых ученых, работающих на научные темы, заданные профессором из области, специально им разрабатываемой, и в лаборатории, оборудованной для этих работ. В тогдашней России такая школа была только в Москве у профессора Петра Николаевича Лебедева (1866–1911).

В Петербургском университете профессорами физики в то время были двое выдающихся ученых, — И.И. Боргман (1849–1914) и О.Д. Хвольсон (1854–1934), вписавших славные страницы в историю русского просвещения. Они много работали, много печатались и были хорошо известны у нас и за границей. Каждый из них кроме научных достижений, имел заслуги перед Университетом и русской физикой. Иван Иванович Боргман, создатель Физического института при университете, был одним из первых популяризаторов идей Максвелла и Фарадея в России, автором первого, самого серьезного курса электричества и магнетизма на русском языке в трех томах (вышло три издания этого курса), выдающимся ректором университета и общественным деятелем. Орест Данилович Хвольсон — автор шеститомного курса физики, переведенного на многие европейские языки и получившего мировую славу. Не менее известен Орест Данилович и как автор крылатой фразы «Я прекрасно понимаю разницу между академиком и почетным академиком — она такая же, как между „государь” и „милостивый государь”». Так он сказал, когда его, члена-корреспондента Петербургской Императорской академии наук с 1895 года, в 1920 году избрали почетным членом РАН. Но научной школы ни тот, ни другой не создали.

Не создали научной школы ни профессор Николай Григорьевич Егоров (1849–1919), первый учитель Д.С. Рождественского (1876–1940) в области оптики, работавший в Военно-медицинской академии и читавший лекции по спектральному анализу в университете; ни профессор Николай Александрович Гезехус (1845–1918), работавший в Технологическом институте; ни профессор Владимир Владимирович Скобельцын (1864–1947), создавший оснащенную современными приборами физическую лабораторию в Политехническом институте, в которой начал вести исследования в 1906 году А.Ф. Иоффе после возвращения из Германии, где он работал у Рентгена.

Крупный ученый-оптик и историк физики член-корреспондент АН СССР Торичан Павлович Кравец (1876–1955) писал: «В первом десятилетии нашего столетия три человека особенно много потрудились над тем, чтобы объединить петербургских физиков. Это прежде всего П.С. Эренфест, который в то время приехал из-за границы (был женат на русской — Т.А. Афанасьевой) и сделал чрезвычайно много, чтобы объединить русских петербургских физиков и зажечь в них интерес, слабо представленный тогда к теоретической физике. Вторым и третьим надо на равных



И.И. Боргман (1849–1914)



О.Д. Хвольсон (1854–1934)



началах называть А.Ф. Иоффе и Д. С. Рождественского». Крупнейшая заслуга этих трех ученых перед петербургской и русской физикой состоит в том, что они заложили в Петербурге — Петрограде основы первых научных школ, которые окончательно оформились в Ленинграде после Октябрьской революции. Эренфест заложил основы научной школы в области теоретической физики, Рождественский и Иоффе — в области экспериментальной физики.

К научной школе Эренфеста принадлежали В.Г. Бурсиан, Г.Г. Вейхард, Ю.А. Крутков, Я.И. Френкель. В.А. Фок наряду с Д.С. Рождественским считал своими учителями В.Р. Бурсиана и Ю.А. Круткова.

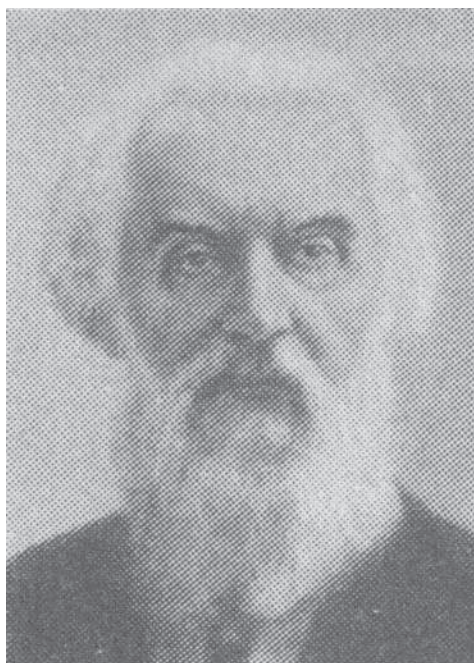
Школу Рождественского представляли А.А. Лебедев, В.П. Линник, И.В. Обреимов, А.Н. Теренин, В.А. Фок, Е.Ф. Гросс, С.Э. Фриш и др.

Самая многочисленная научная школа была у А.Ф. Иоффе. С ней были связаны А.П. Александров, А.И. Алиханов, Л.А. Арцимович, П.Л. Капица, И.К. Кикоин, Г.В. Курдюмов, И.В. Курчатов, П.И. Лукирский, Н.Н. Семенов, Ю.Б. Харитон, Я.И. Френкель, Я.Г. Дорфман и многие другие.

Об истории возникновения этих школ и будет идти далее речь в этом очерке.



Н.А. Гезехус (1845–1918)



Н.Г. Егоров (1849–1919)



В.В. Скобелыцын (1864–1947)

Павел Сигизмундович Эренфест (1880–1933), крупный физик-теоретик, родился в Вене, в 1904 году окончил Венский университет; известны его работы по общим проблемам статистической механики, квантовой теории и термодинамики и теории относительности.

В 1905–1907 годах жил в Геттингене, в 1907 году переехал в Петербург, где активно трудился в Русском физико-химическом обществе и редакции журнала этого общества, один год (с 1 января 1909 года по 1 января 1910 года) работал в Политехническом институте доцентом и читал курс дифференциальных уравнений. Приводим здесь отзыв А.Ф. Иоффе об этом курсе: «И что это был за курс! Математика, не отделимая от физики, математика как метод проникновения в механизм явлений, как средство обобщения аналогичных процессов. Казалось, вся физика становится прозрачной в свете новых „эренфестовских“ лучей». С Иоффе Эрен-

фест познакомился в 1905 году в Мюнхене. В Петербурге они быстро подружились и даже выполняли совместные научные работы.

В годы пребывания Эренфеста в Петербурге (1907–1912) вокруг него группировалась вся талантливая молодежь. Он организовал у себя на дому воскресный физический семинар-кружок и все эти годы регулярно проводил его. Постоянными участниками семинара были и Иоффе, и Рождественский. Именно этот семинар сыграл главную роль в возникновении и развитии современной теоретической физики в Петербурге. Такой школы в Петербурге не доставало. Поэтому Эренфеста по праву можно назвать основателем современной теоретической физики в Петербурге.

Очень хорошо о времени пребывания Эренфеста в Петербурге и его роли в развитии физики в Петербурге написал А.Ф. Иоффе: «Мы оба жили в Петербурге, но далеко друг от друга —



Основатели первых трех научных школ по физике в Петербурге — Петрограде — Ленинграде.
Слева направо: П.С. Эренфест, А.Ф. Иоффе, Д.С. Рождественский

я в Лесном, а он на Аптекарском острове. Два раза в неделю мы обсуждали интересовавшие нас вопросы физики — обычно у него на квартире, иногда при участии других физиков. А в промежутке между встречами он ежедневно посылал мне письма в 6–12 страниц с изложением своих мыслей и вычислений. Эти письма сохранились у меня и сейчас.

Способность Павла Сигизмундовича к критическому анализу и строгой физически ясной формулировке оказала большое влияние на мое научное развитие. Ему же было обязано зарождение в Петербурге современной теоретической физики»

В России, которую он любил, среди русских физиков, с которыми он подружился, Эренфесту не нашлось места. Он вынужден был принять в 1912 году предложение уходящего в отставку великого Г. Лоренца занять его место профессора Лейденского университета.

Эренфест остался верным другом советских физиков, с которыми не порывал связи ни на

один день и которым помогал всеми доступными ему средствами.

В 1921 году Эренфест, имевший широкие связи среди заграничных ученых, сильно помог А.Н. Крылову, Д.С. Рождественскому и А.Ф. Иоффе восстановить нарушенные во время блокады научные связи с европейскими учеными. Более того, он даже мобилизовал их на сбор для советских физиков библиотеки вышедших за годы блокады физических книг и журналов.

Благодаря Эренфесту многие советские физики получили возможность выполнять научные исследования в Лейдене у него, Г. Камерлинг-Оннеса и В. Де Гааза в единственной в те годы криогенной лаборатории. В Лейдене работали И.В. Обреимов, И.Е. Тамм, Л.В. Шубников, О.Н. Трапезникова, В.М. Чулановский, Ю.А. Кругов, А.Н. Арсеньева-Гейль и др.

Эренфест многократно бывал в Советском Союзе и очень много помог И.В. Обреимову и другим в организации Украинского физико-технического института в Харькове в 1929–1933 годах.



Кружок теоретической физики П.С. Эренфеста, 1912 г. На переднем плане Д.С. Рождественский. Сидят (слева направо): П.С. Эренфест, неизвестный, неизвестный, Т.А. Афанасьева-Эренфест; стоят: В.Р. Бурсиан, А.Ф. Иоффе, Ю.А. Кругов, В.М. Чулановский, Л.Д. Исаков, А.А. Добиаш, Я.Р. Шмидт, К.К. Баумгарт

Отношения Абрама Федоровича Иоффе и Дмитрия Сергеевича Рождественского друг к другу определялись тем, что у них было много общего. Оба начали свой научный путь в начале XX века с большой экспериментальной работы, выполненной успешно и получившей признание. Оба стремились привлечь к научной работе молодежь, вокруг них начали группироваться ученики. Оба, став профессорами, организовали научные семинары, пользующиеся популярностью в Петрограде. Каждый из них организовал в Петрограде научно-исследовательский институт, ставший гордостью советской науки. Настроение обоих было созвучно революционной эпохе. Президиумом АН СССР учреждены премии: имени Д.С. Рождественского — за лучшие работы в области оптики, и имени А.Ф. Иоффе — за лучшие работы в области физики.

Дмитрий Сергеевич Рождественский (1876–1940), крупный физик-экспериментатор в области оптики и организатор науки, родился в Петербурге, в 1900 году окончил Петербургский университет и был оставлен в нем для подготовки к профессорскому званию (без стипендии). Одновременно он поступил лаборантом (по современным понятиям — ассистентом) в Военно-медицинскую академию к Н.Г. Егорову.

После кратковременных стажировок у О. Винера в Лейпциге (1901–1902) и у П. Друде в Гиссене (1903) Д.С. Рождественский возвратился в Петербург и стал лаборантом в Физическом институте университета, начав первым из молодых русских ученых самостоятельные исследования. Для научной работы он избрал тему по аномальной дисперсии в парах натрия, в 1909 году разработал изящный и эффективный метод ее изучения, так называемый метод крюков, принесший ему широкую известность и научное признание. Этот метод стал классическим, он позволил поставить и решить большое количество задач.

В 1912 году Дмитрий Сергеевич после защиты магистерской диссертации на тему «Аномальная дисперсия в парах натрия» был утвержден в должности приват-доцента Университета и получил право читать специальные курсы и руководить дипломными работами выпускников. Он резко изменил тематику дипломных работ, которая стала предусматривать экспери-

ментальные разработки неисследованных или малоисследованных вопросов оптики.

Его первыми учениками в 1913–1915 годах были Л.Д. Исаков, В.М. Чулановский, И.В. Обреимов, А.А. Лебедев, Д.В. Скобельцын и др.

В 1915 году Рождественский защитил докторскую диссертацию на тему «Простые соотношения в спектрах щелочных металлов», был избран профессором и назначен директором Физического института при университете.

В Физическом институте он организовал семинар, который пользовался широкой популярностью в Петрограде. Его участниками были А.Ф. Иоффе, читавший в Университете курс общей физики для естественников (и руководивший работами Н.Н. Семенова, Н.А. Зоннабенда, П.И. Лукирского, Н.М. Гудрис и Л.Е. Куликовой, Н.Д. Папалекси, В.А. Анри), и все ассистенты (Г.Г. Вейхард, В.Р. Бурсиан, Е. Бодарэу, В.И. Павлов, А.П. Афанасьев, К.К. Баумгарт, М.М. Глаголев), а из Политехнического — А.И. Тудоровский, П.Л. Капица (дипломник А.Ф. Иоффе). На нем заслушивались и обсуждались рефераты обзорного характера по актуальным вопросам физики, а с 1916 года — также и результаты выполненных в институте работ.

По инициативе Рождественского 15 декабря 1918 года Советским правительством было издано постановление об основании Государственного оптического института. Для нового института требовались помещение, кадры и оборудование.

Вначале Оптический институт размещался на территории Физического института университета. В дальнейшем институту было представлено несколько зданий, которые постепенно были освоены.

К работе были привлечены научные работники, занимающиеся в той или иной степени оптикой. Но нужны были и молодые кадры. И вот для того чтобы их подготовить, Рождественский ввел новое начинание: он отобрал студентов, которые обещали стать хорошими физиками, и определил их в лаборанты при мастерских с основным требованием — учиться, учиться и учиться. Надежды Дмитрия Сергеевича оправдались.

Яркий пример того, как Д.С. Рождественский готовил сотрудников для созданного им в 1918 году Государственного оптического ин-

ститута из студентов Университета, приведен в воспоминаниях одного из представителей его научной школы — члена-корреспондента АН СССР С.Э. Фриша:

«В конце декабря 1918 года перед самыми каникулами во время занятий в лаборатории ко мне подошел Карл Карлович и предложил поступить на работу в только что организованный Оптический институт на должность лаборанта. Это предложение было для меня неожиданным и очень лестным. Речь шла не просто о лаборантском месте, а о включении в группу студентов, которую Дмитрий Сергеевич решил подобрать, чтобы подготовить будущие кадры научных работников нового института.

Дмитрий Сергеевич с присущей ему принципиальностью понимал, что для обеспечения работы Оптического института надо не только собрать уже имеющихся физиков, но и позаботиться о подготовке молодых специалистов. В Университете в то время студентов было мало, учиться из-за общих тяжелых материальных условий было трудно. Поэтому Дмитрий Сергеевич решил подобрать при новом институте группу лаборантов, хорошо их обеспечить

и заставить работать и заниматься по специальной программе, которая позволила бы создать из них серьезно подготовленных научных работников.

Зачислен в штат Оптического института я был в январе 1919 г. Всего было принято 12 студентов, которые назывались лаборантами при мастерских, хотя непосредственного отношения к мастерским ГОИ не имели. Нашим общим куратором, или, как мы его называли, «дядькой», был К.К. Баумгарт. Но Дмитрий Сергеевич и сам уделял много времени нашей группе. Он вызывал каждого из нас к себе на беседу и составлял программу занятий, несколько разнообразя ее в соответствии со степенью подготовленности и личными склонностями лаборанта. Эти беседы Дмитрия Сергеевича проводил очень обстоятельно, не жалея времени. Помню, как я пришел к нему в кабинет, помещавшийся тогда в первом этаже Физического кабинета Университета. Дмитрий Сергеевич сидел на вращающемся стуле за большим письменным столом конторского типа. Взглянув на меня довольно строго поверх очков, он предложил сесть и рассказать, как я предполагаю



Профессора и преподаватели Петроградского университета (1915 г.). Сидят (слева направо): К.К. Баумгарт, Д.С. Рождественский, В.В. Лермантов, Н.А. Булгаков, О.Д. Хвольсон, А.Ф. Иоффе, М.М. Глаголев, Г.Г. Вейхарт; стоят: А.П. Афанасьев, И.И. Портнягин, С.А. Боровик, Т.М. Глаголев, К.Ф. Нестурх, Ф.Я. Гульбис, С.М. Горленко, С.И. Златницкий, Л.В. Мысовский, Н.А. Нарышкин, А.В. Улитовский, П.И. Лукирский, Н.А. Юрьев, И. Филиппов, Шалауров, Н.И. Добронравов, А.А. Лебедев

заниматься в предстоящем семестре. Я перечислил лекции и лабораторные занятия, которые собирался посещать.

— Бросьте, — сказал Дмитрий Сергеевич, — на лекции не ходите.

— Как, ни на какие?

— Ни на какие!

— И на ваши тоже не ходить?

— И на мои не ходите. А на семинарские занятия обязательно ходите и лабораторные работы ведите аккуратно. По моему же курсу помогайте подготавливать демонстрации.

Потом Дмитрий Сергеевич спросил меня, какие я знаю иностранные языки. Я знал немецкий и французский. Услышав это, он сказал:

— Надо выучить еще английский, и не откладывая. Каждый физик должен уметь читать по своей специальности, по крайней мере, на трех иностранных языках. Научиться этому нетрудно. Романы читать труднее, но это ваше дело, хотите ли вы читать романы. А вот читать научные статьи вы обязаны и должны этому научиться скоро — больше трех месяцев на изучение языка тратить не стоит.

Потом он взял лист бумаги и написал на нем список книг по физике, почти все на иностранных языках, в том числе и на английском, которые мне надлежало проработать. Сюда входили книги и по теоретической физике — «Физика эфира» Друде, «Тепловое излучение» Планка, «Электронная теория» Лоренца — и книги по прикладной оптике. В общем, список получилсь внушительный.

— Уточните с Карлом Карловичем, — сказал Дмитрий Сергеевич, — в какие сроки вы проработаете эти книги и сдадите по ним зачеты.

Затем, снова посмотрев поверх очков, но на этот раз широко улыбаясь, отчего его лицо стало приветливым и даже добрым, он прибавил:

— Ну, когда вы это проработаете, станете довольно образованным человеком по физике, более образованным, чем прослушав наши университетские лекции».

Из бывших лаборантов получились известные ученые: академики В.А. Фок и А.Н. Теренин, члены-корреспонденты Академии наук СССР Е.Ф. Гросс и С.Э. Фриш, профессора В.К. Прокофьев, А.И. Стожаров и др.

Основное стандартное научное оборудование было куплено за границей в большом по тем временам количестве. Для изготовления

нестандартного оборудования при Оптическом институте были организованы механическая и оптическая мастерские.

Абрам Федорович Иоффе (1880—1960), крупный экспериментатор в области физики твердого тела и полупроводников, организатор науки, родился в городе Ромны Полтавской губернии. В июне 1902 года он окончил механическое отделение Санкт-Петербургского технологического института императора Николая I со званием инженера-технолога. Но его очень интересовала физика и он решил посвятить ей всю свою будущую жизнь. Для этого он отправился в Мюнхенский университет к Рентгену. Там Абрам Федорович начал серьезно заниматься научной деятельностью. Через три года, 5 июня 1905 года, защитив диссертацию на тему «Упругое последствие в кристаллическом кварце» с наивысшей оценкой, вернулся в Санкт-Петербург.

В Санкт-Петербурге он по приглашению профессора В.В. Скобелевича в 1906 году начал работать по найму лаборантом (по современным понятиям — ассистентом) в Физической лаборатории Политехнического института. С самого начала своей преподавательской деятельности он был активным сторонником принятой в СПбПИ системы обучения, основанной на широко поставленных самостоятельных практических и лабораторных занятиях студентов. Впоследствии Абрам Федорович начал развивать эту систему обучения и стал активно привлекать студентов к участию в научно-исследовательской работе. Выпускник электромеханического отделения ППИ 1919 года Капица опубликовал свои первые работы в «Журнале Русского физико-химического общества» в 1918 году, будучи еще студентом.

Абрам Федорович в 1906—1915 годы выполнил экспериментальные исследования по подтверждению квантовой теории внешнего фотоэффекта А. Эйнштейна, доказательству зернистой природы электричества (электрического заряда), определению магнитного поля катодных лучей. На их основе подготовил магистерскую диссертацию «Элементарный фотоэлектрический эффект. Магнитное поле катодных лучей, опытное исследование», которую успешно защитил в Петербургском университете 9 мая 1913 года. Параллельно он продолжал начатые в лаборатории Рентгена работы по

упругим и электрическим свойствам кварца и некоторых других кристаллов, обобщив которые, 30 апреля 1915 года защитил докторскую диссертацию «Упругие и электрические свойства кварца». Она опубликована в «Известиях СПбПИ».

Защита докторской диссертации давала Иоффе право занимать профессорское место, и он подал заявления для участия в конкурсе на замещение вакантной должности профессора по кафедре физики в Петроградском университете. Несмотря на то что Иоффе один баллотировался на эту должность, он не собрал большинства голосов на заседании Совета физического факультета и не был избран.

В те годы согласно штатному расписанию в Политехническом институте было одно место профессора физики, которое занимал В.В. Скобелцын. Одновременно он был и директором института. Это дало ему возможность добиться второй вакансии профессора, и 28 октября 1915 года Совет Петроградского политехнического института избрал А.Ф. Иоффе ординарным профессором.

В 1916 году А.Ф. Иоффе организовал в Политехническом институте на базе Физической

лаборатории семинар по новой физике, в котором приняли участие все его ученики: И.К. Бобр, Н.И. Добронравов Я.Г. Дорфман, П.Л. Капица, М.В. Кирпичева, К.Ф. Нестурх, Н.Н. Семенов, Я.И. Френкель, Я.Р. Шмидт, А.П. Ющенко. В их числе был и П.И. Лукирский.

Среди участников семинара самой старшей была Милитта Владимировна Кирпичева (1887–1923), окончившая химический факультет Бестужевских курсов. А самой опытной — Ядвига Ричардовна Шмидт (1889–1940), которая окончила Женский педагогический институт по естественному факультету, отделу физики и химии. С 1910 года она преподавала физику в женской гимназии Л.С. Таганцевой с перерывами для совершенствования за границей. Так в 1911 году она работала в лаборатории лауреата Нобелевских премий по физике за 1903 год и по химии за 1911 год М. Склодовской-Кюри в Париже, а в 1913–1914 годах — в Манчестерском университете (Англия) в лаборатории лауреата Нобелевской премии по химии за 1908 год Э. Резерфорда. Распрощаться с Манчестером ее заставила Первая мировая война. Но школа Кюри и Резерфорда не прошла для нее даром. По результатам, полученным в лаборатории



Семинар А.Ф. Иоффе (осень 1916 г.). Стоят (слева направо): К.Ф. Нестурх, Н.И. Добронравов, П.И. Лукирский, А.Ф. Иоффе, Я.И. Френкель, П.Л. Капица, Н.Н. Семенов; сидят: Я.Г. Дорфман, Я.Р. Шмидт, И.К. Бобр, М.В. Кирпичева, А.П. Ющенко

Резерфорда, она в 1914–1915 годах опубликовала в журнале *Philosophical Magazine* две статьи. Статьи в журнал представлял Э. Резерфорд. В 1960-х годах в беседе с В.Я. Френкелем Петр Леонидович Капица (1894–1984), комментируя фотографию участников семинара, сделанную им осенью 1916 года, подчеркнул: «Ядвига Ричардовна Шмидт-Чернышева была первой русской, работавшей у Резерфорда в его манчестерский период. И ее рекомендательное письмо, которым я заручился, отправляясь в 1921 году за границу, сыграло свою роль в решении Резерфорда взять меня к себе на работу». Самым молодым участником семинара был Яков Григорьевич Дорфман (1898–1974) — студент-политехник.

Участники семинара — «семинаристы», как они тогда себя в шутку называли, — были преданными науке молодыми людьми. Собирались они раз в неделю по четвергам в шесть часов вечера в библиотеке Лаборатории физики, в дальнем крыле главного корпуса. Кто-нибудь выступал с обстоятельным докладом, потом начиналось обсуждение. Оно затягивалось иногда до поздней ночи, и только опасность идти в город пешком — трамваи по ночам не ходили — заставляла прерываться на полуслове. Впрочем, не замолкали и расходясь — «городские» доспаривали на трамвайной остановке и в полупустом последнем трамвае. Дождаться его не хватало терпения, а поскольку и тут возникали разногласия — ждать или идти пешком, Лу-

кирский предложил теорию, где статистически рассмотрел вероятность встречи с трамваем на разных остановках.

Впоследствии практически все участники семинара стали видными учеными: Капица, Семенов и Лукирский — академиками, первые два еще и лауреатами Нобелевской премии, Френкель — членом-корреспондентом, Добролюбов, Дорфман, Шмидт и Ющенко — докторами наук, Нестурх тяжело заболел и был только кандидатом наук. Кирпичева рано (в 1923 году) умерла. Об И.К. Бобр мало что известно: удалось установить только имя (ее звали Ирена) и то, что она училась в университете.

В стенах Физической лаборатории Политехнического института осенью 1918 года зародился Физико-технический институт. До 1923 года и территориально он размещался в помещениях Физической и Электротехнической лабораторий. Основное ядро сотрудников института вначале составляли «семинаристы». Почти одновременно с ФТИ в Политехническом институте был основан физико-механический факультет, настолько тесно связанный с ним, что академик И.В. Обреимов впоследствии писал: «Институт и факультет — две стороны одной медали».

В заключение автор выражает благодарность профессору А.А. Юринову и доценту В.Б. Ступаку за поддержку и помощь при подготовке рукописи очерка к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баумгарт, К.К. Выдающийся физик — профессор О.Д. Хвольсон [Текст] / К.К. Баумгарт // *Электричество*. — 1953. — № 1. — С. 62–64.
2. **Воспоминания** об академике Д.С. Рождественском [Текст]. — Л.: Наука, 1976. — С. 168.
3. **Голоушкин, В.Н.** Иван Иванович Боргман [Текст] / В.Н. Голоушкин // *УФН*. — 1951. — Т. 44. — Вып. 2. — С. 255–283.
4. **Елисеев, А.А.** Выдающийся русский физик (Н.Г. Егоров) [Текст] / А.А. Елисеев // *Природа*. — 1939. — № 12. — С. 103–107.
5. **Кесаманлы, Ф.П.** Роль Физической лаборатории Политехнического института в со-

здании научной физической школы в России [Текст] / Ф.П. Кесаманлы, С.Н. Колгатин, В.Б. Ступак // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. — 2000. — № 2 (20). — С. 114–123.

6. **Кесаманлы, Ф.П.** В.В. Скобелцын — основатель Физической лаборатории Санкт-Петербургского политехнического института [Текст] / Ф.П. Кесаманлы, В.Б. Ступак // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. — 2000. — № 3 (21). — С. 169–174.

7. **Кокин, Л.** Юность академиков [Текст]: Документальная повесть / Л. Кокин. — М.: Советская Россия, 1981. — 240 с.



8. **Константинов, Б.П.** Развитие ленинградской школы физики [Текст] / Б.П. Константинов // Вестник АН СССР, 1967. — № 11. — С. 93–104.
9. **Кравец, Т.П.** От Ньютона до Вавилова [Текст] / Т. П. Кравец. Л.: Наука, 1967. — С. 348.
10. **Кесаманлы, Ф.П.** Научная школа А.Ф. Иоффе и ее значительные достижения [Текст] / Ф.П. Кесаманлы // Очерки о выдающихся физиках — выпускниках СПбГПУ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — С. 6–10.
11. Основатели советской физики [Текст]. — М.: Просвещение, 1970. — 224 с.
12. **Соминский, М.С.** Абрам Федорович Иоффе [Текст] / М.С. Соминский. — М.; Л.: Наука, 1965. — 644 с.
13. **Френкель, В.Я.** Пауль Эренфест [Текст] / В.Я. Френкель. — М.: Атомиздат, 1971. — 144 с.
14. **Фриш, С.Э.** Сквозь призму времени [Текст] / С.Э. Фриш. — М.: Изд-во политической литературы, 1992. — 420 с.
15. **Храмов, Ю.А.** Научные школы в физике [Текст] / Ю.А. Храмов. — Киев: Наукова думка, 1987. — 400 с.
16. **Якобсон, И.И.** Русский физик Н.А. Гезехус [Текст] / И.И. Якобсон // Природа. — 1949. — № 7. — С. 70–76.

УДК 1:572:008

С.Н. Борисов, Е.В. Переверзев

ТЕРРОРИЗМ: ИДЕНТИЧНОСТЬ И ДИСКУРС

Осмысление проблемы идентичности в свете сложного комплекса современных представлений о терроризме, как правило, уходит на второй план относительно системы религиозных, политических и иных причин, позволяющих рассматривать терроризм как глобальное социальное явление. В этой связи характерным признаком современных философско-культурологических и социально-гуманитарных подходов к феномену терроризма является позитивистский, структурный подход.

Вместе с тем современный комплекс дискурсных теорий предлагает ряд интегративных форм, позволяющих, на наш взгляд, осветить проблему идентичности субъекта и терроризма с новых позиций.

Во-первых, дискурс-анализ предлагает себя в качестве междисциплинарной платформы для новых форм взаимодействия между сферами философско-культурологических и социально-гуманитарных знаний [7].

Во-вторых, дискурс-анализ исследует связь между дискурсом и обществом, основываясь на позициях критического реализма и социального конструкционизма. При этом он фокусирует исследовательские стратегии в области процессуальности социальных феноменов, рассматривая их не как объекты реального мира, а как динамичные процессы социального конструирования в дискурсе.

В-третьих, дискурс-анализ позволяет установить связь между социальными факторами идентичности и процессами, формирующими субъективность. Последнее положение напрямую затрагивает область, рассматриваемую в данной работе, и, следовательно, требует некоторых предварительных замечаний.

В частности, рассматривая дискурс-анализ с точки зрения его потенциала для исследова-

ния идентичности, хотелось бы отметить следующие моменты:

1. Дискурс в данной работе принято понимать как исторически сформированную когерентную последовательность высказываний, которые с течением времени закрепляются в обществе и, будучи восприняты, могут оказывать влияние на мышление, поведение и убеждения субъектов.

2. Дискурс-анализ в данной работе принято рассматривать не как систему практических методов изучения дискурса, а как социально-конструктивистскую интеллектуальную парадигму, в основе которой лежит восприятие социальных процессов и объектов через призму генеративного потенциала дискурса.

Идентичность: классическая парадигма

Ранние упоминания о проблеме идентичности датируются XVI в. и определяют идентичность «identitie» в терминах качества или условия сохранения собственной сущности, целостности и природы, а также в терминах «абсолютной самости и единства», т. е. как комплекса стойких убеждений субъекта относительно характеристик собственного Я [5, с. 18]. Характерное для ранних упоминаний описание идентичности в терминах завершенной совокупности психических черт в целом соответствует направлению философских представлений о природе душевных явлений того времени [5, с. 18].

Развитие идей об идентичности субъекта как о завершенном статичном явлении продолжается, по мнению ряда исследователей, и в эпоху Возрождения, впоследствии приобретая завершенность в философии Декарта и Локка в эпоху Просвещения [5, с. 19]. В частности,



Декарт формирует представления о рационально мыслящем и самосовершенствующемся субъекте, а Локк развивает представления о происхождении субъективности на основе опыта, а не априорного мышления. Исследователь Ч. Тэйлор отмечает, что фокусирование на рефлексивных способностях субъекта в отрыве от ряда аспектов субъективного опыта у Локка оказывает решающее воздействие на формирование последующих представлений о возможностях рационального воздействия субъекта на собственную идентичность путем осмысленных действий — отсюда весь корпус современной литературы, описывающей способы изменения себя.

Современные представления об идентичности как «настоящем», «истинном» «Я» субъекта, «Я», которое можно утратить, обрести или сформировать по собственному вкусу, окончательно формируются в эпоху Романтизма. По мнению Тэйлора, эпоха Просвещения со свойственными ей тенденциями в области рационализма и эмпиризма во многом обеспечила появление устойчивых социальных форм априорного индивидуализма, столь характерного для западной техногенной цивилизации [9]. Романтизм дополняет комплекс уже сформировавшихся представлений об устойчивой внутренней идентичности идеями о гармоничном единении между идентичностью как внутренним «Я» субъекта и природой как его внешним «Я». Тэйлор утверждает, что именно к этому периоду возможно отнести формирование нарративно «настоящем», «подлинном» Я, к которым столь часто прибегают в современной рекламе и маркетинге в целях формирования определенных потребительских идентичностей [9, с. 369—370].

Идентичность: от психоанализа к дискурс-анализу

Основой для развития альтернативных представлений об идентичности, на которые, в частности, опирается данная работа, послужили работы З. Фрейда и Ж. Лакана. Так, основываясь на исследованиях Й. Брейера, Фрейд сформулировал первичные гипотезы о формировании и функционировании психики субъекта [4]. Им были выдвинуты идеи о стадиях развития психики у ребенка, о взаимодействии

сознания и бессознательного, природе психических расстройств, а также о том, какую роль в их устранении может играть язык. На основе идей Фрейда о природе и функциях субъективности возникли два противоречивых психоаналитических течения. В одном из них Э. Фромм и К. Хорни объединили психоаналитическую концепцию с рассмотренными выше классическими представлениями о субъекте и идентичности, сформировав направление «эго-психология». В другом Ж. Лакан выдвинул идею о структурном подобии языка и бессознательного. Развивая свою концепцию под лозунгом «Назад к Фрейду!», Лакан сформулировал аргументы в пользу единых оснований для языка и бессознательного с точки зрения того, что оба феномена имеют семиотическую природу. По мнению Лакана, бессознательное «разговаривает» с субъектом на языке символов, и само безумие может быть описано как попытка коммуникации [8]. Лакан утверждает, что подобно тому, как дискурс формирует нескончаемую цепь последовательно связанных метафор, субъект всегда колеблется между самоопределением и тем определением, которое ему дают окружающие. Следовательно, по логике Лакана, с одной стороны, субъект существует только в процессе репрезентации, будучи лишенным имманентных истинных черт, истинной идентичности, а с другой — никакая репрезентация не в состоянии охватить субъект целиком. По этой причине каждый субъект оказывается втянут в сложный процесс самоопределения и соотношения с тем, как нас определяют окружающие. Эго не стабильно и постоянно формируется в репрезентациях, а бессознательное (как и сознание) не существует вне языка и не является «местом дискурса другого». Напротив, оно имплицитно в речь и поступки субъектов. В некотором смысле, идентичность возможна лишь в том случае когда субъект имеет представления о том, как его определяют другие, идентичность в этом смысле дискурсивна, процессуальна, нефиксируема [3].

Отметим, что в контексте данной работы подход Лакана имеет первостепенное значение по следующим причинам:

— идентичность характеризуется у Лакана не в терминах своей статичности и завершенности, а с точки зрения динамических процессов в дискурсе;

— язык перестает рассматриваться, как инструмент идентичности и может быть описан как во многом тождественная ей сущность;

— если исходить из представлений об идентичности как о динамическом, дискурсивном процессе, то любые попытки формирования завершеного, конечного определения идентичности для субъекта следует рассматривать с точки зрения их манипулятивного, властного и идеологического потенциала [6]. В этой связи иллюзия наличия стойкой идентичности может быть охарактеризована как продукт манипулятивного идеологического воздействия, создающий условия для формирования предубеждений, а затем и фанатизма в отношении всего того, что входит и не входит в установленные границы идентичности.

Терроризм в контексте дискурсивизации идентичности

Последнее положение, высказанное нами на основе предложенного подхода к исследованию проблемы терроризма, имеет далеко идущие последствия. Прежде всего, меняется изначальный подход к самому процессу изучения; в него включается «механизм подозрения» или деконструкции собственной позиции. Речь идет не просто об учете фактора «другого», который влияет в форматах социального заказа, идеологии, общественного сознания и прочего.

Идентичность как объект исследования оказывается сопряженной с проблематизацией идентичности самого исследователя. Процессуальность как свойство идентичности выходит за границы теоретических деклараций и находит свое воплощение в исследовании еще «до» самого исследования, поскольку предполагает факт завершенности в виде номинирования тех или иных объектов реальности в качестве террористических, что подразумевает фигуру «эксперта-ученого». Его роль может сводиться к целому ряду рефлексивных возможностей относительно объекта исследования, которые в целом описал Н.А. Грякалов [2, с. 4]. При рассмотрении террора мы позволим себе интерпретировать эти стратегии следующим образом:

- 1) как искажения естественного хода вещей,
- 2) «событие воли» и экзистенции, 3) понятия,
- 4) проект (генеалогический ракурс).

Некоторые из перечисленных стратегий непосредственно предполагают незыблемую фигуру исследователя-эксперта, который выносит квалифицированное суждение. Так, в первом случае (стратегия 1), номинирование осуществляется, исходя из знания «нормального» состояния мира; во втором (стратегия 2) — руководствуясь внутренним, априорным чувством должностования; в третьем — опираясь на свой институциональный статус; в четвертом — руководствуясь знанием (о структуре, схеме развития или инструментах получения такого знания).

В случае использования дискурсивного подхода следует, скорее всего, отказаться от фигуры исследователя-эксперта как «носителя целостности», субъекта, сообщающего ее, поскольку процессуальность, о которой говорилось выше, затрагивает и его самого. Возможно, стоит подходить к идентификации этой фигуры с позиции событийности и учета авто-дискурс-анализа как механизма само-деконструкции.

Дискурсивизация идентичности также позволяет объяснить некоторые затруднения в самом определении терроризма, в отношении которого нет единого мнения. Так, в общем виде под терроризмом понимаются жестокие насильственные действия в сфере политики и реализации прав субъектами власти. В частности, террор как отношение государства к своим оппонентам, репрессивное и жестокое, исследуется отечественным политологом И.М. Ильинским. А. Бернгард в работе «Стратегия терроризма» указывает на связь терроризма с силой, но понимает его как применение силы слабыми в отношении сильных. Американские исследователи В. Маллисона и С. Маллисона определяют терроризм как систематическое использование насилия и угрозы насилия для достижения политических целей. Д. Лонг сводит феномен терроризма к действиям по изменению существующего политического строя, существующего мирового порядка. Ф. Уилкоккс, координатор по борьбе с терроризмом Госдепартамента США, видит в терроризме политически обусловленное насилие, направленное против мирного населения.

Содержательный анализ трактовок терроризма, равно как и формально-понятийный, не позволяет прийти к тому уровню обобщения, который устраивал бы различных участников



научного диалога. Опираясь на дискурсную теорию, мы можем предположить, что решение проблемы находится в самом ракурсе рассмотрения терроризма как автономного и деидеологизированного явления. Ключ к пониманию манипулятивной стороны данной дефиниции дает идентичность, которую можно охарактеризовать как «ускользающую», не соответствующую самой себе, что наиболее наглядно проявляется в исторической перспективе, историческом дискурсе.

Спецификой самого исторического дискурса как дискурса институционализированного предопределяются требования истинности и связности повествования [1]. Однако очевидно, что объект, номинируемый в историческом дискурсе как террористический, подчиняется иным правилам, диктуемым мотивами скорее политико-идеологическими, нежели объективно-научными. Логика связности высказываний о прошлом находит соответствие в настоящем, которое регламентировано политико-прагматически. В этом смысле прошлое всегда актуально, а точнее, оно постоянно ре-актуализируется, поскольку сохраняет свой легитимизирующий потенциал. Исторический дискурс как никакой другой в силу своей обращенности к экзистенциальному чувству стабильности, неизменности основ бытия способен узаконить происходящее в настоящем, придать ему статус легитимности.

Развивая ранее высказанный тезис о культивировании «подозрения», которое мы применили к фигуре исследователя, объекту исследования (терроризму и идентичности), стоит обратить внимание на само номинирование и режим его осуществления. Поскольку исходной точкой рассмотрения является философский дискурс, очень важно выявление всей структуры дискурсивных отношений относительно объекта (того, что называется терроризм) и исходного для нас дискурса философии.

Прежде всего, отметим, что философский дискурс, являясь исторически сформированной когерентной последовательностью высказываний, отличается от остальных ярко выраженной генеративной способностью, выражающейся в производстве концептов. Иначе говоря, философия как место рождения высказываний относительно реальности претендует на гегемонию в этой сфере, заявляет о монопольном праве говорить об истине и иных фундаментальных вещах, в конечном итоге быть арбитром и иметь право «последнего слова» в номинировании как таковом. Возникает вопрос: распространяется ли это право или привилегия философского дискурса на то, что называется терроризмом, поскольку наша работа в определенном смысле также укладывается в эту схему как претензия на истинное знание о терроризме.

Позволим себе высказать предположение об отсутствии у философии права номинирования объектов террористическими, поскольку философский анализ, пытающийся выявить сущность терроризма и провести процедуру определения этого объекта, пока не привел к успеху. По словам Н.А. Грякалова, знать, что такое терроризм, и говорить о нем не одно и то же [2]. Очевидно, что функция говорения может подменять само знание, производя тем самым процедуру онтологизации терроризма. Что касается самого философского дискурса, то он получает уже онтологизированный объект террора от политического дискурса и выстраивает концептуальные схемы, опираясь на идеологизированное основание.

Таким образом, проблематичность идентичности, которая в сопряжении с объектом терроризма оказывается принципиально нефиксируема или конвенционально фиксируема, выявляет собственно дискурсивную природу терроризма как объекта исследования. Исходя из данного факта, следует выстраивать анализ терроризма с учетом политико-идеологических оснований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анкерсмит, Ф. Нарративная логика. Семантический анализ языка историков [Текст] / Ф. Анкерсмит. — М.: Идея-Пресс, 2003.

2. Грякалов, Н.А. Фигуры террора [Текст] / Н.А. Грякалов. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2007.

3. **Лакан, Ж.** Функция и поле речи и языка в психоанализе [Текст] / Ж. Лакан. — М.: Гнозис, 1995.

4. **Фрейд, З.** Введение в психоанализ [Текст]: Лекции. / З. Фрейд. — М.: Наука, 1989.

5. **Benwell, B.** Discourse and Identity [Text] / B. Benwell, E. Stokoe. — Edinburgh University Press, 2006.

6. **Dijk van Teun.** Discourse and Power [Text] / Dijk van Teun. — Palgrave Macmillan, 2008.

7. **Leeuwen van T.** Three models of Interdiscitplinarity [Text] / Leeuwen van T. // A new Agenda in (Critical) Discourse Analysis. Ed. by Wodak, R., Chilton P. — Jon Benjamins Publishing Co., Amsterdam, 2005. — P. 3–18.

8. **Sarup, M.** Post-structuralism and Postmodernism [Text] / M. Sarup. — Harvester Wheatsheaf, London, 1993.

9. **Taylor, C.** Sources of Self [Text]: The Making of Modern Identity / C. Taylor. — Cambridge, MA: Harvard University Press, 1989.

УДК 1:001

Е.Г. Рукомойникова

СТАНОВЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ «НАУЧНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ»

Термин «реальность» весьма многозначен в философии. Так, у Г.Д. Левина термин «реальное» имеет пять самостоятельных значений, у П.С. Дышлевого — шесть, у В.И. Поруса — более десяти. В словаре А. Лаланда выделяется пять основных смысловых значений этого термина, которые в какой-то степени противоречат друг другу [2, с. 900–902]. Так, реальное — это противоположное «кажущемуся», существующее поистине. Это утверждение вполне согласуется с первоначальным пониманием реализма как учения о том, что идеи более реальны, чем индивидуальные вещи. С другой стороны, реальное может пониматься как актуальное, непосредственно-данное, противоположное абстрактному, что диктует и другое понимание реализма.

В XX в. проблема реальности приобретает особую значимость, и только в это время начинает зарождаться понятие «научная реальность». Эта проблема становится актуальной в связи с выходом научного познания за пределы «зеркальной» чувственной данности, когда теоретические объекты оказываются непредставимыми с помощью воображения. «Реальное» науки не является «реальным» непосредственно данного, и, по мере того как утверждается важность конструирования объектов, в нем все больше проявляется «нормализующий» смысл этого термина, Г. Башляр пишет, что реальность науки — это область «вторичных объек-

тов», и даже допускает, что наука рассматривает «нечто с точки зрения обыденного сознания не реальное» [3, с. 316]. Здесь чрезвычайно важно рассмотреть историю становления научного реализма и появления термина «научная реальность», раскрыть различные подходы к данной проблематике.

Каждое из определений реального может выступать как базисное для какого-либо направления исследований проблемы реальности, поэтому для исследователя этой темы чрезвычайно важно выбрать точку отсчета в истории философии. Проблема *научной реальности*, тема нашего исследования, возникла вместе с зарождением философии науки. Наиболее остро она представлена в трудах эмпириокритиков.

Можно выделить следующие стадии формирования данной проблемы:

1) формирование категории «реальное», охватывающее эпоху античности и Средневековье;

2) анализ проблемы реальности в научных исследованиях (классическая философия нового времени от Р. Декарта и Ф. Бэкона до И. Канта);

3) проблема реальности в философских научных трудах конца XIX — начала XX в. (Э. Мах, А. Пуанкаре, П. Дюгем);

4) исследование научной реальности в естествознании XX в. (Л. Бронсвиг, Р.В. Селларз, Г. Маргенау, Н. Гартман);



5) проблема научной реальности в эпоху постмодерна (М. Фуко, Р. Рорти).

Первые два этапа в данном случае являются предысторией проблемы и не будут рассматриваться в настоящей статье.

Суть исследуемой проблемы состоит в следующем. Термин «реальность» означает бытие с точки зрения его данности человеку. Понятие «реальное» в этом смысле имеет двойственный характер. Реальное *относительно*, поскольку границы реальности историчны и определяются уровнем знаний, практическими и когнитивными интересами, теоретическими возможностями познания. Реальное в то же время *абсолютно* как понятие, в котором субъект жестко противопоставляется познаваемому объекту. Мы осознаем себя противопоставленными действительному, «реальному» миру, существующему вне и независимо от сознания. Двойственность такого рода оставляет открытым вопрос о критерии разграничения абсолютного смысла реальности и относительного. Проблема распадается на два аспекта — онтологический (в котором реальное есть мир вещей вне и независимо от человека) и логико-гносеологический (реальное есть истинно существующее, существующее «на самом деле»; проблема реальности в этом аспекте оборачивается проблемой существования). Каждый из этих двух аспектов, в свою очередь, распадается на множество конкретных направлений исследования, которые различаются между собой тем, что в них рассматриваются различные отношения категории «реальное» с категорией «антитеза». Так, в качестве антитезы понятию «реальное» могут выступать: «иллюзорное», «идеальное», «номинальное», «прошлое», «потенциальное», «виртуальное» и т. п.

В конечном счете в сети всех этих отношений понятие «научная реальность» выступает как антитеза, с одной стороны, понятию «наивный реализм» (донаучный реализм), в котором доказывается чувственной данностью, с другой — понятию «вненаучные объекты», существование которых базируется на вере. Именно в аспекте *противопоставления наивному реализму* формируется проблема реальности на начальных этапах становления философии науки. Особенно ярко это прослеживается у Э. Маха. Согласно наивному реализму, если *Я* воспринимает мир с помощью своих чувств,

и притом воспринимает его в том виде, в каком он существует в действительности, то Мах разрешает свои сомнения в истинности наивного реализма путем анализа процесса восприятия. Он доказывает, что внешнее воздействие не проникает в сознание непосредственно, а, достигая органов чувств, проходит множество преобразований, в конечном счете вызывающих определенные изменения в мозгу, которые и сопровождаются чувственными впечатлениями. Но в этих чувственных впечатлениях концентрируется вся информация, которую человек способен получить о мире. Следовательно, все, что фактически непосредственно дано нам и представляется достоверным, состоит из ощущений, которые выступают как *единство психического и физического*. С помощью этого утверждения Мах пытается обойти сложности онтологического подхода, по сути, отбросив его, и в то же время свести всю проблему научной реальности к логической проблеме существования. Но при этом Мах и его сторонники обошли сложность проблемы, на которую обратил внимание А. Пуанкаре, разграничивший два вида реальности: «*universalia ante rem*» (общее, которое существует раньше и помимо отдельных вещей) — статус этого типа реальности он вслед за Беркли определяет как «математический конвенционализм» и относит к объектам чистой математики и логики — и идеализации физической реальности, которые он включает в рубрику «естественные классификации». Если реальность первого вида априорна, то реальность второго — апостериорна, базируется на научном опыте и выступает как предельный случай абстракции.

В противовес махизму в марксистской философии выдвигается тезис, согласно которому «ощущение есть субъективный образ объективного мира». В этом утверждении очевидна антитеза доводам Маха, согласно которым ощущение субъективно и по форме, и по содержанию. Марксистский тезис, разграничивая функции формы и содержания в ощущении, достаточно четко определяет при этом форму (восприятие как итог психической деятельности), но оставляет неопределенным содержание, равно как и зависимость содержания от формы.

Характерно, что до конца первой четверти XX в. ни у позитивистов, ни у кантианцев, ни у марксистов не возникало потребности

в термине «научный реализм». В ходу остаются только термины «физический реализм» и «эмпирический реализм». Лишь в 1930-е гг. появляется понятие «научный реализм», и только во второй половине XX в., по словам В.Н. Поруса, этот термин прочно обосновался на страницах западной философско-методологической литературы. [5, с. 23].

В рамках махизма потребности в термине «научный реализм» не было, поскольку, согласно Маху, реальность, которую постигает наука, лишь «физический ряд» множества «нейтральных элементов мира». Из этого вытекает, что вещам, поскольку они конструируются из ощущений, не соответствует никакая реальность, существующая вне ощущений. В таком случае махизм в вопросе об определении природы реальности за пределами того, что он определял как физический реализм, скатывался в солипсизм, «рассматривая чувственно данное как содержание сознания субъекта» [4, с. 190]. Но подобная позиция со временем перестала удовлетворять как философов, так и физиков, и М. Шлик солипсизм в статье «Позитивизм и реализм» резко осудил ее как теоретический идеализм и ярко выраженный [6, с. 302–305].

Термин «научный реализм» возникает как способ уйти от солипсизма и избежать признания кантовского понятия «вещь в себе», которое определялось как «метафизическая реальность». Новый термин должен был заменить термин «физическая реальность», получивший к тому времени широкое распространение в литературе, и снять тем самым его двусмысленность. В самом деле, «физическая реальность», в толковании Э. Маха, смыкается с понятием «субъективная реальность», но в то же время имеет значение «физическая картина мира» и дает представление об объективной реальности глазами физика, как о потенциальном объекте физики, т. е. том, что может стать познаваемым физикой при ее дальнейшем развитии. Сохраняя родовые корни с махизмом, термин «физическая реальность» в свете критики Маха Планком и Эйнштейном, приобретает антиммахистское значение, недостаточно четко закрепленное в понятии «физическая картина мира», где сам термин «картина» предполагает субъекта, наблюдателя. Со временем значение термина «физическая картина мира» изменяется. В основе современной физической картины

мира лежит система математических уравнений, лишенных наглядного содержания. Понятие «материальная действительность» становится совершенно абстрактным. Согласно Планку, прогрессирующее удаление физической картины мира от чувственного мира означает не что иное, как прогрессирующее приближение науки к реальному миру, трансцендентному по отношению к переживаниям.

Термин «научный реализм» лишен двусмысленностей, присущих понятиям «физическая реальность» и «физическая картина мира». Вместе с тем он действительно выражает общую идею, общую проблему современной философии и методологии науки в различных ее направлениях. Эта проблема научной реальности состоит в следующем.

Существует объективная реальность, познаваемая в ходе исторической эволюции науки через развитие и смену научных теорий. Такое представление о научном прогрессе существовало еще на заре возникновения философии науки и кажется весьма убедительным и простым. Однако видимость простоты немедленно исчезает, как только ставятся вопросы: Каков статус утверждения о существовании объективной реальности (научный, метанаучный, метафизический)? Что значит быть познаваемым? В чем состоит специфика научных теорий по сравнению с иными формами познания? Как исторически изменяются отношения между теориями и реальностью?

Смысл научного реализма состоит в обосновании в противовес неопозитивистскому конвенционализму онтологического характера терминов науки. Вместе с тем научные реалисты сохраняют характерный для неопозитивизма «поворот в философии», т. е., лингвистический акцент и сциентистские мировоззренческие установки. В силу подобной ограниченности подхода онтологическая проблема научного познания ограничивается анализом природы языка, статуса теоретических объектов науки, критерием онтологической отнесенности понятий науки. Для анализа этих вопросов широко используются аналитические методы. Тем самым для научных реалистов проблема «что есть в мире» оказывается частью другой проблемы — «что и каким образом используется в языке». Общая тенденция развития проблематики научного реализма ведет ко все большему слиянию ее с предметом «философия языка».



Одно из первых развернутых определений научного реализма было дано Л. Брюнсвигом в 1930-е гг. Он различает чувственно воспринимаемый мир (природный мир), который непосредственно впечатан в наше восприятие, и «за-природный мир», означающий все то, что еще не познано, находится вне проекции объективной реальности, прямой или опосредованной, в возможности нашей чувственности. Ясно, что полученная информация ограничена спецификой и пропускной способностью наших органов чувств, она информационно закодирована в формы нашей чувственности и понятия, возникшие на базе нашей чувственности. Научная реальность, реконструированный мир, есть нечто опосредующее реальный и чувственный мир и находящееся в постоянном развитии в силу научного прогресса. Структурно научная реальность включает в себя эмпирическую реальность, формальную действительность и выполняющую функцию их целокупного объединения физическую реальность, или физическую картину мира. Достоинством такого понимания научной реальности является идея прогресса знаний, уходящего все дальше от чувственной очевидности. Но данный подход своего прямого продолжения не получил и в дальнейшем в работах П. Ланжевена, А. Шарона, П. Вижье и др. сближается с иными направлениями исследований по проблемам научного реализма. В качестве основных можно выделить три подхода к этой проблематике.

1. *Классический эмпиризм*. Наиболее подробное изложение этого направления можно найти у А. Эдингтона и Г. Маргенау. Согласно Эдингтону, источником всех наших знаний о мире выступает чувственность. Но наши ощущения и восприятия являются лишь формами той информации об объективном мире, которая в них как бы закодирована. В силу этого процесс научного познания состоит в том, чтобы искать ключ к раскодировке информации закодированной в нашей чувственности. Это, в свою очередь, требует все новой и новой, все более разнообразной информации, получаемой в различных условиях познания. Признавая неисчерпаемость объективной реальности, мы должны признать и бесконечность процесса познания. Сложность декодирования состоит в том, что получаемые нами сообщения «переодеты в понятия цвета, пространственности,

субстанции. Эти одеяния не являются частью сообщений, поступающих из внешнего мира, а привносятся нами» [1, с. 4].

В конечном счете «быть реальным» в эмпирическом смысле означает «быть включенным в пространственно-временную систему интересубъективных конвенций». Вопрос о том, является ли эта система лишь мыслительной конструкцией или ей соответствует некая абсолютная реальность, в рамках концепции эмпирического реализма вообще не может быть поставлен, т. к. он носит метафизический характер и тем самым выходит за рамки научного познания. Вообще, по Р. Карнапу, о реальности, которая не дана чувственному восприятию, мы можем размышлять, постулировать ее, предполагать ее, но не более того. Умозрительной реальности, существующей вне нашего сознания, мы не можем сопоставить никакой способ проверки ее истинности. Поэтому в рамках эмпирического реализма вопрос о материальности или идеальности внешнего мира является псевдопроблемой. Научная реальность обозначает пределы того знания, которое мы можем иметь, прямо или опосредованно опираясь на эмпирический опыт.

2. *Трансцендентальный идеализм*. Он рассматривает научное знание как идеальную структуру, порождаемую человеческим мышлением. Объекты «внешнего мира» — это явления, уловленные в сети форм, идеалов и норм, диктуемых самим мышлением. Наука в таком понимании строит, конструирует природу. К этому направлению тяготеют Д.О. Коннор, Б. Карп, Б. Страуд и в некоторой степени Р. Рорти. Определенную близость к данному направлению демонстрирует также П. Фейерабенд.

3. *Трансцендентальный реализм*. Это направление рассматривает объекты познания как определенные структуры и механизмы, порождающие явления. Знания об этих объектах приобретаются в ходе общественно обусловленной научной деятельности. Трансцендентальный реализм в отличие от идеализма считает объекты познания независимыми от познавательной деятельности субъекта, а в отличие от эмпиризма понимает объективный мир как взаимодействие системы структур и механизмов, а не как собрание автономных событий. Если для эмпиризма реально существуют только единичные объекты восприятия, то для трансцендентального реализма статус

существования имеют общие свойства предметов и процессов, причинно-следственные связи и законы. Эта система взаимосвязанных процессов познаваема лишь постепенно, в зависимости от степени развития мыслительных, технических и перцептуальных возможностей людей.

Все три направления существуют и в наши дни, но наиболее значимы сегодня второе и третье. Это неудивительно, т. к. именно в их русле учитывается объективная сложность научного познания, а также роль конструирования. Мы не только рассматриваем объекты через призму наших ощущений, но и конструируем и совершенствуем язык описания явлений по мере того, как углубляется научное знание. У нас нет готовых форм, в которые можно было бы уложить получаемую информацию, эти формы каждый раз должны быть разрабо-

таны заново. Форма и содержание не существуют независимо друг от друга, поэтому идеалы и нормы научного мышления в некоторой мере определяются объектами внешнего мира; они должны адекватно описывать связи и структуру последних. С другой стороны, научное познание определено не является пассивным, и процесс познания происходит одновременно с созданием его методов и инструментов.

Необходимо отметить, что дискуссии в этом проблемном поле продолжают. В частности, в русле третьего направления можно рассматривать выход в свет книг Д. Дойча «Структура реальности», Д. Дьюи «Реконструкция в философии», П. Куртца «Новый скептицизм: исследование и надежное знание», Х. Патнэм «Разум, истина и история», а также «Философия языка» под ред. Дж. Р. Серла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Edington, A.** New pathways in science. [текст] / A. Edington. — N.Y., 1935.
2. **Lalande, A.** Vocabulaire technique et critique de la philosophie [текст] / A. Lalande. — P.U.F., 1975.
3. **Башляр, Г.** Рациональный материализм [текст] / Г. Башляр // Избранное: Научный рационализм. — М., — СПб., 2000.
4. **Крафт, В.** Венский кружок. [текст] / В. Крафт. — Возникновение позитивизма. М., 2003.
5. **Порус, В.Н.** Дискуссии по проблемам научного реализма в западной философии науки [текст] / В.Н. Порус // Философия и научное познание. — М., 1986.
6. **Шлик, М.** Позитивизм и реализм [текст] / М. Шлик // Erkenntnis. Избранное. — М., 2007.

УДК 241.4; 291.5

З.А. Целищева

ИДЕЯ ВОЗМЕЗДИЯ В СРЕДНЕВЕКОВОЙ КУЛЬТУРЕ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ

В основе средневековой культуры лежали традиции Западной Римской империи, представляющие «романское начало». Главными в культурном наследии Рима являлись высокая правовая культура, наука, искусство и философия. По мнению Ж. Ле Гоффа, Рим поддерживал, питал, но одновременно и парализовал его рост [4]. Традиции усваивались во время борьбы римлян с «варварами» и активно влияли на культуру языческой родоплеменной жизни

франков, бриттов, саксов, ютов и других племен Западной Европы, представляющую «германское начало» средневековой культуры.

Раннее Средневековье стало временем рождения Европы как целого, охватывающего весь европейский континент. В ученых кругах период с VI по IX в. принято считать «долгой ночью» Средневековья. Это связано с тем, что «долгая ночь» еще не была временем рождения собственно самой средневековой культуры, со все-



ми ее особенностями. Скорее, это было время бесструктурного культурного хаоса, в котором сталкивались и перемешивались осколки разных культур и их элементов. По мнению Н.А. Бердяева все Средневековье можно назвать ночной эпохой всемирной истории. Однако византийский и арабский мир сохранил античное наследие гораздо полнее, что в XI–XII вв. значительно стимулировало первый культурный подъем латинской Европы, приведший к становлению средневековой культуры.

Сложный процесс христианизации варварских народов в определенной степени трансформировал христианство, т. е. привел к сохранению на долгое время культурного дуализма — сосуществования, с размежеванием в определенных сферах христианства и язычества, особенно осязаемого в народной повседневной культуре.

Строительство Европы было строительством христианизирующей культуры, шедшим в двух разных направлениях из двух центров: один из них был представлен районами латиноязычного Запада (юг Франции и Италия), второй находился в Византии, обращенной к Восточной Европе.

Так, к началу строительства европейской средневековой культуры во второй половине VIII в. Запад уже имел свои преимущества:

более длительную христианскую традицию в ведущих центрах, расположенных в юго-западных районах;

более живое и органичное для этих мест римское культурное наследие;

сеть уже готовых, хотя и сильно ослабленных в период варваризации городов. О. Шпенглер писал об этом: «Из скопления деревенских дворов, каждый из которых имеет свою историю, возникает нечто целое. Это целое живет, дышит, растет, приобретает лицо, внутреннюю форму и историю» [10];

прямые связи с экономически развитым Восточным Средиземноморьем, с более развитыми и культурно богатыми византийским и арабским мирами.

Средневековая культура формировалась в условиях господства натурального хозяйства замкнутого мира сельского поместья, неразвитости товарно-денежных отношений. В дальнейшем социальной основой культуры становилась и городская среда, бюргерство, ремеслен-

ное цеховое производство, торговля, денежное хозяйство. Социальная культура Средневековья выступала прежде всего как политическое господство военного сословия — рыцарства, основанного на сочетании прав на землю с политической властью. Эту сферу культуры отличала иерархическая вертикаль, где социальные отношения сеньора и вассала строились на основе договоров, семейных связей, личной верности, преданности и покровительства. С образованием централизованных государств формировались сословия, составляющие структуру средневекового общества, — духовенство, дворянство и «третье сословие», или народ. Каждое сословие выполняло свою функцию. Духовенство заботилось о душе человека, дворянство занималось государственными делами, народ — трудился. Тем самым христианский образец человека трансформировался в сословные идеалы человеческой жизни. Интересной особенностью этого процесса явилось формирование монашества, которое олицетворяло переход от общинного ожидания царства Божия на земле к достижению индивидуального спасения путем аскетического «сораспятия» Христа при жизни, совместной святой жизни. Христианский аскетизм отвергал мир, «ибо он греховен и подвержен Божьему суду» [5].

Таким образом, средневековый тип отношения человека к миру складывался на основе феодальной собственности, сословной замкнутости, духовного господства христианства. Этим и объясняется, по мнению А.Я. Гуревича, противоречивость «образа мира» [5] средневековой культуры.

Согласно историкам Руше и Киршхаймеру, при феодализме, в эпоху, когда деньги и производство только начинали развиваться, наблюдался резкий рост числа телесных наказаний. В Средние века немногие имели собственность, поэтому только тело являлось доступным для наказания. Об этом свидетельствует и историк Сулатж, повествующий о разных способах казни: «Смертная казнь включает в себя много способов лишения жизни: одних преступников приговаривают к повешению, других — к отсечению кисти руки, вырыванию или протыканию языка с последующим повешением» [9]. За тяжкие преступления приговаривали к более изощренным видам наказания. Отсюда следует, что всякое наказание должно было включать в себя элемент пытки.

М. Фуко определял пытку как технику и не видел в ней выражение человеческой жестокости. Наказание считалось пыткой, если удовлетворяло трем основным критериям. Прежде всего, оно должно было вызывать определенную степень страдания, которую можно точно измерить или сравнить и сопоставить с другими. Смерть являлась пыткой, если представляла собой не просто отнятие права на жизнь, а ситуацию и завершение рассчитанной градации боли: от обезглавливания (которое сводит все страдания к единственному жесту и единому мигу, — нулевая степень пытки), через повешение, сожжение и колесование, prolongирующие агонию, до четвертования, доводящего страдание почти до бесконечности. По мнению М. Фуко, смерть-пытка есть искусство поддерживать жизнь в страдании, подразделяя ее на «тысячу смертей» до наступления смерти [9]. Пытка соотносила характер телесного воздействия, качество, интенсивность и длительность страдания с тяжестью преступления, личностью преступника, статусом его жертв.

Из письменных источников, посвященных исследованию Средних веков, известно, что в X–XII вв., когда наблюдалось усиление церковной власти и вследствие этого начала подниматься волна религиозной нетерпимости, любому совершенному преступлению давалась религиозная оценка. Светское законодательство делало акцент на вреде, причиняемом колдунами обществу (наведение порчи, сглаз, гадание, заговаривание), и в меру этого вреда устанавливало для малефика (зло-вредителя) наказание: «колдун, как орудие злой воли демона, причиняет людям вред, порчу, зло, насылает на них всякие беды и несчастья, отнимает у них сон и спокойствие, лишает их пищи и довольствия, он еще в древнем мире подлежал, как всякий преступник, суровому наказанию, в меру своего преступления» [7]. Особенно тяжкими, согласно историку Ч. Беккариа, считались те преступления, «которые были чреватны уничтожением непосредственно самого общества или того, кто олицетворял это общество» [2], т. е. правителя. С тех пор как Средние века в результате медленного и болезненного процесса создали великую процедуру дознания, сложилось мнение, что «судить — значит, установить истину преступления, определить личность преступника и применить к нему пре-

дусмотренное законом наказание» [9]. Знание правонарушения, знание виновного, знание закона — три условия, позволявшие положить в основание приговора истину.

Сам процесс судопроизводства включал в себя не только пытку, но и присягу, которую приносил обвиняемый перед началом допроса. Присяга представляла собой угрозу нести ответственность за клятвопреступление перед судом человеческим и судом Божьим и в то же время ритуальный акт участия; пытка же — физическое насилие с целью получения истины, которая будет повторена перед судьями как признание и станет доказательством.

В Средние века верили, что если подозреваемый виновен, то его страдания, причиняемые пыткой, не будут незаслуженными. Если же он невиновен, пытка послужит основанием для оправдания. В то же время пытка, применяемая для получения признания, была не только расследованием, но и элементом наказания и возмездия.

Что касается самого доказательства, то оно в судебно-правовой сфере строилось не по дуалистическому принципу — истина или ложь, — а по принципу постепенной градации: некоторая степень доказательства уже означала некоторую степень виновности, следовательно, и какое-то наказание. Подозреваемый всегда заслуживал некоторого наказания, т. к. навлекший на себя подозрение не мог быть абсолютно невиновным.

После того как истина была установлена и вина доказана, наступал момент церемонии публичного наказания, который имел несколько ярких показательных моментов. Во-первых, виновный должен был вынести на всеобщее обозрение приговор и факт совершенного преступления. Таким образом из осужденного делали глашатая собственного приговора и представляли его возвещать истинность обвинения. Во-вторых, публичное принудительное принятие покаяния дополнялось спонтанным и публичным признанием. В-третьих, публичная казнь «привязывалась» к самому преступлению, т. е. труп осужденного выставлялся на месте преступления или на одном из ближайших перекрестков. Казнь часто совершалась в том месте, где было содеяно преступление, таким образом, наказание следовало из преступления — это было лучшим способом соразме-



рять наказание с преступлением. В-четвертых, казнь предвляла потусторонние кары, она показывала, в чем они заключаются, — а именно в тех муках, которые ожидали преступника в аду. Страдания на земле расценивались как покаяние и могли смягчить наказание на небесах. М. Фуко так писал по этому поводу: «Бог не преминет учесть эти муки, если они переносятся со смирением. Жестокость земного наказания будет учтена в грядущей каре, в ней видится обещание прощения» [9]. В-пятых, посредством казни преступника все должны были ощутить власть государя. Из этого следовало, что наказание было также способом, которым добивались возмездия одновременно личного, государственного и божественного, т. к. всякое преступление виделось бунтом против закона, преступник — врагом государя, а еретик — предателем Бога. Публичность наказания преследовала две цели, с одной стороны, устрашение общества и удерживание его от опасности впадения в ересь и преступления; с другой — причинение преступнику и грешнику большего страдания, т. к. унижения, которым он подвергался, были дополнительной платой за его деяния.

Жестокое обращение с людьми и длительное существование пыток и физических наказаний в западноевропейском Средневековье, а также то, что протесты против них были слабыми и редкими, исследователи объясняют по-разному. Одни связывают это с христианским вероучением, в котором тело было отмечено первородным грехом, а причинение физического страдания считалось необходимым условием для очищения души. Другие высказывают мнение, что в Средние века в силу слабой развитости торговли, представленной именно в качестве товарно-денежных отношений, богатство и благополучие представлялись неотделимыми от власти, «в которой право наказывать тождественно личной неограниченной власти суверена» [9].

Начиная с X в. и до эпохи Просвещения христианство было религией, которая входила в жизнь каждого европейца с момента его рождения, сопровождала его на протяжении всего его земного существования и вводила в загробный мир. Христианская религия выступала как мировоззренческая опора сознания, выражение запроса на святую, чистую жизнь.

Один Бог лучше понятен человеку, имеющему одного хозяина, т. е., как пишет В.И. Полищук, «идея о личном Боге в христианстве переводится в план личного человеческого чувства и отношения» [8]. Главным догматом христианства является вера в единого всемогущего и всеблагого Бога. Как считает К. Каутский, «решающее значение для христианства имеет то представление о Боге, что Он есть Бог-Отец, Бог-Любовь, а люди — дети Божьи» [6]. У А.Я. Гуревича читаем: «...им по душе приходилось рассуждения о единстве и красоте мира и что центральное место в сотворенном Богом мире принадлежит человеку» [5].

Античность воодушевляла радость земного бытия, а христианство заменило ее стремлением к загробному существованию, умалением человека, сведением его к греховному существу, порицанием всех телесных радостей. Переход к аскетизму, устремленному к духовному единству с Богом, являло собой новый уровень духовного самосознания средневекового человека. В христианстве образцом выступал человек смиренный, духовный, страдающий, жаждущий искупления грехов, спасения с Божьей помощью. Рамки личной ответственности человека были расширены мыслителями веков. Теперь человек за свои грехи и преступления был в ответе перед обществом, Церковью и Богом.

В условиях господства эсхатологизма и психологии мессианства сущность нравственного идеала средневековой христианской идеологии можно представить единством Веры, Надежды и Любви. В этой триаде Вера выступает как особое состояние духа, ведущая к Богу святая простота. Надежда олицетворяет идею спасения от греха с помощью Бога через загробное воздаяние, путь к которому — смирение, следование образцам освященного церковью поведения. Любовь понимается как любовь к Богу, как связь, устремление к нему человека.

Понятие «возмездие» в Средние века приобрело статус идеи, которая представляла собой сложный по содержанию, значительный по объему культурный слой средневековой эпохи. Возмездие применительно к Средним векам можно рассматривать с двух позиций. Первая — как наказание за совершенное преступление в отношении Бога, церкви и общества. Средневековые мыслители считали преступление, совершенное против церкви, более тяжким, чем

то, которое было направлено против человека и общества. «Церковь наказывала не за вред, нанесенный обществу, и не за преступление, причиненное человеку, а за отпадение от церкви, за отступление от слова божьего, отступление, могущее и не сопровождаться уголовным преступлением», — считали Я. Шпренгер и Г. Инститорис [7]. Для таких преступников предназначалось более суровое наказание. С IV в. церковь стала требовать двойного наказания преступника и привлекать к его наказанию светскую власть.

Вторая — возмездие понималось в качестве воздаяния за исполнение Закона (Божьего). Прийти к Богу-Отцу можно только через веру в Христа. В. Соловьев писал, что осуществление самого Царствия Божия зависит не только от Бога, но и от нас, ибо ясно, что духовное перерождение человечества не может произойти помимо самого человечества, не может быть только внешним фактом; оно есть дело, на нас возложенное.

Идея возмездия, выраженная в духовном и земном наказании, не просто преследовала цель «поучить» наказуемого, а имела характер сложного процесса по охранению «своего» мира от влияния хаоса, якобы порожденного дьяволом. Следовательно, проблема преступления выходила за рамки чисто юридической и переросла в метафизическую сферу, приобретая этико-религиозную значимость. В действительности эти две стороны одной проблемы в сфере христианской культуры — совесть и правосознание — отнюдь не альтернативы. Эти два вида духовной энергии держат под контролем самые темные силы, таящиеся в отдельном человеке и социальной среде и всегда готовые взорваться, даже при полной «цивилизованности».

С момента усиления церковной власти началось «выпячивание» религиозного аспекта любого совершенного преступления. Следовательно, степень наказания определялась светским судом и соотносилась с величиной греха, а не преступления: убийство, совершенное без примеси колдовства, могло быть наказано менее сурово, чем гадание или заговаривание, «в котором явно сказался элемент дьявольского наваждения» [7].

Не секрет, что жестокость в Средние века была одним из любимейших удовольствий. Господа покупали разбойников только для того,

чтобы посмотреть на пытки, «которым люди радовались больше, чем восставшему из мертвых святому» [2]. Жестокое возбуждение и грубое участие, вызываемое зрелищем эшафота, были важной частью духовной пищи народа.

Высшей мерой наказания была смертная казнь, которой люди подвергались за сотни нарушений. Казнь происходила публично, на глазах целой толпы, состоящей из граждан всех возрастов.

Акт возмездия преодолевал границы реальности, создавая свою реальность, в которой сам преступник, его судьи и палачи имели равное положение с Богом. Что касается судебного процесса, то он являлся представлением, демонстрирующим «ритуал» устранения хаоса из сферы «упорядоченного» мира и восстановления утраченной обществом невинности [4]. Так, идея возмездия включала религиозные, светские и психологические мотивы.

По мнению многих мыслителей Средневековья, Бог мерит не тем, что люди делают, «а тем, с какой душой они могут делать нечто; и не в поступке, а в намерении поступающего состоит заслуга или подвиг» [1].

Согласно учению св. Ирины Лионского, дьявол получил право власти над человеком в тот момент, «когда человек под влиянием обольщения и искушения нарушил божеские предписания и совершил грех. Разумеется, обольщение и вовлечение человека в грех являются преступлением дьявола, насильственно вмешавшегося в сотворенную богом область, но раз человек добровольно дал себя обольстить и отошел от бога, дьявол получил полное право господства над человеком» [7]. П. Абеляр утверждал, что сам дьявол не делает ничего, что не позволил бы ему делать Бог. Бог мог бы лишить дьявола плодов его преступного вмешательства, но по своей неизреченной справедливости он этого не делал и предоставил дьяволу право на уже раз обольстившегося человека. Это право должно было быть отнято у дьявола человеком, который таким же добровольным путем освободил бы себя от обольстительной силы дьявола и тем лишил бы его права господства над собой. Так было бы восстановлено первоначальное правовое отношение между тварью и ее творцом, и дьявол был бы побежден и больше не обладал бы властью над человеком.



Но добровольное освобождение из-под власти дьявола превосходит силы человека, и вступился Спаситель, который должен был быть человеком, т. к. добровольное освобождение человека должно было идти по пути права, законного возвращения человека из-под власти дьявола в лоно Божества. Но Спаситель должен был быть больше, чем человек, т. к. дело шло о том, что превосходит человеческие силы. Дьявол мог быть побежден лишь совершенным, абсолютным повиновением Иисуса. Смертью Спасителя люди освободились от власти дьявола, и последний был пленен. Но дьявол совершил ошибку: он принял Христа, который был безгрешен, за греховного человека, и впадение в эту ошибку привело дьявола к поражению. Дьявол первоначально не имел права на человека, поэтому Иисус собственно вернул Творцу то, что ему принадлежало с самого начала. Св. Иринею принадлежит и ясно выраженная мысль о том, что дьявол создан подобно другим ангелам, что он по природе своей добр, обладает свободной волей и мог бы творить одинаково доброе и злое, но по собственной воле и вине стал злым и творит одно лишь злое.

Правовая теория св. Ириней Лионского нашла энергичного и неутомимого защитника в лице Оригена, доказывавшего, что дьявол был обманут Спасителем. Получив в силу греха власть над человеком, дьявол мог вернуть ее лишь взамен какого-либо возмездия, эквивалента. Таковым была кровь Спасителя. Так, смерть Спасителя стала средством уничтожения силы дьявола: человечность во Христе была приманкой, на которую оказался так падок дьявол.

Важную роль в духовной жизни человека для его душевного спасения играла исповедь: «Если исповедуем грехи наши, то Он, будучи верен и праведен, простит нам грехи наши и очистит нас от всякой неправды». Как отметил П. Абеляр, как бы ни хотели мы совершить то, за что впоследствии, знаем, нас должно настигнуть возмездие, то есть за что мы удостоимся наказания, — мы, однако, наказанными быть не желаем. Тем самым мы очевидно неправедны, потому, что хотим совершить неправедное, но не хотим подвергнуться беспристрастному праведному наказанию: праведная кара неприятна, неправедное же деяние приятно [1].

Церковь выступала и как светская сила, в лице папства, стремящаяся к господству над

христианским миром. Задача церкви была достаточно сложна: хранить культуру церкви могла лишь «обмирщаясь», а развивать культуру можно было только путем углубления ее религиозности. Церковь должна была, развивая свою «небесную» жизнь в высших формах религиозности, спуститься в мир и, преобразая его в Град Божий, жить «земной» жизнью. Эта противоречивость была высказана Августином в его работе «О граде Божьем», где он показал историю человечества как извечную борьбу двух градов — Града Земного и Града Божьего.

Спасение «в миру» становится все менее реальным, и религиозная мысль от попытки воплотить Град Божий на Земле все более обращается к советам Христа о спасении на небе. Эти настроения усиливались и становлением национальной церкви, отрицающей практику Вселенского папства. С укреплением национальных государств господство религиозного понимания жизни все более начинает сменяться «мирским». На смену вековым попыткам создать религиозное единство мира в его преобразении приходят века поисков единства «мирского», чтобы через него уже осознать преобразуемое, воплощаемое в нем высокое религиозное единство и тем самым, все же приблизиться к воротам Града Божьего.

Из вышесказанного следует, что, с одной стороны, средневековая культура обладала целостностью, обеспечиваемой феодализмом и богословием. Мировоззренчески это выражалось в систематизирующей роли религиозных идей теоцентризма, креационизма и фатализма. Господствующий принцип типизации был произведен от христианской идеи Бога как носителя всеобщего, универсального начала. Для культуры Средних веков характерны также догматизм, авторитарность системы ценностей и идейная нетерпимость, которая отделяла «своих» от «чужих» (неверных).

С другой стороны, средневековая культура глубоко противоречива, в ней сочетаются раздробленность бытия, когда каждый народ имеет свой уклад жизни, и тяга к Всеединству — Граду Божьему на земле; привязанность человека к земле, своей общине, поместью, и христианская универсальность человека, чуждая идее национально-сословной ограниченности; страдальческое отречение от мира и тяга к насильственному всемирному преобразованию

мира. И. Таулер писал, что люди должны смотреть не вовне, а вовнутрь себя, погружаясь в глубину своей души, чтобы там искать Царство Божие и его Правду.

Хотелось бы закончить словами Ж. Бодрийера: «Совокупность добра и зла превосходит нас, но мы должны ее полностью

принять. Никакое понимание вещей невозможно вне этого основного правила. Иллюзия, что можно отделить Добро от Зла с тем, чтобы развить то или другое, просто абсурдна (это обрекает на бессилие тех, кто стремится платить злом за зло, ибо в конце концов они творят добро)» [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абеляр, П.П.** Этика, или познай самого себя [текст]: теолог. трактаты / П.П. Абеляр; пер. с латыни, коммент., ввводн. ст., сост. С.С. Неретиной. — М.: Прогресс: Гнозис, 1995. — 413 с.
2. **Беккариа, Ч.** О преступлениях и наказаниях [текст] / / Ч. Беккариа. — М.: Стелс, 1995. — 248 с.
3. **Бодрийер, Ж.** Прозрачность зла [текст] / Ж. Бодрийер; пер. Л. Любарской, Е. Марковской. — М.: Добросвет, 2000. — 257 с.
4. **Букалаев, А.К.** Наказание как символический слой мировой культуры [текст] / А.К. Букалаев // Летняя филос. шк. «Голубое озеро — 2006». Технопарк как модель интеграции технологии, науки и образования. — Новосибирск, 2006. С. 206.
5. **Гуревич, А.Я.** Избранные труды [текст] в 2 т. А.Я. Гуревич. Т. 2: Средневековой мир. Категории средневековой культуры. СПб.: Университетская книга, 1999. — 560 с.
6. **Каутский, К.** Происхождение христианства [текст] / , К. Каутский. М.: Политиздат, 1990. — 463 с.
7. **Лозинский, С.** Роковая книга Средневековья [текст] / С. Лозинский // Яков Шпренгер, Генрих Инститорис. Молот ведьм. — Саранск, 1991. — 530 с.
8. **Полищук, В.И.** Мировая и отечественная культура [текст]: учеб. пособие / В.И. Полищук. — Ч. 2. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. пед. ин-та, 1993. — 256 с.
9. **Фуко, М.** Надзирать и наказывать: Рождение тюрьмы [текст] / Мишель Фуко; пер. с фр. В. Наумова. — М.: Ad Marginem, 1999. — 454 с.
10. **Хейзинга, И.** Осень Средневековья. Исследование форм жизненного уклада и форм мышления в XIV и XV веках во Франции и Нидерландах [текст] / И. Хейзинга. — М.: Изд. группа «Прогресс», 1992. — 371 с.

УДК 140.8 + [101.1 : 316]

О.В. Сидоренко

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКАЯ ЗАДАННОСТЬ ФУТУРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Вступление человечества в третье тысячелетие и формирование новых парадигм познавательной деятельности сделало особо актуальным для современного мира и востребованным для социогуманитарного познания построение различного вида прогнозов в социальной и технологической сферах, а также выработку разнообразных сценариев по предотвращению глобальных катастроф. Среди научных концепций особое место занимает футурология, или исследования будущего. Но

построение прогнозных сценариев зачастую требует от человека нестандартного мышления, использования неизбитых схем и подходов. В связи с этим возникает необходимость переосмысления существующих научных концепций, создания нового мировидения, выработки системных представлений, адекватно отражающих мир во всем многообразии его проявлений и воплощающих в себе достижения научной и философской мысли последних десятилетий.



Поскольку современный этап в истории человечества также можно охарактеризовать и как эпоху мировоззренческих поисков, то процесс раскрепощения сознания человека, исследование закономерностей формирования мировоззрения людей становится приоритетными направлениями теоретической и практической мысли. Поэтому выявление взаимосвязи мировоззренческих установок авторов футурологических концепций и выстраиваемых ими различных прогнозов актуально в отношении современного, динамически развивающегося мира.

Для того чтобы прояснить значение используемых автором понятий, отметим, что понимается под футурологией. Термин «футурология» образован от латинского термина «futurum» в значении «будущее» и греческого слова «logos» — учение. В наиболее общем значении термин «футурология» обозначает совокупность представлений о будущем человечества, или область знаний, охватывающую перспективы социальных процессов. Термин «футурология» предложил в 1943 году немецкий социолог О. Флехтхейм, имея в виду некую надклассовую «философию будущего», противостоящую идеологии и утопии. С начала 60-х годов это понятие распространилось на Западе в смысле «истории будущего», «науки о будущем», призванной выявить прогностические (предсказательные) функции всех научных дисциплин. Поскольку перспективы социальных процессов изучаются многими науками, термин «футурология» ввиду его многозначности и неопределенности с конца 60-х годов вытесняется понятием «исследование будущего», которое охватывает теорию и практику прогнозирования [8, с. 637]. Термин футурология, как правило, не применяется по отношению к предсказанию будущего сверхъестественными способами, а также к предсказанию недалекого будущего или легко предсказуемых вариантов развития событий.

Чтобы более точно раскрыть содержание термина футурология, обратимся к философскому словарю научного прогнозирования [6]. В нем даются три толкования футурологии:

как универсальной «науки о будущем», или «история будущего», которую несколько лет пытались создать многие авторы;

как образного синонима прогнозирования и прогностики;

как «литературы о будущем» — научной, либо публицистической.

Более узкое значение «футурологии» приходится на соотнесение этого понятия с научным прогнозированием, или прогностикой. Само понятие «научного прогнозирования» как специального научного исследования перспектив развития какого-либо процесса или явления охватывает собой весь спектр обобщенных теми или иными научными методами описаний ненаступивших событий или тенденций, как глобального масштаба, так и относящихся к конкретным областям жизни. В узком, интересующем нас, значении прогнозирование — специальное исследование конкретных перспектив развития какого-либо явления. Поскольку прогноз наряду с анализом, диагнозом, синтезом есть имманентная функция каждой научной дисциплины, прогнозирование присутствует во всех без исключения науках. В этом плане различается прогнозирование естественное, научно-техническое и обществоведческое (социальное в широком значении данного понятия).

Таким образом, говоря о футурологии в этом значении, мы имеем в виду органическую часть, присутствующую в каждой науке, делаая акцент на присущей этой части обращенности к выявлению еще не обнаруженных тенденций. Составной частью такого прогнозирования выступает прогностика как его теория (реже практика). Хотя данный термин и используется в качестве синонима футурологии, употребляясь только в русскоязычной литературе, он быстро вытесняется более универсальными [7]. Можно сказать, что прогнозирование само по себе не существует как отдельная наука, а прогноз — неотъемлемая часть любой научной дисциплины наряду с анализом и диагнозом. Таким образом, футурология до сих пор заменяется более узкими по смысловому значению терминами, хотя иногда используется и как их синоним. Схематически это можно выразить так:

**футурология = прогнозирование =
= исследования будущего (future studies)**

Обращаясь к истории развития футурологического знания, можно увидеть, что оно развивается именно в сторону конкретных методик, которые могут выявить наиболее возможные события в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

Так, С.П. Караганов предлагает выделять четыре эволюционных этапа в истории прогнозирования [6, с. 13–18]:

1. Утопии и антиутопии. Сюда можно причислить и произведения авторов нового времени, и даже некоторые работы современных авторов. Особенность их заключается в том, что они в литературной форме раскрывают социально-политические, культурные идеалы, дают как оптимистический, так и пессимистический прогноз. Это и «Город солнца» Т. Кампанеллы и произведения Дж. Оруэлла.

2. Научная фантастика, появление и бурное развитие которой пришлось на XIX–XX века; к ней можно отнести произведения Г. Уэллса и Ж. Верна.

3. Научная публицистика в жанре размышлений о будущем. (future studies). Сюда можно отнести целый ряд авторов и даже научных школ: это и работы отечественных исследователей (например, И.В. Бестужев-Лада), и работы зарубежных социологов, политологов и экономистов (Д. Белл с его концепцией постиндустриального общества; О. Тоффлер с концепцией «шока будущего», Ф. Фукуяма с идеей «конца истории» и ряд др.).

4. Этап научных методик: это разработка методов для построения конкретных прогнозов (метод делфи, паттерн, сценирование, игровое имитационное моделирование, ситуационный анализ, форсайт <от англ. foresight — предвидение, дальновидность, предусмотрительность>).

Нас в данном случае интересуют две разновидности современных прогнозов: форсайт и так называемые future studies, так как они в большей мере отвечают критериям научности. В настоящее время внутри современного футурологического знания можно выделить следующие направления:

авторские исследовательские работы (future studies);

научное и технологическое прогнозирование (корпоративные, бизнес-форсайты).

В современных форсайтах на различную тематику, а также публицистических произведениях и авторских исследованиях на тему размышлений о будущем особый интерес и актуальность приобретает их мировоззренческое содержание. Мировоззренческие установки можно выявить внутри любых прогнозов. Это касается и публицистики (то есть таких авторов,

как, например, Ф. Фукуяма, С. Хантингтон, Патрик Дж. Бьюкенен, Э. Тоффлер), фантастики, а также любых форсайтных исследований. Касательно последних нужно сказать: даже несмотря на то, что они направлены на решение утилитарных задач, анализ их содержания выявляет основные мировоззренческие установки их авторов.

Необходимо также вкратце прояснить понятие мировоззрения. Т.И. Ойзерман дает следующее его определение: «Мировоззрение — система человеческих знаний о мире и о месте человека в мире, выраженная в аксиологических установках личности и социальной группы, в убеждениях относительно сущности природного и социального мира» [3, с. 578–579]. Обычно мировоззрение определяется как «система взглядов на мир». Существуют разные типы мировоззрения, например религиозное, научное, мифологическое, обыденное и т. д. Необходимо также отличать мировоззрение от всей совокупности знаний человека о мире. Как можно видеть, понятие мировоззрения многогранно и многоаспектно, что не позволяет дать однозначное определение данному понятию. Но важно одно: мировоззрение — это форма духовного бытия человека, а также важный фактор социокультурной жизни.

Анализируя публицистические работы западных исследователей, нельзя не заметить их своеобразное мировоззренческое содержание. Чтобы охарактеризовать западное мировоззрение более подробно, обратимся к работе Александра Панарина «Глобальное политическое прогнозирование» [4]. В ней автор проводит аналогию повсеместного движения к либерализму с законом классической механики: «если на тело не действует сила, оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения». А затем делает вывод о том, что «...главным препятствием развитию современной теории общего (глобального) прогнозирования, как и социального прогнозирования вообще, является господствующая научная установка европейского модерна — установка на овладение миром. Речь идет о пресловутой «прометеевой воле», не привыкшей встречать настоящих препятствий в лице «другого», будь этот другой еще не прибранная к рукам природа, или — другая культура, или, наконец, самое будущее» [4].

Таким образом, мировоззренческие установки современного западно-европейского об-



щества нацелены на восприятие будущего как на развертывание трендов современности, опирающихся на приоритет техники и технологии над культурой. Невосприятие будущего как некоего «иного», совершенно не вписывающегося в наши представления о целесообразности развития современного мира, — вот основное кредо форсайтов и авторских прогнозов. Поэтому осознание открытости наших представлений «иному» будущему играет ключевую роль в построении современных прогнозов.

На наш взгляд, примером западного мировоззрения может служить позиция Френсиса Фукуямы, прогнозирующего и утверждающего торжество либеральной демократии как высшей политической ценности и как проявление развитости культуры. А ведь этот человек активно влияет и, можно сказать, формирует внутри США и вообще западной культуры политические установки как широких масс, так и узких кругов, приближенных к военным структурам США. Его прогноз повсеместного установления либеральной демократии и наступление конца истории известен очень многим [10]. Но какой подтекст несла эта идея в 1991 году, в момент своего выхода в свет? Очевидно, что данный прогноз, спланированный еще почти за двадцать лет до написания этой статьи, имеет реальное утверждение на практике. Сейчас с уверенностью можно констатировать навязываемую «победу» демократии практически во всех странах и континентах. Стирая культурные, географические границы, эта идея демонстрирует силу мировоззренческого детерминизма. Здесь нельзя не принять во внимание мысль В.Н. Фиоментова: «Теоретическая недооценка значимости мировоззренческой детерминации поведения и действий людей ведет к вполне ощутимым практическим действиям» [9, с. 99].

Что касается форсайтов, то они также не только отражают мировоззренческие установки их авторов и заказчиков, но и улавливают общественные настроения, их нацеленность, озабоченность и своеобразное видение глобальных проблем современности. Вот что пишет по поводу форсайтов Сергей Караганов: «Мировоззренческая заданность прогноза, накладывая свой отпечаток на продукцию «фабрик мысли», коммерческих исследовательских центров, общественных институтов и т. п., приводит к формированию в общественном созна-

нии некоего обобщенно-обязательного взгляда на мировые перспективы» [6, с. 23].

Так, у американских форсайтов С. Перселгин выделяет следующие характеристики [5, с. 37.]:

мессианство, что означает признание США наиболее развитой державой, способной влиять на все мировые процессы;

технократичность, т. е. определяющую роль развития технологий по отношению к развитию общества;

приверженность к экономической модели мира, развитием которого можно рационально управлять, используя рыночные инструменты;

геополитичность;

отсутствие катастроф. «Мир разовьется и будет прекрасен!».

Следует охарактеризовать такую позицию как «американоцентричный псевдореализм». Примером таких исследований может служить работа корпорации RAND «Глобальная технологическая революция — 2020» [1] и работа Национального совета США по разведке «Карта глобального будущего» [2].

Для европейских форсайтов характерны следующие черты:

экологичность. Вопросы экологии, энергосбережения и т. д. играют чуть ли не ключевую роль при рассмотрении любой проблемы;

наднациональность. Интересы Европы часто ставятся выше государственных. Предполагается, что существует некая «страховочная сеть» из институтов и механизмов ЕС, а также что союз вообще не даст своих членов в обиду;

идеализм. Многие разрабатываемые решения противоречат традиционно понимаемым национальным интересам и развитию национальной экономики.

Из изложенного следует вывод: любой проект — это либо «ответ на современные угрозы и вызовы, либо же способ реализации сегодняшних целей. Иными словами, проект вписан в текущий контекст» [5, с. 147.]. Но так как любой прогноз нацелен на будущее, то он, с одной стороны, не совсем адекватно его описывает, а с другой стороны, формирует его в соответствии с конкретными о нем представлениями. И формирование это происходит под влиянием доминирующих мировоззренческих установок. В связи с этим необходимо вырабатывать адекватные современности мировоззренческие установки, которые будут направлять человеческую деятельность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Anton, P.S.** The global technology revolution : bio/nano/materials trends and their synergies with information technology by 2015 [текст] / P.S. Anton, R. Silbergliitt, J. Schneider; National Intelligence Council. — Santa Monica, Cal.: RAND, 2001.
2. Mapping the Global Future [текст]: Report of the National Intelligence Council's 2020 Project / Government pointing Office (GPO). — 2004.
3. Новая философская энциклопедия в 4 т. [текст]. — М.: Мысль, 2001 — Т.2.
4. **Панарин, А.С.** Глобальное политическое прогнозирование. Глава 1. Методологические проблемы глобального политического прогнозирования. 1.1. Кризис прогностической парадигмы Просвещения. [Электронный ресурс] / А.С. Панарин Режим доступа: http://www.patriotica.ru/actual/panarin_globprog.html.
5. **Переслегин, С.** Новые карты будущего, или Анти-Рэнд [текст] / / С. Переслегин. — М.: АСТ МОСКВА, СПб.: Terra Fantastica, 2009. — 701 с.
6. Россия и мир. Новая эпоха. 12 лет, которые могут все изменить [текст] / Отв. ред. и рук. авт. кол. С.А. Караганов. — М.: АСТ; Русь-Олимп, 2008. — 444 с.
7. Философский словарь научного прогнозирования [текст] / Шестой исследовательский проект «Понятийный аппарат научного прогнозирования» (2001 — 2002). Прогностика: [Электронный ресурс] // Сайт «Russian Futures Studies Academy» (RFSA) Режим доступа: <http://www.rfsa.ru/project6.html>.
8. Философский словарь [текст] / Под ред. И.Т. Фролова. — 7-е изд. перераб. и доп. — М.: Республика, 2001. — 719 с.
9. **Финогентов, В.Н.** Религиозный ренессанс или философия гуманизма? Мировоззренческий выбор современной культуры [текст] / В.Н. Финогентов. — М.: Книжный дом «ЛИБ-РОКОМ», 2009. — 304 с.
10. **Фукуяма, Ф.** Конец истории и последний человек [текст] / Ф. Фукуяма; Пер. с англ. М.Б. Левина. — М.: Изд-во АСТ, 2004 // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nietzsche.ru/>.
11. Философский словарь научного прогнозирования. Футурология. Шестой исследовательский проект: «Понятийный аппарат научного прогнозирования» (2001 — 2002). // [Электронный ресурс]. Сайт «Russian Futures Studies Academy» (RFSA) Режим доступа: <http://www.rfsa.ru/project6.html>.

В.А. Смелов

ПИОНЕРЫ РАДИОЛОКАЦИИ ИЗ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Явление отражения радиоволн обнаружил в конце 80-х годов XIX века Генрих Герц. В 1897 году российский изобретатель радио А.С. Попов отметил отражение радиоволн от корабля. В 1904 году немец К. Хюльсмайер предложил использовать это явление для обнаружения кораблей. А вот идея использования радиоволн для обнаружения самолетов, похоже, впервые была использована в нашей стране. Правда, еще У. Черчилль заявлял, что первенство принадлежит Англии. Но это теперь неважно. Во всяком случае только две страны в Европе, СССР и Англия, имели на вооружении собственные радиолокационные станции для обнаружения самолетов к началу Второй мировой войны. Понятно, что разработка радиолокационных систем велась в обстановке строжайшей секретности. И уж так получилось, что большая часть людей, занявшихся разработкой этой идеи в СССР, училась и работала в Ленинградском политехническом институте (сами работы проводились в организациях, где секретность была более обеспеченной по сравнению с учебным заведением).

Начать надо, видимо, с Павла Кондратьевича Ощепкова. Он родился в 1908 году, рано осиротел, скитался, попал в трудовую коммуну, только в 12 лет пошел в школу, потом учился в техникуме и с 1928 года на электротехническом факультете Московского института народного хозяйства (объединенного в марте 1930-го с электротехническим факультетом МВТУ в Московский Энергетический институт), курс которого был пройден им за три года. С апреля 1932 года молодой инженер отбывал воинскую повинность в Псковском зенитном артиллерийском полку. Он скоро понял, что успех зенитной стрельбы зависит от дальности обнаружения неприятельских самолетов. А какие

средства обнаружения воздушных целей имелись в ту пору? Оптические, но они не могли применяться ночью, при тумане, сильной облачности. Звукоуловители, но их возможности еще меньше. Прожекторы, но они применяются только ночью, причем наличие самолетов уже должно быть выявлено. Нужны были новые средства для более раннего обнаружения воздушных целей. В июле 1932-го в полк прибыл инспектор Управления противовоздушной обороны с сопровождающими лицами. Вот тут и представилась П.К. Ощепкову возможность изложить начальству свои соображения. Начальники из Москвы мало чего поняли из рассуждений инженера о некоей энергии, которую надо распространять на далекие расстояния, но слушали со вниманием. И уже в ноябре П.К. Ощепков был переведен в Москву в экспериментно-технический сектор Управления ПВО.

В июне 1933 года докладная записка П.К. Ощепкова об использовании радиоволн для обнаружения самолетов была представлена наркому обороны К.Е. Ворошилову и его заместителю М.Н. Тухачевскому. В августе по письму из Наркомата обороны П.К. Ощепков был заслушан в Академии наук (она еще находилась в Ленинграде). Всюду ему была оказана поддержка. Создан Временный технический комитет и специальное конструкторское бюро при нем. 16 января 1934 года в Ленинградском физико-техническом институте прошло совещание, на котором обсуждались практические задачи по созданию аппаратуры радиообнаружения. В совещании участие принимали три академика (А.Ф. Иоффе, А.А. Чернышев и С.И. Вавилов), профессора А.А. Лебедев, Д.А. Рожанский, Н.Д. Папалекси, Н.Н. Андреев, Ф.А. Миллер, В.П. Линник, Н.Н. Семенов, Ю.Б. Харитон (все, кроме Миллера, будущие

члены Академии), недавние студенты В.В. Цимбалин и Б.К. Шембель, а также четверо военных, в их числе П.К. Ощепков. Отметим, что все названные по фамилиям, кроме С.И. Вавилова и А.А. Лебедева, имели в разное время отношение к Политехническому институту. Академик А.Ф. Иоффе, работавший в Политехническом институте с 1906 года, создатель и декан физико-механического факультета, полностью поддерживал П.К. Ощепкова. Задачей было создание аппаратуры, способной обнаружить самолет, летящий на высоте до 10 км и на удалении до 50 км. Все признавали перспективность использования радиоволн, но сомнений и споров по поводу способов решения задачи было немало.

Академик Иоффе получил от М.Н. Тухачевского разрешение на обучение Ощепкова физике и математике на названном выше факультете (в июне 1934 года ставшем инженерно-физическим). В сентябре П.К. Ощепков стал студентом 3-го курса и числился им до апреля 1936-го. Зачетов он не сдавал. Одновременно он был управляющим Временного комитета и курировал исследовательские и конструкторские разработки. Ведь еще не было известно многое: излучение (непрерывное или импульсное), рабочий диапазон волн (метровый, дециметровый или сантиметровой, но ясно, что не больше размера самолета), совмещенное или раздельное расположение передающего и приемного устройств и т. д. Следовало считаться с мощностями передатчиков и чувствительностью приемников, имевшихся в то время. Число организаций и людей, вовлекаемых в исследовательские и конструкторские разработки, все более разрасталось.

В феврале 1934 года по договору с Главным артиллерийским управлением (ГАУ) проблемой радиообнаружения самолетов занялся Ленинградский электрофизический институт (ЛЭФИ), выделившийся из Физико-технического института одновременно с Институтом химической физики в сентябре 1931 года. Директором ЛЭФИ был академик Александр Алексеевич Чернышев, выпускник электромеханического отделения Политехнического института 1907 года и преподаватель его до конца жизни (1940). Непосредственным руководителем работ академик назначил Бориса Константиновича Шембеля, окончившего Политехнический институт в январе 1930-го и работавшего

у профессора А.А. Чернышева еще с III-го курса. В ЛЭФИ он уже возглавлял радиосектор. К июлю 1934 г. Б.К. Шембель с помощниками разработал аппаратуру «Рapid» ультракоротковолнового диапазона непрерывного излучения. Значительный вклад в разработку «Рапида» внес Алексей Игнатьевич Мержеевский, окончивший Политехнический (точнее, в то время Физико-механический) институт в 1933-м. После испытаний комиссия, в которую входили А.А. Чернышев, Б.К. Шембель, П.К. Ощепков и другие, определила предельную дальность обнаружения самолетов в 75 км. Эта система позже послужила основой для разработки системы «Ревень» (РУС-1), прошедшей в конце 1937 года испытания и принятой на вооружение. Перед войной в войсках ПВО имелось 12 комплектов этой системы на западе и 33 на востоке и юге страны. Первые испытания их в боевых условиях состоялись во время советско-финляндской войны. Станции РУС-1 располагались в линию, и самолет обнаруживался, когда он эту линию пересекал.

В сентябре 1934-го П.К. Ощепков разработал принципы системы «Электровизор», согласно которым это должна быть станция кругового обзора с воспроизведением отраженного сигнала на световом экране. Предполагаемая дальность обнаружения 100–200 км. Позже Ощепков дополнил эту систему аппаратурой импульсного излучения радиоволн. Изготовление аппаратуры было поручено группе инженеров во главе с Владимиром Владимировичем Цимбалиным, окончившем физико-механический факультет ЛПИ в 1930-м. С третьего курса он работал в Физико-техническом институте, потом был там же аспирантом и в 1931-м оказался в ЛЭФИ. Проявил себя как очень талантливый изобретатель. В 1934 году по распоряжению командарма первого ранга С.С. Каменева, возглавлявшего ПВО РККА, переведен в конструкторское бюро Управления ПВО. Не его вина, что работа по «Электровизору» не была доведена до конца. В 1938-м он вернулся в «альма матер», стал заведующим лабораторией радиофизики и ассистентом. Кандидатскую диссертацию защитил в 1934 году, но поскольку переходил из ЛЭФИ в другую организацию, то утвержден кандидатом наук был только в 1941-м. В декабре 1941-го стал доцентом. Во время войны с Финляндией он сконструировал, изготовил



и применил во фронтовых условиях аппаратуру для быстрого отогревания обморожений (УВЧ). Всю блокаду В.В. Цимбалин был в Ленинграде и работал в ЛПИ до кончины в 1950 году. Было ему всего 43 года. К сожалению, все его заслуги остались неотмеченными.

Надо сказать, что разные конструкторские группы не контактировали друг с другом, они были разобщены. Возможно, это определялось секретностью, а скорее всего координация разработок была недостаточной. К тому же в 1935 году ЛЭФИ было ликвидировано, из него организовано НИИ-9 с совершенно иной тематикой работ. Академик А.А. Чернышев перешел в Москву, Д.А. Рожанский и Ю.Б. Кобзарев — в Физико-технический институт, к А.Ф. Иоффе, В.В. Цимбалин — в КБ к П.К. Ощепкову.

Директор ЛФТИ академик А.Ф. Иоффе в марте 1935 года поручил возглавлять работу по импульсной радиолокации Дмитрию Апполинариевичу Рожанскому, профессору Политехнического института с 1925 года и члену-корреспонденту АН СССР с 1933-го. Он в июле 1931 года вышел из тюрьмы, куда ОГПУ определило его за отказ на собрании одобрить расстрел большой группы работников холодильной промышленности. В помощь Рожанскому были приданы доцент Политехнического института Юрий Борисович Кобзарев, будущий академик и Герой Социалистического Труда, и два студента-политехника: Павел Александрович Погорелко и Николай Яковлевич Чернецов. В сентябре 1936 года профессор Рожанский скончался, и группу возглавил доцент Кобзарев (он, кстати, был не старше своих студентов).

В июне 1937-го М.Н. Тухачевский и группа высших военных начальников были расстреляны. Арестовывались очень многие из тех, кто когда-то служил с маршалом или получал от него поддержку. В августе арестовали и П.К. Ощепкова (ведь Тухачевский действительно оказывал ему поддержку). П.К. Ощепков был приговорен к пяти годам лишения свободы и направлен в Воркутинский лагерь. Так оборвалась деятельность инициатора и главного действующего лица в разработке отечественной радиолокации. Тут стоит отметить удивительную «заботу» карающих органов о развитии новинок военной техники. В 1929 году упрятан в тюрьму и приговорен к расстрелу, но не расстрелян, политехник Н.Н. Поликарпов — «король ис-

требителей». Расстреляны руководители разработки легендарной «Катюши». Расстрелян главный конструктор двигателя В-2 для танка Т-34, расстрелян и предшественник главного конструктора этого танка. Расстрелян конструктор быстроходных эсминцев П.О. Трахтенберг. А какова судьба конструкторов первых советских подводных лодок? Подобных вопросов можно задать еще немало.

Судьба группы Ю.Б. Кобзарева сложилась удачнее. Группа разработала импульсную радиолокационную установку, которая была испытана в 1937-м. В июне 1940-го РЛС была принята на вооружение и начался промышленный выпуск ее под названием «Редут» (РУС-2). Станция по сравнению с РУС-1 была более совершенной. Она имела общую приемо-передающую антенну и помещалась вместе с источником питания в кузовах двух автомашин, т. е. была мобильной. Дальность обнаружения до 150 км, причем обзор был круговым. Обнаружение самолетов наблюдалось по осциллографическому индикатору. К началу войны готовы были только 6 комплектов, но потом их изготовили еще 132, да еще около полутысячи разборных портативных станций «Пегматит» (РУС-2с), быстро собираемых в любых помещениях (специальных не хватало). Кроме того, под руководством Ю.Б. Кобзарева в 1940 году в районе Токсово была сооружена стационарная РЛС на двух 20-метровых вышках с передающей и принимающей антеннами, что позволяло обнаруживать самолеты на удалении до 250 км и даже низко летящие цели. В войне с Финляндией она поучаствовать не успела, но всю последующую войну с Германией находилась в рабочем состоянии. В марте 1941-го опубликован первый список лауреатов Сталинской премии. В нем имена Ю.Б. Кобзарева, П.А. Погорелко и Н.Я. Чернецова. А П.К. Ощепков был «забыт», хотя накануне нового, 1940 года он был освобожден, но в июле 1941 снова арестован якобы за принадлежность к антисоветской организации. И снова 5 лет. Часть срока отбывал в Свердловской «шараге», куда его перевели по ходатайству академика А.Ф. Иоффе.

Роль радиолокации проявилась особенно значительно 21–23 сентября 1941 года. Тогда немцы, потерпевшие неудачу в попытках прорваться к Ленинграду с помощью танков, решили нанести массированный налет

бомбардировщиков на Кронштадт, чтобы уничтожить там Балтийский флот и, главное, — всю крупнокалиберную артиллерию, состоявшую из снятых с кораблей орудий. Станция РУС-2 стояла в поселке Большая Ижора, т. е. на знаменитом Ораниенбаумском пятачке. Старший оператор танции Г. Гельфенштейн обнаружил огромную группу немецких самолетов на удалении 200 км (он научился различать не два-три самолета, а любое их число). Над поселком Сиверская группа пополнилась самолетами, поднятыми с местных аэродромов, затем разделилась на три части и двинулась не на Ленинград, а на Кронштадт. На кодовое сообщение на пункте ПВО в Кронштадте не отреагировали, поскольку не поверили (о существовании строго засекреченных РЛС там ничего не знали). Тогда оператор по телефону прямым текстом сообщил, что минут через 12 над Кронштадтом появится армада из 220–250 бомбардировщиков. Только тогда там была объявлена воздушная тревога. При появлении фашистских самолетов перед ними выросла стена заградительного огня. Стройные, как на параде, ряды бомбардировщиков были рассеяны, многие самолеты сбрасывали бомбы в залив и уходили в тыл. В последующие два дня массированные налеты повторялись с немецкой точностью в те же часы, но число самолетов в последний день уменьшилось до 140–160. По разным данным 25–35 самолетов были сбиты (тогдашние возможности зенитной артиллерии были невелики), а часть самолетов была повреждена. А ведь это наступал Первый воздушный флот Германии, усиленный 8-м ударным

авиакорпусом, не столь давно превратившим в груды кирпича английский город Ковентри. Кронштадту эта воздушная армия все-таки нанесла потери: потоплены лидер «Минск», сторожевик «Вихрь», подводная лодка серии М («Малютка») и тральщик, повреждены линкоры «Марат», «Октябрьская революция» и эсминец. Погибло несколько сотен моряков и горожан, разрушена часть построек. Но огневая мощь дальнобойной артиллерии Кронштадта сохранилась, что заставило немецкое командование оставить попытки взять Ленинград штурмом. Для сравнения можно привести случившийся в декабре того же года налет японской ВВС на американскую военно-морскую базу Перл Харбор. Там тоже была РЛС (американская), но ее оператор не проявил должной ответственности. Японцы сбросили на базу примерно вдвое или втрое меньшую, чем в Кронштадте, массу бомб и потопили 4 линкора, тяжелый крейсер, 2 эминца, повредили еще большее число судов, уничтожили около 300 самолетов и убили около 4 тысяч военных. Немецкие летчики, имевшие немалый боевой опыт, могли бы нанести Кронштадту еще большие потери, если бы не одна советская РЛС, о которой они не подозревали, и не хорошая выучка 19-летнего ее оператора.

Создание радиолокации стало государственной задачей. В ее решение вовлекалось все большее число людей, среди которых были и политехники. Добавим, что и на самых первых порах трудились конструкторы и ученые, не имевшие связи с Политехническим институтом. Но первые действующие в боевой обстановке РЛС были созданы политехниками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфенштейн Г. Радары вступают в бой [текст] / Г. Гельфенштейн // Наука и жизнь. 1991. № 8.
2. Голотюк В. Ученый, конструктор, изобретатель... [текст] / В. Голотюк // Военно-промышленный курьер. 2008. № 27 (243).
3. Кокин Л. Далекие шаги [текст] / Л. Кокин // Наука и жизнь. 1981. — № 8. — С. 76–82.
4. Ощепков П.К. Жизнь и мечта. 4-е изд., доп. и испр. М.: Моск. рабочий, 1984. — 320 с.
5. Полторак С.Н. Из истории рождения и реализации идеи радиолокации [текст] / С.Н. Полторак // Наука и военная техника. СПб. — 2001. — С. 170–175.
6. Шембель Б.К. У истоков радиолокации СССР [текст] / Шембель Б.К. — М.: Советское радио, 1977. — 80 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ****КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ**

АНДРИАНОВА Мария Юрьевна — кандидат технических наук, ведущий программист кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-59-28

АНАХОВ Сергей Вадимович — кандидат физико-математических наук доцент кафедры общей физики Российского государственного профессионально-педагогического университета.

620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11,
(343) 338-44-05

АЛЬ-АХВАЛЬ Несрен Ахмед Серхан — аспирант кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-87-22
laith_peterburg@yahoo.com

АНТОНОВ Валерий Иванович — доктор физико-математических наук профессор, заведующий кафедрой высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-67-50
antonovi@mail.ru

БАНДУРИН Иван Иванович — ассистент кафедры теоретических основ электротехники Псковского государственного политехнического института.

180000, Псков, ул. Льва Толстого, д. 4
(8112) 75-29-35
bandurin_ivan@mail.ru

БАРЗОВ Александр Александрович — доктор технических наук профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
(499) 263-65-96

БАСС Максим Станиславович — кандидат технических наук доцент, начальник отдела коммерциализации технопарка Читинского государственного университета.

672039, Чита, ул. Александро-Заводская, д. 30
(3022) 41-70-85
bms77@mail.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — кандидат технических наук директор Технопарка Читинского государственного университета.

672039, Чита, ул. Александро-заводская, д. 30
(3022) 41-70-85

БЕССОЛИЦЫН Алексей Витальевич — старший преподаватель кафедры электрических станций Вятского государственного университета.

610000, Киров, ул. Московская, д. 36
(332) 53-08-90

БОГОЛЕПОВ Игорь Ильич — доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-59-49

БОРИСОВ Сергей Николаевич — кандидат философских наук доцент кафедры философии Белгородского государственного университета.

308015, Белгород, ул. Победы, д. 85
(4722) 30-11-17
SBorisov@bsu.edu.ru

БОРОВКОВ Валерий Михайлович — заведующий кафедрой промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-48-28

БРЕКИ Александр Джалюльевич — аспирант, заведующий лабораторией трения и смазки кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 301-55-57
albreki@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВ Анатолий Петрович — кандидат технических наук профессор кафедры электрических и электронных аппаратов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 590-71-93

ВАСИЛЬЕВА Екатерина Сергеевна — кандидат технических наук доцент кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-89-69
katrinfr@inbox.ru

ВАСИЛЬКОВ Сергей Дмитриевич — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-93-02

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — кандидат технических наук, доктор педагогических наук профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ имени Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
(499) 263-65-96
galcomputer@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович — аспирант кафедры пластической обработки металлов, Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-80-90, 552-89-52

ГАСАНОВ Бадрудин Гасанович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и организации дорожного движения Южно-Российского государственного технического университета.

346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132
(863) 525-56-54

ГОЛОВИН Алексей Николаевич — аспирант кафедры теории электрических цепей Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича.

191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 61
(812) 571-57-45
aalex984@mail.ru

ГОРЯЧИХ Наталья Викторовна — аспирант кафедры тепловых электрических станций Читинского государственного университета.

672039, Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 30
(3022) 41-70-85
Luntik.87@mail.ru

ДАНИЛЕЦ Лев Анатольевич — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-48-28

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук доцент кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-14-31

ДОЛГУШЕВ Дмитрий Михайлович — ведущий инженер кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-14-31

ЕЛЬЧАНИНОВ Григорий Сергеевич — аспирант кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-64-29

ЕПИФАНОВ Андрей Андреевич — аспирант кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-65-80
a.a.epifanov@gmail.com.

ЕФИМОВ Артём Дмитриевич — аспирант кафедры автомобильного транспорта и организации дорожного движения Южно-Российского государственного технического университета.

346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132
(863) 525-56-54

ЖИВУШКИН Алексей Алексеевич — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-65-66

ЗАЙЦЕВ Александр Владимирович — заместитель главного диспетчера по режиму ОАО «СО ЕЭС» Ленинградского РДУ.

194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1
(812) 595-39-23

ЗОЛОТОВ Александр Максимович — доктор технических наук профессор кафедры пластической обработки металлов, Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-80-90, 552-89-52

ИВАНОВ Сергей Анатольевич — кандидат технических наук профессор, первый проректор Читинского государственного университета.

672039, Чита, ул. Александрово-Заводская, д. 30
(3022) 41-70-85

ИВАНОВСКИЙ Ростислав Игоревич — доктор технических наук профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-16-39
iri@dcn.infos.ru.

ИГНАТЁНОК Вячеслав Викторович — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-48-28
nadir83@list.ru

КАРПОВ Алексей Сергеевич — студент электро-механического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 595-39-23
karpov_as86@mail.ru

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-75-31

КИРИЛЛОВ Николай Борисович — доктор технических наук профессор кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-75-37

КОЛПАКОВ Владимир Иванович — кандидат технических наук доцент кафедры технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ имени Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
(499) 263-65-96

КОМАРОВ Виктор Дмитриевич — доктор философских наук профессор, действительный член Академии гуманитарных наук, Петровской академии наук и искусств, Российской экологической академии.

199106, Санкт-Петербург, Косая линия В.О., д. 15-А
(812) 322-07-82

КОНДРАТЬЕВ Михаил Александрович — студент 5 курса кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-16-39
kondratyev@dcn.infos.ru

КОРБУТОВ Иван Иванович — начальник мобильного отдела и специальных программ Министерства образования и науки.

125009, Москва, ул. Тверская, д. 11
(495) 629-29-35

КОРОВКИН Николай Владимирович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-75-72
nikolay.korovkin@gmail.com

КРАВЧЕНКО Илья Владимирович — главный диспетчер, первый заместитель директора ОАО «СО ЕЭС» Ленинградского РДУ.

194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1
(812) 595-39-23

КУДРЯШЕВ Фёдор Александрович — студент 5 курса кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 702-70-43

ЛАХОВА Екатерина Николаевна — аспирант кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-64-29
Lahova_ekaterina@mail.ru

ЛУКАШЕВИЧ Анатолий Анатольевич — кандидат технических наук доцент, докторант кафедры строительной механики и теории упругости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-60-87
aaluk@bk.ru

МАКСИМОВ Максим Юрьевич — аспирант кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-89-69
berezovii_fars@mail.ru

МАТУШКИН Анатолий Владимирович — аспирант кафедры технологий сварочного производства Уральского государственного технического университета (УПИ).

620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11
(343) 338-44-05

МОЛОДКИНА Людмила Михайловна — доктор физико-математических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-59-28

МАЛЮГИН Виталий Сергеевич — аспирант кафедры электротехники, электрооборудования и автоматики инженерного факультета Рязанского государственного агротехнического университета имени П.А. Костычева.

390044, Рязань, ул. Костычева, д. 1
(4912) 35-06-72

МАЛЮГИН Сергей Герасимович — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог и гидравлики, Рязанского государственного агротехнического университета имени П.А. Костычева.

390044, Рязань, ул. Костычева, д. 1
(4912) 35-05-58

НАТОРХИН Максим Игоревич — аспирант кафедры общей физики Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 324-03-39

НОВИКОВ Виталий Иванович — аспирант кафедры технологий конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 55-75-37, 552-93-02

НОВОСЕЛОВА Ольга Александровна — аспирант кафедры электрических станций Вятского государственного университета.

610000, Киров, ул. Московская, д. 36
(332) 53-08-90

НОСОВ Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-64-29

ОРЛОВ Александр Васильевич — кандидат экономических наук доцент кафедры политэкономии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-63-00
alexandrvorlov@mail.ru

ПАРШИКОВ Руслан Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-80-90, 552-89-52

ПОПОВ Максим Георгиевич — кандидат технических наук доцент кафедры электрических станций и автоматизации энергетических систем электромеханического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 535-62-56, 534-48-00
pmg2002@yandex.ru;
PopovMG@eef.spbstu.ru

ПОСЕВКИН Алексей Анатольевич — магистр техники и технологии инженер кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 702-70-43

ПЫКИН Юрий Анатольевич — доктор технических наук профессор кафедры физико-химических технологий защиты биосферы Уральского государственного лесотехнического университета.

620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11
(343) 338-44-05

РУКОМОЙНИКОВА Елена Геннадьевна — аспирантка кафедры философии Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена.

197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 26, офис 110
(812) 233-56-62

САЛЬНИКОВ Сергей Константинович — соискатель кафедры технологий ракетно-космического машиностроения МГТУ имени Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
(499) 263-65-96

СЕМЁНОВ Александр Георгиевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-49-05
00.agent.007@mail.ru;
angel.777@mail.ru

СЕМИН Евгений Геннадиевич — доктор технических наук, профессор, академик РМА, почетный работник жилищно-коммунального хозяйства России, заведующий отделением городского строительства и хозяйства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 592-39-71
iogh@cef.spbstu.ru

СЕРЕДКИН Александр Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры тепловых электрических станций Читинского государственного университета.

672039, Чита, ул. Александрово-заводская, д. 30
(3022) 41-70-85
aleksandr-ns@mail.ru

СМЕЛОВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук профессор кафедры истории Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-96-91

СИДОРЕНКО ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА — аспирант кафедры философии Орловского государственного аграрного университета.

302008, Орел, ул. Молодежная, д. 1
(486) 2-70-18-86
o.v.sidorenko@yandex.ru

СИЛИН Николай Витальевич — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники Дальневосточного государственного технического университета.

690990, Владивосток, ул. Пушкинская, д. 10
(4232) 45-02-02.
silin22@mail.ru

СМИРНОВ Евгений Сергеевич — аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-80-90, 552-89-52

СНОПОК Галина Ивановна — начальник управления по делам ГО и ЧС Центра по делам ГО и ЧС Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-76-93

СТОЛЯРОВА Наталья Павловна — магистр кафедры технологий, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-59-49

ТИХОМИРОВА Елена Александровна — инженер I категории ОАО «Климов».

194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 11
(812) 295-01-01, доб. 1-63

ТИТЕНСКИЙ Владимир Ильич — кандидат технических наук доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-65-80

ТОЛОЧКО Олег Викторович — доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-48-01
ol_tol@hotmail.com

УМАНЕЦ Владимир Николаевич — доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-87-22

ФЕДОРОВ Михаил Петрович — член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 297-16-16 (приемная ректора)
(812) 297-59-28 (кафедра)

ХОРОШИНИНА Елена Николаевна — аспирант кафедры электрических станций Вятского государственного университета.

610000, Киров, ул. Московская, д. 36
(332) 53-08-90

ЧУЛКИН Сергей Георгиевич — доктор технических наук заведующий кафедрой машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 552-64-29
uwc99@mail.ru

ЧУСОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук доцент, заместитель заведующего кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии, заведующий отделением прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 534-87-22
chusov@cef.spbstu.ru

ЦЕЛИЩЕВА Зухра Абдурашидовна — ассистент кафедры культурологии и философии Нижневартовского государственного гуманитарного университета.

628605, Ханты-Мансийский А.О. — Югра, Нижневартовск, ул. Ленина, д. 56
(3466) 46-53-43
teacher@intramail.ru

Цыбалова Людмила Марковна — доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе НИИ гриппа СЗО РАМН.

196376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 15/17
(812) 234-62-61
sovet@influenza.spb.ru

ШАМКИН Иван Сергеевич — аспирант кафедры теоретической и общей электротехники Дальневосточного государственного технического университета.

8-950-28-17-204
690990, Владивосток, ул. Пушкинская, д. 10
(4232) 45-02-02
ImNexus@rambler.ru
ImNexus@mail.ru

ШАРОВА Наталья Анатольевна — аспирант кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, инженер-конструктор 2 категории ОАО «Климов».

194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 11
(812) 295-01-01, доб. 1-63
nash.70@mail.ru

ШЕЛОМОВ Владимир Борисович — доктор технических наук, заведующий кафедрой колёсных и гусеничных машины Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 554-49-05

ШЕМЯКИН Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры организации автомобильных перевозок и безопасности дорожного движения Рязанского государственного агротехнического университета имени П.А. Костычева.

390044, Рязань, ул. Костычева, д. 1
(4912) 35-38-74

ШМЕЛЕВА Ольга Юрьевна — кандидат экономических наук, докторант кафедры теории языка и переводоведения, заведующая кафедрой коммуникационных технологий и связей с общественностью Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов.

191023, Санкт-Петербург, Москательный пер., д. 4, ауд. 338
(812) 310-51-60

ЭЛИЗОВ Александр Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры колёсных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(812) 702-70-43



АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Попов М.Г. СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ УПРАВЛЯЕМОЙ МЕЖСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.

В работе рассматриваются виды повреждений и ненормальных режимов электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ с используемым устройством FACTS мощностью 500 000 кВА. Представлены основные решения по созданию системы релейной защиты и автоматики устройства FACTS с продольно-поперечным регулированием при учете его схемно-технических особенностей.

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА 500 КВ. FACTS. ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЙ. СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ. ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО.

Силин Н.В., Коровкин Н.В., Шамкин И.С. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Рассмотрены актуальные вопросы эффективной организации технического обслуживания и ремонта высоковольтного электроэнергетического оборудования с учетом отечественного и зарубежного опыта. Сделан вывод о целесообразности использования электромагнитного способа контроля на этапах как функциональной, так и технической диагностики.

ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ДИАГНОСТИКА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ.

Середкин А.А., Басс М.С., Иванов С.А. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭНЕРГООБСЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА ЧИТЫ.

Излагаются основные результаты энергообследования ТЭЦ, котельных, тепловых сетей и потребителей тепла города Читы. Предложенные на основе энергообследования энергосберегающие мероприятия и направления деятельности позволяют практически полностью реализовать выявленный потенциал энергосбережения.

СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ. ОТОПЛЕНИЕ. ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЕ.

Батухтин А.Г. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОЙ МОЩНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

В статье рассмотрены перспективы использования тепловых насосов для повышения эффективности функционирования и располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения. Дана оценка их применения как в тепловых схемах ТЭЦ, так и в тепловых сетях. Предложен новый способ центрального качественного регулирования отпуска теплоты с корректировкой температуры теплоносителя по лучам тепловых сетей.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС. ОПТИМИЗАЦИЯ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

Иванов С.А., Батухтин А.Г., Горячих Н.В. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ОТ ТУРБОАГРЕГАТОВ ТЭЦ.

Представлена сравнительная оценка эффективности способов получения дополнительной мощности от турбоагрегатов ТЭЦ. Для вариантов, требующих капитальных вложений и не требующих, определен критерий сравнения. В качестве экономических критериев выбора оптимальных теплофикационных систем в этих условиях выступают удельные затраты, отнесенные к получаемой дополнительной мощности ТЭЦ. В качестве примера рассмотрены три способа получения дополнительной мощности: с ограничением тепловой нагрузки турбины и покрытием недоотпуска тепла ПВК; ограничением нагрузки турбины и покрытием недоотпуска тепла от основных сетевых подогревателей пиковым подогревателем; с ограничением нагрузки турбины и использованием аккумулирующих свойств зданий и тепловых сетей

ТУРБИНА, ПАРОВОЙ КОТЕЛ. ПИКОВЫЙ ВОДОГРЕЙНЫЙ КОТЕЛ. ИНЕРЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОСЕТЕЙ И ЗДАНИЙ. КАПИТАЛЬНЫЕ ВЛОЖЕНИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИЗДЕРЖКИ.

Молодкина Л.М., Андрианова М.Ю., Чусов А.Н. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО И ФЕРМЕНТАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОДЕСТРУКЦИЮ СРЕДНЕ- И МЕДЛЕННОРАЗЛАГАЕМЫХ ОТХОДОВ.

В работе приведены результаты изучения влияния ультразвука и промышленных ферментных препаратов (Биотэл и Хамекозим II) на эффективность биodeградации растительных и бумажных отходов в технологиях получения биогаза. Показана возможность применения капиллярного электрофореза и спектрофлуориметрии при изучении процессов биodeградации растительного сырья и бытовых отходов.

БИОЭНЕРГЕТИКА. БИОГАЗ. РАСТИТЕЛЬНЫЕ И БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ. ФЕРМЕНТНЫЕ ПРЕПАРАТЫ. БИОДЕГРАДАЦИЯ.

Бессолицын А.В., Новоселова О.А., Попов М.Г. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ.

Метод конечных элементов используется для вычисления элементов матрицы продольных сопротивлений воздушной линии электропередачи. Результаты хорошо сходятся с результатами, получаемыми классическими методами.

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ПРОДОЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

Бессолицын А.В., Попов М.Г., Хорошинина Е.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ И ВЗАИМНЫХ ЕМКОСТЕЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ.

В статье рассматривается использование метода конечных элементов для расчета трехмерного электрического поля воздушной линии. Предложен алгоритм для определения электрической емкости проводов линии электропередачи.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ.

Головин А.Н. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В РЕЗОНАНСНОМ ИНВЕРТОРЕ ТОКА.

Определены аналитические соотношения для потерь мощности в мостовом инверторе тока. Приведены оценки и рекомендации по выбору IGBT и MOSFET транзисторных ключей.

МОСТОВОЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТРАНЗИСТОРЕ.

Игнатенок В.В., Боровков В.М. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ.

Рассмотрены существующие методы регулирования отпуска тепловой энергии потребителю от централизованных систем теплоснабжения. Приведена краткая характеристика каждого метода и определен наиболее оптимальный способ регулирования.

ТЕПЛОФИКАЦИЯ. ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. МЕТОДЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООТПУСКА: КАЧЕСТВЕННЫЙ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННО-КАЧЕСТВЕННЫЙ.



Васильев А.П., Бандурин И.И. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОПЕРАТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.

В статье разработана методика, которая позволяет выбрать оптимальный вариант структуры оперативного обслуживания по критерию минимума затрат на систему оперативного обслуживания. Предложен новый параметр для оценки эффективности работы этой системы.

ОПЕРАТИВНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ. ПОДСТАНЦИЯ. СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. АВТОМАТИКА. ТЕЛЕМЕХАНИКА.

Зайцев А.В., Карпов А.С. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ В РАЙОНАХ С ПРЕОБЛАДАНИЕМ ГЭС.

Внедрение микропроцессорной техники в устройства противоаварийной автоматики (ПА), осуществляющие управление режимными параметрами энергосистемы, позволяет практически мгновенно идентифицировать изменение режима или аварийную ситуацию и сформировать оптимальные управляющие воздействия на регулируемый параметр.

ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА.

Кравченко И.В., Карпов А.С. ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ ПАРОТУРБИННЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ФУНКЦИЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ.

Современные системы управления паровых турбин выполняют функции режимного автоматического управления. Эффективно также их применение в устройствах противоаварийной автоматики.

ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА. РЕЖИМНАЯ АВТОМАТИКА. ИМПУЛЬСНАЯ РАЗГРУЗКА ТУРБИН.

Шеломов В.Б., Добрецов Р.Ю. МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ И БУКСОВАНИЯ ФРИКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ.

Предложена методика расчета, позволяющая оценить потребную мощность двигателя и мощность, рассеиваемую на буксующем фрикционном элементе управления гусеничной машины, использующая внешние параметры механизма поворота. Методика проиллюстрирована примером расчета.

ПОВОРОТ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ. ПОТРЕБНАЯ МОЩНОСТЬ. ФРИКЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ.

Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Васильева Е.С., Толочко О.В., Максимов М.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ МОДИФИКАТОРОВ ТРЕНИЯ.

Наряду с новыми нелегированными смазочными материалами широкое распространение на рынке получают смазочные композиции, содержащие присадки конкретного функционального назначения. В работе исследовалось влияние природных и синтетических модификаторов трения на основные трибологические свойства смазочных композиций (СК) на основе авиационного масла МС-20. Испытания проводились на парах трения из стали ШХ-15.

Сравнительный анализ полученных данных показал увеличение противозадирных свойств и нагрузки сваривания СК при легировании базового масла частицами дихалькогенидов вольфрама. Однако при использовании серпентинита в тех же условиях испытания наблюдается увеличение противоизносных свойств.

ИНДЕКС ЗАДИРА. НАГРУЗКА СВАРИВАНИЯ. МОДИФИКАТОРЫ ТРЕНИЯ. СЕРПЕНТИНИТ. ДИХАЛЬКОГЕНИДЫ ВОЛЬФРАМА. ЖИДКИЕ СМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ.

Шарова Н.А., Живушкин А.А., Тихомирова Е.А. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЯЕМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИНЫ ПЕРСПЕКТИВНОГО АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.

Работа посвящена современным и перспективным конструкционным материалам и их соответствию требованиям авиационных ГТД нового поколения. Особое внимание уделено малоразмерным ГТД как наиболее сложным по реализации передовых систем охлаждения.

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ. КЕРАМИЧЕСКАЯ МАТРИЦА. НИКЕЛЕВЫЕ СУПЕРСПЛАВЫ. ИНТЕРМЕТАЛЛИДЫ. КОМПОЗИТЫ. АНИЗОТРОПИЯ. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР.

Малюгин С.Г., Шемякин А.В., Малюгин В.С. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТОЛЩИНЫ ПОДЛОЖКИ.

Рассмотрены вопросы применения статистических методов управления качеством материалов при подготовке поверхностей техники к покраске, а именно статистический контроль грунтованных поверхностей образцов.

АДГЕЗИЯ. ГРУНТОВАНИЕ. ПОВЕРХНОСТЬ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ.

Долгушев Д.М., Семенов А.Г., Элизов А.Д. КОНЦЕПЦИЯ ТРАНССКУТЕРА АМФИБИИ ДЛЯ ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ.

Приведены результаты разработки проекта амфибийного транскутера «Аква», предназначенного главным образом для лиц с ограниченной подвижностью. Разработка опирается на первый опыт создания транскутеров как новой разновидности электроприводных многофункциональных транспортных средств особо малого класса. Предложена концепция машины, ее компоновка, дана оценка плавучести и остойчивости в воде.

ТРАНССКУТЕР. СКУТЕР. ИНВАЛИДНАЯ КОЛЯСКА. ЭЛЕКТРОПРИВОД. АМФИБИЯ. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ. ПЛАВУЧЕСТЬ. ОСТОЙЧИВОСТЬ.

Кудряшев Ф.А., Посевкин А.А., Семенов А.Г., Элизов А.Д. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ГИБРИД-КОНЦЕПТОВ НА БАЗЕ АВТОМОБИЛЯ И ТРАНССКУТЕРА.

Предложены инновационные проекты в области безрельсового электротранспорта: электромобиль и транскутер с гибридными силовыми установками (ДВС + электродвигатели с аккумуляторами). Разработки опираются на опыт создания и испытаний аналогичных изделий и наличие квалифицированных кадров и других условий, благоприятных для реализации проектов.

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ. СКУТЕР. ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ТРАНСПОРТ. РЕАБИЛИТАЦИОННАЯ ТЕХНИКА. ГИБРИДНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА.

Барзов А.А., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Сальников С.К. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО ФАКТОРА УЛЬТРАСТРУИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.

В работе установлено, что кинематический фактор ультразвуковой обработки — недостаточно исследованным технологический параметр, изучение и учет которого способны повысить эффективность данной технологии в целом. Рассмотрена модель влияния кинематического фактора на процесс формирования профиля реза высокоскоростной абразивно-жидкостной суспензией, осуществлено экспериментальное определение профиля реза и его глубины в зависимости от различных значений КФ.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКТОР. УЛЬТРАСТРУЙНАЯ ОБРАБОТКА. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ.

Лахова Е.Н., Носов В.В. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НАХЛЕСТОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.

На примере образцов нахлесточных сварных соединений рассмотрен метод оценки влияния неоднородности напряженного состояния и структуры материала на прочностные характеристики деталей машин и конструкций. Определена причина наблюдавшейся в некоторых случаях низкой степени корреляции концентрационно-кинетического показателя прочности с величиной максимальных напряжений в образце.

ПРОЧНОСТЬ. РАЗРУШЕНИЕ. НЕОДНОРОДНОСТЬ. МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.

Кириллов Н.Б., Васильков С.Д., Новиков В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ.

Рассмотрены особенности влияния электролитно-плазменного полирования (ЭПП) на качество поверхностного слоя, которое определяется такими параметрами как уровень остаточных напряжений, микроструктура и микротвердость.

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ. СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ. МИКРОТВЕРДОСТЬ. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ.



Ельчанинова Г.С., Носова В.В. ОСОБЕННОСТЬ СОСТОЯНИЯ НАХЛЕСТОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИХ ПРОЧНОСТИ.

Предложены критерии неоднородности и прочностного состояния нахлесточных сварных соединений, рассмотрены вопросы их экспериментальной оценки. Показана адекватность микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов, эффективность ее использования для неразрушающего контроля прочности существенно неоднородных технических объектов.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.

Золотов А.М., Ганин С.В., Паршиков Р.А., Смирнов Е.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРОШКОВ В КАПСУЛАХ.

Рассмотрены возможности компактирования порошковых заготовок в капсулах методом равноканального углового прессования. С использованием математического моделирования проанализированы основные стадии и особенности процесса. Представлены результаты экспериментальных исследований.

РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ. АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОРОШКИ. КОМПАКТИРОВАНИЕ В КАПСУЛАХ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Гасанов Б.Г., Ефимов. А.Д. АКТИВАЦИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДВУХ-СТУПЕНЧАТОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Рассмотрены особенности циклического высокотемпературного нагрева на второй стадии спекания порошковых биметаллических изделий. Получены аналитические зависимости, характеризующие протекание диффузионных процессов на второй стадии спекания. Установлено, что прерывистый высокотемпературный нагрев рабочего слоя токами высокой частоты позволяет исключить образование межслойной пористости и соответственно повысить качество биметаллических и многослойных порошковых изделий.

ДИФфуЗИОННЫЙ ПРОЦЕСС. БИМЕТАЛЛ. ДВУХСТУПЕНЧАТОЕ СПЕКАНИЕ. ЦИКЛИЧНЫЙ НАГРЕВ. МЕЖСЛОЙНАЯ ПОРИСТОСТЬ.

Наторхин М.И. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СВИНЦОВО-СЕРЕБРЯНОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ ХЛОРИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.

В статье представлены новые инновационные технологии в металлургии серебра. Описываются теоретические аспекты растворимости цветных металлов в хлоридных растворах и практические результаты по их хлоридному выщелачиванию. Показана новая экологичная технологическая схема переработки свинцово-серебряных материалов. Сделан вывод, что необходимо использовать химические технологии в комбинации с другими техниками для улучшения экологии.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МЕТАЛЛУРГИЯ. СЕРЕБРО. ЭКОЛОГИЯ.

Орлов А.В. К ОБОСНОВАНИЮ СТЕПЕННОГО МЕТОДА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛЕЙ ОСТАТОЧНОГО ЧЛЕНА.

В статье представлено обоснование разделения остаточного члена между вызвавшими его факторами. Предложен алгоритм, на основе которого вне зависимости от количества множителей, их абсолютных значений и знака можно результат произведения выразить через сумму слагаемых, соответствующих количеству множителей, единственно обоснованным методом. Предлагаемое решение в литературе отсутствует.

ОСТАТОЧНЫЙ ЧЛЕН. ФАКТОРЫ. АЛГОРИТМ РАЗДЕЛЕНИЯ. ДОЛИ. ПРОИЗВЕДЕНИЕ. СМНОЖИТЕЛИ. СУММА.

Епифанов А.А., Титенский В.И. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОГО ГАЗА В ПЛОСКИХ КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТКАХ.

Представлены результаты практического использования вычислительной гидрогазодинамики (CFD) применительно к плоским компрессорным решеткам. Проведено численное исследование дозвукового течения вязкого газа в плоской компрессорной решетке при различных углах атаки. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОГАЗОДИНАМИКА. ДОЗВУКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОГО ГАЗА. ANSYS CFX. ПЛОСКАЯ КОМПРЕССОРНАЯ РЕШЕТКА. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ.

Предлагается технология, в которой процесс обезвреживания нефтесодержащих отходов происходит в среде неравновесной низкотемпературной плазмы, обеспечивающей режимы, приводящие к необратимому разрушению диоксинов. Проведена оптимизация технологии по параметрам работы на жидких и парогазовых смесях. Повышение эффективности деструкции и КПД процесса достигается за счет применения оригинальной технологии рекуперативного теплообмена.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. НЕФТЕШЛАМЫ. ПЛАЗМОТРОН. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПИРОЛИЗ. ПИРОПЛАЗМА. БАРБОТАЖ.

Данилец Л.А. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ПРОБЫ.

Разработана методика расчета полноты сгорания топлива в газотурбинных установках с использованием измерений объемных долей продуктов сгорания, состава топливного газа и газо-воздушной смеси.

ПОЛНОТА СГОРАНИЯ. ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ. НЕДОЖОГ. ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ. НИЗШАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.

Кондратьев М.А., Ивановский Р.И., Цыбалова Л.М. ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЯ.

В статье представлен агентный подход к имитационному моделированию как новый способ моделирования эпидемических процессов. Он отличается от классического подхода, основанного на использовании дифференциальных уравнений. С его помощью в среде AnyLogic 6 реализована компьютерная имитационная модель, позволяющая выполнить оперативный прогноз заболеваемости гриппом на основе текущих статистических данных.

АГЕНТНЫЙ ПОДХОД. ANYLOGIC. ПРОГНОЗ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИЙ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ. ГРИПП.

Федоров М.П., Уманец В.Н. АНАЛИЗ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРОДОВ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА).

Рассмотрены различные определения науки «Геоэкология» применительно к строительству и ЖКХ. Дан анализ геоэкологических проблем на примере строительства Санкт-Петербурга. Определен круг основных научно-практических задач в области строительной геоэкологии.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ГЕОСФЕРЫ ЗЕМЛИ. ЛИТОСФЕРА. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ. СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ.

Боголепов И.И., Столярова Н.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОКОН СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ.

Важность вопроса обеспечения необходимой звукоизоляции окон жилых и общественных зданий связана с тем, что именно ею полностью определяется звукоизоляция наружных стен этих зданий от внешнего шума. Однако требуемую звукоизоляцию окон разные авторы предлагают определять разными методами. Статья посвящена анализу этих методов: инженерной сути, рациональной области применения, плюсам и минусам.

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ОКОН. МЕТОД НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ. МЕТОД РАСЧЕТА ОЖИДАЕМОЙ ШУМНОСТИ.

Аль-Ахваль Н.С., Семин Е.Г. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ ЙЕМЕНА).

В статье показано, что отходы отрицательным образом влияют на экологическую обстановку региона, они могут оказывать большое влияние на различные аспекты жизни человека. Дана сравнительная характеристика состояния экосистемы при использовании различных технологических решений в системе обращения с отходами и представлен состав газа с мусорных свалок, которые ясно иллюстрирует его потенциальную опасность для окружающей среды.

ТВЕРДЫЕ КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ (ТКО). СВАЛКА. ЗАГРЯЗНЕНИЕ. ДИОКСИНЫ. ГАЗ.



Антонов В. И. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В СПбГПУ.

В статье рассмотрены принципы фундаментального математического образования. Приведены данные о реализации этих принципов на кафедре высшей математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Очерчены проблемы, связанные с переходом на двухуровневую систему высшего образования и введением новых образовательных стандартов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ. ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА.

Комаров В. Д. СТАТУС И СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАУК.

На основе онтологического, исторического и гносеологического анализа технологии выявляется предмет технологических наук. Последнее идентифицируется как относительно самостоятельная отрасль современной науки. Рассматриваются статусы технических и технологических наук, обозначена перспектива научно-технологической революции.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТСП. ТЕХНОЛОГИЯ. ТЕХНИКА. ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ.

Корбутов И. И., Снопков Г. И. ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВУЗОМ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ МИРНОГО И ВОЕННОГО ВРЕМЕНИ.

Рассматриваются вопросы совершенствования организации управления вузом в условиях повседневной деятельности, при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций и ведении военных действий путем формирования системы управления гражданской обороной. Показано, что предложенная система управления обеспечивает повышение эффективности управления в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени, а также мобильна при решении вопросов пожарной безопасности.

УПРАВЛЕНИЕ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ. ПОВСЕДНЕВНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ. ГРАЖДАНСКАЯ ОБОРОНА.

Кесаманлы Ф. П. П. С. ЭРЕНФЕСТ, Д. С. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ И А. Ф. ИОФФЕ – ОСНОВАТЕЛИ ПЕРВЫХ ТРЕХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ В ПЕТЕРБУРГЕ – ПЕТРОГРАДЕ – ЛЕНИНГРАДЕ.

Рассмотрено состояние физики в Петербурге в начале XX века. В это время там работали пять широко известных в России профессоров физики: И. И. Боргман и О. Д. Хвольсон в Университете, Н. А. Гезехус в Технологическом институте, Н. Г. Егоров в Военно-медицинской академии и В. В. Скобелцын в Политехническом институте. Однако ни один из этих пяти крупных ученых не создал своей научной школы.

Научные школы по физике в Петербурге начали зарождаться с конца первого десятилетия XX века. В зарождении в Петербурге-Петрограде научных школ, которые окончательно оформились в Ленинграде, велика роль научных семинаров П. С. Эренфеста, Д. С. Рождественского и А. Ф. Иоффе. Эренфест заложил основы научной школы в области теоретической физики, Рождественский и Иоффе – в области теоретической физики.

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР. НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ. ФИЗИКА. ИСТОРИЯ. ЭРЕНФЕСТ. РОЖДЕСТВЕНСКИЙ. ИОФФЕ.

Борисов С. Н., Переверзев Е. В. ТЕРРОРИЗМ: ИДЕНТИЧНОСТЬ И ДИСКУРС.

В статье рассматриваются возможности дискурсивной теории в осмыслении проблемы терроризма и идентичности. Отмечено, что в свете дискурсивного подхода формирование у субъектов стойкой фиксированной идентичности может быть рассмотрено в терминах манипулятивного идеологического воздействия. Дискурсивная проблематика идентичности соотносится со спецификой терроризма как объекта дискурсивного исследования.

ТЕРРОРИЗМ. ИДЕНТИЧНОСТЬ. ДИСКУРС-АНАЛИЗ. ДИСКУРС. МАНИПУЛЯЦИЯ.

Рукомойникова Е. Г. СТАНОВЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ «НАУЧНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ».

«Научная реальность» – это относительно новое понятие, призванное описать специфически научный способ построения картины мира. В статье рассмотрены предпосылки появления этого понятия, а также вопрос о том, что означает «быть реальным» для науки с точки зрения различных философских направлений, таких как наивный реализм, позитивизм и научный реализм.

РЕАЛЬНОСТЬ. МИРОВОЗЗРЕНИЕ. СУЩЕСТВОВАНИЕ. НАИВНЫЙ РЕАЛИЗМ. НАУЧНЫЙ РЕАЛИЗМ. ПОЗИТИВИЗМ.

Целищева З.А. ИДЕЯ ВОЗМЕЗДИЯ В СРЕДНЕВЕКОВОЙ КУЛЬТУРЕ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ.

В статье дан анализ идеи возмездия в культуре западноевропейского средневековья. Опираясь на труды известных философов, специалистов по данной теме, автор показывает, что интерес к этой теме был всегда актуальным. Автор формулирует собственную концепцию о влиянии на сознание средневекового человека идеи возмездия, отдельные положения которой дискуссионны и побуждают к размышлениям.

СРЕДНЕВЕКОВАЯ КУЛЬТУРА. ХРИСТИАНСТВО. ГРЕХ. ВОЗМЕЗДИЕ. ПЫТКА. КАЗНЬ. СПАСЕНИЕ.

Сидоренко О.В. МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКАЯ ЗАДАННОСТЬ ФУТУРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ.

Автор показывает, что современные футурологические исследования (от публицистических произведений до масштабных коммерческих форсайтов) основываются на определенном мировоззренческом базисе, утверждающем выгодные для авторов и читателей («заказчиков») объяснительные схемы мироустройства. Причем этот мировоззренческий базис, как правило, является продуктом западного мировоззрения и поэтому не может быть объективен при анализе глобальных проблем, тем более — построении масштабных прогнозных сценариев.

ФУТУРОЛОГИЯ. ИССЛЕДОВАНИЯ БУДУЩЕГО. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. ФОРСАЙТ. МИРОВОЗЗРЕНИЕ.



ABSTRACTS

KEY WORDS

Попов М.Г. RELAY PROTECTION OF PHASE-CONTROLLING POWER TRANSMISSION LINE.

Types of fault and abnormal conditions of supervoltage power transmission 500 kV with utilizable FACTS device, the power of which is 500 000 kVA, are considered in the research. The main decisions for device FACTS system of relay protection and automation establishment with traversal and direct controlling with allowance for circuit peculiarities are presented.

500 KV POWER TRANSMISSION. FACTS. SPECIAL FEATURES OF FAULT CONDITIONS. PHASE-CONTROLLING DEVICE SYSTEM OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION.

Silin N.V., Korovkin N.V., Shamkin I.S. SOME ASPECTS OF THE HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT SERVICE.

In this article the problems of the effective organization of maintenance service and repair of the high-voltage electropower equipment in view of domestic and foreign experience are considered. The expediency of use of an electromagnetic way of the control as at stages functional, and technical diagnostics is drawn.

THE HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT. DIAGNOSTICS. THE ELECTROMAGNETIC CONTROL.

Seryodkin A.A., Bass M.S., Ivanov S.A. PROBLEMS OF RATE SETTING OF LOSS OF HEAT IN HEAT CIRCUITS ON THE EXAMPLE OF CHITA.

In article it is given analysis of the calculation of existing rates in comparison with figures, got on the base of determination of optimal values of the row thermal insulation materials. Given methods are localized for conditions of Zabaykalisky Krai with provision of all particularities inherent to the given region. It is given an example of calculation for heat circuits of Chita.

HEAT CIRCUITS. THERMAL INSULATION. THERMAL ENERGY. PIPING. LOSS OF HEAT.

Batuhtin A.G. MODERN METHODS OF INCREASING OF EFFICIENCY OF TEAMWORK OF INSTALLATIONS OF HELIOHEATING AND SYSTEMS OF THE CENTRALIZED SUPPLY.

In article the evaluation of prospect of use of the in systems of heating of Zabaykalisky Krai is made. The evaluation of helioheating application is given and the plan of carrying out researches on increasing of efficiency of teamwork of and is offered.

HELIOHEATING INSTALLATION. SYSTEMS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY. SUN ENERGY.

Ivanov S.A., Batuhtin A.G., Goryachih N.V. COMPARATIVE EVALUATION OF EFFICIENCY OF HEAT STATION TURBO UNIT ADDITIONAL POWER PRODUCTION WAYS.

The article presents a comparative evaluation of efficiency of heat station turbo unit additional power production ways. There is a comparison criterion for capital investment and non-capital investment modifications. Unit costs assigned to receive an additional heat station power perform as economic criteria for optimal heating unit selection in these conditions. As an example we have (we have considered) three ways of additional power production: the way of limited turbine heat load and AHC heat undersupply coverage; the way of limited turbine load and coverage of basic networked heaters energy undersupply caused by peaking heater; the way of limited turbine load and the use of accumulating property (quality) of building and heat network.

TURBINE. STEAM BOILER. PEAKING HOT-WATER BOILER. ACCELERATION (INERTIAL) PROPERTIES OF HEATING SYSTEM AND BUILDINGS. CAPITAL INVESTMENTS. PRODUCTION COSTS.

Molodkina L.M., Andrianova M.Yu., Chusov A.N. EFFECT OF ULTRASONIC AND ENZYMES TREATMENT ON BIODEGRADATION MEDIUM- AND SLOWLY DEGRADABLE WASTE.

Effect of ultrasound and industrial enzymes (Biotal and Hamecozyme II) on plant and paper waste biodegradation in biogas-producing technology were studied. Possibility to use capillary electrophoresis and spectrofluorimetry to study biodegradation of plant biomass and municipal waste was shown also.

BIOENERGY. BIOGAS. PLANT AND HOUSEHOLD (MUNICIPAL) WASTE. ULTRASONIC TREATMENT. ENZYMES. BIODEGRADATION.

Bessolitsyn A.V., Novoselova O.A., Popov M.G. DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR NUMERICAL CALCULATION THE SERIES PARAMETERS OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE ON THE BASIS OF THREE-DIMENSIONAL BOUNDARY PROBLEM.

The finite element method is used to calculate the series impedance matrix of an overhead transmission line. Results show excellent agreement with those obtained by classical computation methods.

POWER TRANSMISSION LINES. FINITE ELEMENT METHODS. SERIES IMPEDANCE.

Bessolitsyn A.V., Popov M.G., Horoshinina E.N. USING THE NUMERICAL CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL ELECTROSTATIC FIELD TO DETERMINE SELF AND MUTUAL CAPACITANCE WIRES OVERHEAD LINE.

The article discusses the use of finite element method for calculating the three-dimensional electric field of overhead line. Algorithm is proposed for determining the electrical capacity of power line wires.

OVERHEAD LINES. FINITE ELEMENT METHODS. ELECTRICAL CAPACITANCE.

Golovin A.N. OPTIMIZATION AND COMPUTATION TECHNIQUE OF TRANSISTORS SWITCHING MODE PROCESSES IN RESONANT CURRENT FED INVERTER.

(Optimization and computation technique of transistors switching mode processes in resonant current fed inverter)

Analytical expressions for power losses in bridge type current fed inverter are founded. Recommendations and estimations for IGBT and MOSFET transistor's switches are presented.

BRIDGE TYPE CURRENT FED RESONANT INVERTER. POWER LOSSES IN TRANSISTOR.

Ignatenok V.V., Borovkov V.M. THE ANALYSIS OF METHODS OF REGULATION OF HEAT RELEASE OF THERMAL ENERGY TO CONSUMERS.

It has been considering the existing methods of regulation of heat release of thermal energy to the consumer from the centralized systems of a heat supply. It is resulted the brief characteristic of each method and it is defined the optimal way of regulation.

CENTRAL HEATING. THE CENTRALIZED SYSTEM OF THE HEAT SUPPLY. METHODS OF CENTRAL REGULATION HEAT EMISSION: QUALITATIVE, QUANTITATIVE AND QUANTITATIVELY – QUALITATIVE.

Vasilev A.P., Bandurin I.I. OPTIMIZATION OF STRUCTURE OF OPERATIVE SERVICE OF ELECTRIC NETWORKS.

In article the technique which is developed allows to choose an optimum variant of structure of operative service by criterion of a minimum of expenses for system of operative service. The new parameter for an estimation of an overall performance of system of operative service is offered.

OPERATIVE SERVICE. AN ELECTRIC NETWORK. SUBSTATION. QUEUE SYSTEM. AUTOMATED MECHANISMS. TELEMCHANICS.

Zaytsev A.V. Karpov A.S. THE EFFICACY AUTOMATIC SYSTEMS OF LIMITATION RISE FREQUENCY AT THE AREAS WITH HEP.

Emergency control with microprocessor technology allows immediately identify the emergency and create the optimal control actions.

EMERGENCY CONTROL. MICROPROCESSOR TECHNOLOGY.



Kravchenko I.V., Karpov A.S. THE ADVANTAGES OF AUTOMATIC DISCHARGE OF STEAM-TURBINE UNITS FOR THE FUNCTIONS OF EMERGENCY AUTOMATION POWER.

Modern control systems of steam turbines perform the functions of the regime of automatic control. Effectively as their use in devices emergency automation.

EMERGENCY CONTROL. TURING CONTROL. IMPULSE TURBINE DISCHARGE.

Shelomov V.B., Dobretsov R.Yu. THE ENGINE CAPACITY AND THE SLIPPING FRICTIONAL SHIFTING ELEMENTS CAPACITY ON THE TRACK-LAYING VEHICLE TURN.

The design procedure, allowing to estimate the engine capacity and the absorbed capacity of the slipping frictional shifting elements of a track laying vehicle, is offered. The external parameters of the vehicle turn mechanism are used. It is illustrated by a calculation example.

TRACK LAYING VEHICLE TURN. THE LOSSES OF ENGINE CAPACITY. FRICTIONAL SHIFTING ELEMENTS.

Breki A.D., Chulkin S.G., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Maksimov M.Y. INVESTIGATION OF NEW CONSTRUCTIVE LUBRICANTS CONTAINING FINE PARTICLES OF FRICTION MODIFIERS.

At present, along with new undoped lubricants widely available in the market are lubricating compositions containing additives specific functional purpose. The present study investigated the influence of natural and synthetic friction modifiers to the basic tribological properties of lubricant compositions based on aviation oil. Tests were provided on bearings steel pairs of friction.

Comparative analysis of the data showed significant decreasing of wear and increasing load of welding by doping base oil particles of tungsten dichalcogenides as compare with base oil and commercially available mineral- based lubricants.

FRICTION MODIFIERS. SERPENTINE. TUNGSTEN DICHALCOGENIDES. LIQUID LUBRICANT COMPOSITIONS.

Sharova N.A., Zhivushkin A.A., Tikhomirov E.A. The ESTIMATION of the CONDITION of DEVELOPMENT And APPLICABILITY of MODERN MATERIALS FOR DETAILS of the TURBINE of the PERSPECTIVE AVIATION ENGINE.

Work is devoted modern both perspective constructional materials and their conformity to requirements aviation GTE new generation. The special attention is given low-sized GTE, as the most difficult on realisation of the advanced systems of cooling.

HEAT-SHIELDING COVERINGS. CERAMIC MATRIX. NICKEL SUPERALLOYS. COMPOSITES. ANISOTROPY. UNIVERSAL GAS GENERATOR.

Maljugin S.G., Shemjakin A.V., Maljugin V. S. ESTIMATION OF PROBABILITY OF DESTRUCTION OF A COVERING OF A SURFACE OF THE SAMPLE TAKING INTO ACCOUNT VARIABILITY OF A THICKNESS OF A SUBSTRATE.

The present work reflects the concrete examples of application statistical methods of quality management of materials when making-ready machinery surfaces for painting, namely statistical control of prime coated surfaces.

ADHESION. COATING. SURFACE. STATISTICAL CONTROL.

Dolgushev D.M., Semenov A.G., Elizov A.D. TRANSPORT SCOOTER CONCEPT «AQUA» FOR LIMITED MOBILITY PERSONS.

Design results for floating transport scooter project «Aqua» intended, mainly, for limited mobility persons are resulted. Design is based on creation experience for transport scooters as new version of small class electric driven multipurpose vehicles. Vehicle concept, its configuration is offered, buoyancy estimation and on water stability is given.

TRANSPORT SCOOTER. SCOOTER. INVALID CARRIAGE. ELECTRIC DRIVE. AMPHIBIAN. LEAK-PROOFNESS. BUOYANCY. STABILITY.

Kudriashov F.A., Posevkin A.A., Semenov A.G., Elizov A.D. OFFERS ON CREATION A HYBRID-KONTSEPTOV ON THE BASIS OF THE CAR AND THE TRANSSCOOTER.

Innovative projects for ground electric transport are offered: an electromobile and the transport scooter with hybrid power plants (engine + electric motors with accumulators). Design process is based on creation and tests experience for similar products and presence of qualified personnel and other conditions favorable for realisation of projects.

ELECTROMOBILE. SCOOTER. LOW EMISSION TRANSPORT. REHABILITATION TECHNICS. HYBRID POWER PLANT.

Barzov A.A., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I., Salnikov S.K. ANALYSIS OF AN ULTRAJET KINEMATIC FACTOR INFLUENCE ON EFFICIENCY HYDRODYNAMIC MACHINING.

An ultrajet kinematic factor is not sufficiently studied parameter, the study and consideration of which can increase this technology efficiency in general. The model of a kinematic factor influence on a formation high-speed liquid abrasive slurry cutting profile has been considered. Experimental determination of the profile and the depth of cut depending on the different values of the KF has been put into practice.

KINEMATIC FACTOR. ULTRAJET MACHINING. TECHNOLOGY EFFICIENCY INCREASE.

Lakhova E.N., Nosov V.V. ESTIMATION OF STRUCTURE AND STRESS HETEROGENEITY DEGREE OF MATERIAL IN LAP WELDED JOINTS BY ACOUSTIC EMISSION.

A method of estimation of structure and stress heterogeneity impact on strength properties of machine components and constructions is considered. The use of method is given for the patterns of lap welded joints. The cause of low correlation between concentration-kinetic strength factor and the maximum stress value, which was observed in some cases, is identified.

DURABILITY. DESTRUCTION. HETEROGENEITY. MICROMECHANICAL MODEL. ACOUSTIC EMISSION. WELDED JOINT.

Kirillov N.B., Vasilkov S.D., Novikov V.I. THE INTLUENCE OF ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING ON THE QUALITY OF TTE SURFACE LAYER OF PRODUCTS FROM ALLOY STEELS.

The article presents the effect of electrolytic-plasma polishing (EPP) on the quality of the surface layer, which is determined by such parameters as the level of residual stress, microstructure and microhardness.

ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING. RESIDUAL STRESSES. THE STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER. MICROHARDNESS. ALLOY STEEL.

Elchaninov G.S., Nosov V.V. FEATURES OF THE CONDITION OF NON-UNIFORM WELDED CONNECTIONS AND NOT DESTROYING CONTROL OF DURABILITY.

Criteria of heterogeneity and durability of non-uniform welded connections are offered, questions of their experimental estimation are considered. Adequacy of micromechanical model of acoustic issue of heterogeneous materials, efficiency of its use for not destroying control of durability of essentially non-uniform technical objects is shown.

DURABILITY. DESTRUCTION. HETEROGENEITY. MODELLING. MICROMECHANICAL MODEL. THE FORECASTING. NOT DESTROYING CONTROL. ACOUSTIC ISSUE. WELDED CONNECTIONS.

Zolotov A.M., Ganin S.V., Parshikov R.A., Smirnov Y.S. RESEARCH OF PROCESS EQUAL CHANNEL OF ANGULAR PRESSING OF PREPARATIONS FROM ALUMINIUM POWDERS IN CAPSULES.

The study of equal channel angular pressing (ECAP) process for aluminum powders in capsules. The possibilities of powder billets consolidation in capsules by ECAP method are considered. The basic stages and features of the process are analyzed using mathematical modeling. Experimental research results are presented.

EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING. ALUMINUM POWDERS. CONSOLIDATION IN CAPSULES. MATHEMATICAL MODELING.

Gasarov B.G., Efimov A.D. ACTIVATION OF DIFFUSION PROCESSES DURING TWO-STAGES INTERING OF POROUS BIMETALLIC MATERIALS.

Features of cyclic high-temperature heating on second stages of porous bimetallic specimens was investigated. Analytic depends was found, which characterize of diffusion processes passing on second stage of sintering. Was found, that biteerrupted high-temperature heating of operating layer by high-frequency formation and improve quality of bimetallic and multilayer porous specimens.

DIFFUSION PROCESS. BIMETALLE. SECOND STAGE SINTERING. CYCLIC HEATING. INTER-LAYER POROSITY.



Natorhin M.I. HI-TEC LEACHING SILVER-LEADED MATERIALS IN THE CHLORIDE SOLUTIONS.

This paper presents the new innovation technologies in the silver metallurgy. In the article described theoretical aspects solubility non-ferrous metals in the chloride solutions and practical results on the its chloride leaching. A new ecology technological scheme development silver-leaded materials is showed.

NEW TECHNOLOGY. METALLURGY. SILVER. ECOLOGY.

Orlov A.V. TO THE SUBSTANTIATION OF THE SEDATE METHOD BY DEFINITION OF SHARES OF THE RESIDUAL MEMBER.

In article the substantiation of division of a residual member between the factors which have caused it is presented. The algorithm on which basis without dependence from quantity of factors, their absolute values and their sign probably to express result of product through the sum of composed factors corresponding to quantity is presented is unique a well-founded method. The offered decision in the literature is absent.

RESIDUAL MEMBER. FACTORS. ALGORITHM OF DIVISION. THE SHARE. PRODUCT. FACTORS. THE SUM.

Epifanov A.A., Titenskiy V.I. NUMERICAL MODELING OF VISCOUS FLOW AT THE AXIAL BLADE CASCADES.

The results of practical application of computational fluid dynamics (CFD) to the investigation of the axial blade cascades are presented. The numerical experiment of subsonic viscous flow at the axial blade cascades is carried out by means of different angles of attack. The results are compared with experimental data.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD). SUBSONIC VISCOUS FLOW. ANSYS CFX. AXIAL BLADE CASCADE. GAS-DYNAMIC BEHAVIORS.

Anakhov S.V., Pyckin Yu.A., Matushkin A.S. OPTIMIZATION OF LOW TEMPERATURE PLASMA NEUTRALIZATION TECHNOLOGY OF PETROCONTAINING WASTE.

The technology in which process of petrocontaining waste neutralization occurs in the nonequilibrium low temperature plasma is offered. This technology provides conditions, leading to irreversible destruction of dioxins. Optimization of technology on working parameters for liquid and gas-vapor mixes was realized. Increase of the process efficiency is reached due to application of original technology of recuperative heat and mass exchange.

THERMAL PROCESSING. ECOLOGICAL SAFETY. OIL SLIME. PLASMOTRON. PLASMA CHEMICAL REACTOR. HIGH-TEMPERATURE PYROLYSIS. PYROPLASMA. BARBOTAGE.

Danilets L.A. METHOD FOR CALCULATING COMBUSTION EFFICIENCY OF GASEOUS FUEL IN GAS TURBINE PLANTS BY THE METHOD OF THE ANALYSIS OF TEST.

To calculate combustion efficiency of fuel in gas turbine plant, method has been developed. The method uses metering of combustion materials volume fractions, composition of fuel gas and air-gas mixture.

COMBUSTION EFFICIENCY. EMISSIONS. INCOMPLETE COMBUSTION. PRODUCTS OF COMBUSTION. LOW HEAT OF FUEL COMBUSTION.

Kondratyev M.A., Ivanovsky R.I., Tsybalova L.M. AN APPLICATION OF AGENT BASED APPROACH FOR SIMULATION MODELING OF THE SPREAD OF AN INFECTIOUS DISEASE.

The paper represents an application of agent based approach for simulation modeling as the new way to create epidemic models. It is much differed from common disease spreading simulation technique, which uses differential equations. The AnyLogic 6 agent based computer simulation model of the influenza spreading was created. The model allows making a short-range sickness rate forecast based on current morbidity statistics.

AGENT-BASED SIMULATION. ANYLOGIC. FORECAST. EPIDEMIC MODELS. DISEASE SPREADING. INFLUENZA.

Fedorov M.P., Umanets V.N. THE ANALYSIS GEOECOLOGIKAL PROBLEMS AT CONSTRUCTION CITY ON EXAMPLE SAINT PETERSBURG.

The various definitions of a science "Geoecology" with reference to building and HPF (housing and public facilities) are considered. The analysis of geoecological problems on an example of construction of St.-Petersburg is given. The circle basic on tasks is determined in the field of building geoecology.

GEOECOLOGY. GEOSPHERE OF THE EARTH. LITHOSPHERE. ECOLOGICAL FUNCTIONS. BUILDING COMPLEX. GEOECOLOGICAL PROBLEMS.

Bogolepov I.I., Stoljarova N.P. DEFINITION OF NECESSARY SOUND INSULATION of WINDOWS of MODERN BUILDINGS.

Importance of a question of maintenance of necessary sound insulation of windows of inhabited and public buildings consists that sound insulation of external walls of these buildings from external noise is completely defined by sound insulation of windows. However different authors suggest to define demanded sound insulation of windows different methods. Article is devoted the analysis of these methods: an engineering essence, a rational scope, pluses and minuses.

SOUND INSULATION OF WINDOWS. METHOD OF NORMALISED PARAMETRES. METHOD OF CALCULATION EXPECTED NOISE.

Al-Ahwal N.S., Semin E.G. THE EFFECT OF SOLID WASTE IN THE POLLUTION OF THE ENVIRONMENT IN YEMEN.

This article shows that wastes affect the ecological environment of the region so they can have a great influence on various aspects of human life, comparative characteristics of the ecosystem by using different technological solutions in the system of solid waste management and show composition of the gas in the landfill, which clearly very danger to the environment and health of the human.

SOLID WASTE. LANDFILL. POLLUTION DIOXIN. GAS.

Antonov V.I. FUNDAMENTAL MATHEMATICAL FORMATION IN ST.-PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY.

In article principles of fundamental mathematical formation are considered. The data about realization of these principles on chair of higher mathematics of the St.-Petersburg state polytechnic university is cited. The problems connected with transition to two-level system of higher education and introduction of new educational standards are outlined.

MATHEMATICAL FORMATION. THE FUNDAMENTAL SCIENCES. TWO LEVEL SYSTEM.

Komarov V.D. THE STATUS AND SPECIFICITY OF TECHNOLOGICAL SCIENCES.

On the basis of the ontological, historical and gnosiological analysis of technology the subject of technological sciences comes to light. The last is identified as rather independent branch of a modern science. Statuses of technical and technological sciences are considered, the prospect of scientifically-technological revolution is designated.

TECHNOLOGICAL SCIENCES. TECHNOLOGICAL MEANS OF PRODUCTION (TMP). TECHNOLOGY. TECHNICS. HIGH TECHNOLOGIES. SCIENTIFICALLY-TECHNOLOGICAL REVOLUTION.

Korbutov I.I., Snopok G.I. THE ORGANIZATION OF MANAGEMENT OF HIGH SCHOOL IN EMERGENCY SITUATIONS PEACE AND THE WARTIME.

In article questions of perfection of the organisation of management by high school in emergency situations by formation of a control system by a civil defence for maintenance of management in the conditions of daily activity are considered, at threat of occurrence of emergency situations and conducting military operations. It is shown that the offered control system provides management efficiency increase in emergency situations peace and a wartime, and also its mobility at the decision of questions of fire safety.

MANAGEMENT. THE CONTROL SYSTEM. EMERGENCY SITUATIONS. DAILY ACTIVITY. THE CIVIL DEFENCE.

Kesamanly F.P. P.S. ERENFEST, D.S. ROGDESTVENSKIY AND A.F. IOFFE — FOUNDERS OF FIRST THREE SCHOOLS OF THOUGHT IN PHYSICS AREA IN PETERSBURG — PETROGRAD — LENINGRAD.

The physics condition in Petersburg in the XX-th century beginning is considered. At this time widely known five there worked in Russia professors of physics: I.I.Borgman and O.D.Hvolson at university, N.A.Gezehus in the Institute of technology, N.G.Egorov in Army medical college and V.V. Skobeltsyn at Polytechnical institute. However any of these five outstanding scientists has not created the school of thought.

Schools of thought on the physicist in Petersburg have started to arise with the end of the first decade of the XX-th century. The role in origin in Petersburg-Petrograd of schools of thought which were definitively issued in Leningrad, P.S.Erenfest, D.S. Rogdestvenskiy and A.F.Ioffe scientific seminars is great. Erenfest has laid the foundation for a school of thought in the field of theoretical physics, Rogdestvenskiy and Ioffe — in the field of theoretical physics.

SCIENTIFIC SEMINAR. SCHOOLS OF THOUGHT. PHYSICS. HISTORY. ERENFEST. ROGDESTVENSKIY. IOFFE.

Borisov S.N., Pereverzev E.V. TERRORISM: IDENTITY AND DISCOURSE.

The article reveals the potential of discourse theory in studies of terrorism and identity. The authors argue that from the point of view of discourse theory construction of solid, fixed identity may be described in terms of ideological manipulation. The discursive qualities of identity are linked to the problem of terrorism as an object of discourse-analytical studies.

TERRORISM. IDENTITY. DISCOURSE-ANALYSIS. DISCOURSE. MANIPULATION.

Rukomojnikova E.G. CATEGORY FORMATION «THE SCIENTIFIC REALITY»

Scientific reality" is a relatively new concept destined to describe a specific way to construct the picture of the world used by science. The article considers the problem of how the different philosophical theories such as naive realism, scientific realism and positivism answer the question «what does it mean to be real?» applied to scientific objects, i.d. «what does it mean to be real for the science?».

REALITY. WORLDVIEW. EXISTENCE. NAIVE REALISM. SCIENTIFIC REALISM. POSITIVISM.

Tselischeva Z.A. RETRIBUTION IDEA IN WEST EUROPEAN MEDIEVAL CULTURE.

The analysis of the retribution idea in West European medieval culture is presented in the article. Basing on famous philosophers' works, the author represents her own concept about the influence of the retribution idea on a medieval person's mind. Some ideas of the concept are debatable and stimulate to think this idea over.

MEDIEVAL CULTURE. CHRISTIANITY. SIN. RETRIBUTION. TORTURE. EXECUTION. SALVATION.

Sidorenko O.V. WORLD-OUTLOOK DETERMINATION OF FUTUROLOGICAL RESEARCHES.

The author of this article demonstrates that modern futurological researches both publicistic and commercial are based on the definite world-outlook basis, confirming profitable for the author and the reader/client explanatory schemes of the world structure. Moreover, this world-outlook basis is the product of the western thinking and so can't be objective in the analysis of global problems and more than that in making up massive inferential forecasts.

FUTUROLOGY. RESEARCHES OF THE FUTURE («FUTURE STUDIES» – TERM.). TECHNOLOGICAL FORECASTING. FORESIGHT. WORLD-OUTLOOK.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 2-2 (100) 2010

Серия “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
доцент *Л.В. Спиридонова* – научный редактор, корректор
О.А. Матенев – технический секретарь

Телефон редакции 294-47-72

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой, Н.А. Дубовской*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 24.08.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 33,48. Уч.-изд. л. 33,48. Тираж 1000. Заказ 300.

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.